



**HAL**  
open science

# Contribution à l'étude du raisonnement en univers multi-agent : KIDS, une application pour l'interprétation d'images biomédicales

Demetro Arturo Ovalle Carranza

► **To cite this version:**

Demetro Arturo Ovalle Carranza. Contribution à l'étude du raisonnement en univers multi-agent : KIDS, une application pour l'interprétation d'images biomédicales. Modélisation et simulation. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1991. Français. NNT: . tel-00339255

**HAL Id: tel-00339255**

**<https://theses.hal.science/tel-00339255>**

Submitted on 17 Nov 2008

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

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

I. 2. 11  
TI 16 329  
313 998

THESE

présentée par

**Demetrio Arturo OVALLE CARRANZA**

pour obtenir le titre de DOCTEUR  
de l'Université JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I

(Arrêté ministériel du 5 juillet 1984)  
(Spécialité Informatique)

*Contribution à l'étude du raisonnement en univers  
Multi-Agent :*

*KIDS,*

*une application pour l'Interprétation  
d'Images Biomédicales*

Thèse soutenue le 15 novembre 1991 devant la commission d'examen.

Composition du jury :

Camille BELLISSANT  
François RECHENMANN  
Monique THONNAT  
Augustin LUX  
Silvana DELLEPIANE  
Catherine GARBAY

président  
rapporteurs

examineurs

Thèse préparée au sein du

Groupe SIC  
Equipe de Reconnaissances de Formes  
et de Microscopie Quantitative  
Laboratoire TIM3  
USR CNRS n° 00690 - Institut IMAG

INSTITUT IMAG  
Informatique, Mathématiques Appliquées et Graphique  
CNRS-INPG-US IMAG  
MÉDIATHÈQUE  
B.P. 53 X  
38041 GRENOBLE CEDEX  
FRANCE  
Tél. 76.51.46.35



## **Remerciements**

---

Mes remerciements les plus vifs sont tout d'abord adressés à Madame **Catherine GARBAY**, chargée de recherches au CNRS, qui est à l'origine de ce travail, pour l'aide précieuse qu'elle m'a apportée et pour son soutien indéfectible tout au long de ce travail, mais aussi pour l'esprit d'ouverture et de partage de connaissances qu'elle fait régner au sein de son groupe.

Je tiens à remercier également :

Monsieur **Camille BELLISSANT**, professeur à l'Université Mèdes France, pour me faire l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Monsieur **François RECHENMANN**, directeur de recherches à l'INRIA, pour me faire l'honneur de juger ce travail mais aussi pour ses conseils pertinents, particulièrement lors de mes débuts de la rédaction de ce manuscrit.

Mademoiselle **Monique THONNAT**, directeur de recherches à l'INRIA à SOPHIA-ANTIPOLIS, pour me faire l'honneur de juger ce travail mais aussi pour le temps qu'elle m'a consacré lors de ma visite à son laboratoire et pour ses conseils précieux sur le contenu de ce travail.

Monsieur **Augustin LUX**, professeur à l'ENSIMAG, pour avoir accepté d'examiner ce travail, pour ses conseils et critiques constructives qui m'ont permis de l'améliorer.

Mademoiselle **Silvana DELLEPIANE**, maître de conférences à l'Université de Gênes, pour avoir accepté d'examiner ce travail mais aussi pour son soutien et sa sympathie pendant ces dernières années de recherche.

Monsieur **Daniel SEIGNEURIN**, professeur à l'Université Joseph Fourier et responsable du service de Cytologie à l'Hôpital de la Tronche pour sa contribution précieuse et sa patience

pendant les nombreux entretiens qui ont eu lieu lors des phases d'élicitation des connaissances et de modélisation de l'expertise médicale en cytologie mammaire.

L'ensemble des membres de l'équipe RFMQ qui m'ont exprimé leur soutien amical mais plus particulièrement les membres du groupe SIC, constitué récemment par Catherine GARBAY, parmi lesquels Emmanuelle HUGONNARD, Olivier BAUJARD, Sylvie PESTY avec qui j'ai partagé ces dernières années de recherche, établi des échanges de connaissances fructueux et construit des liens d'amitiés indéfectibles.

Aux enseignants du département d'Informatique à l'IUT de Grenoble mais plus particulièrement aux enseignants du groupe d'Analyse qui m'ont exprimé leur soutien amical mais aussi leur compréhension pendant les dernières mois de rédaction de ce manuscrit.

A tous ces compagnons et amis de la vie de tous les jours avec qui, pendant ces années j'ai partagé des instants précieux en dehors de mes heures de travail.

Enfin, une dette de gratitude envers mes parents et familiers qui tout en étant très loin ont su m'appuyer à tout instant.

# Sommaire

---

Introduction THESE.....	1
-------------------------	---

*Partie A : Situation du problème*

Introduction partie A.....	3
----------------------------	---

## Chapitre I. Etat de l'Art : Systèmes à base de Connaissances

<b>Introduction.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Systèmes de première génération.....</b>	<b>10</b>
1.1. Systèmes à base de règles de production.....	10
1.2. Représentations Centrées Objet (RCO) & Langages Orientés Objet (LOO).....	11
<b>2. Systèmes de seconde génération.....</b>	<b>14</b>
2.1. Modes de conception.....	15
2.2. Distribution des tâches et des compétences .....	15
2.2.1. Approches modulaires .....	16
2.2.2. Points de vue multiples .....	16
2.3. Modes et protocoles de communication .....	17
2.3.2. Communication par envoi de messages.....	18
2.3.3. Approches hybrides .....	19
2.4. Modes de coopération .....	19
2.4.1. Négociation.....	20
2.4.2. Échange de résultats intermédiaires.....	20
2.4.3. Approche organisationnelle.....	21
2.4.4. Planification locale.....	21
<b>Conclusion .....</b>	<b>23</b>

## Chapitre II. Etat de l'Art : Systèmes de Vision à base de Connaissances

<b>Introduction.....</b>	<b>27</b>
<b>1. Systèmes fondés sur une analyse détaillée des     algorithmes.....</b>	<b>29</b>
<b>2. Systèmes de supervision des programmes.....</b>	<b>30</b>
2.1. Systèmes de consultation .....	31
2.2. Systèmes de création de programmes à partir de bibliothèques.....	31
2.3. Systèmes d'intégration sémantique de programmes.....	32

<b>3. Systèmes de compréhension à base de connaissances.....</b>	<b>33</b>
3.1. Systèmes séparés .....	33
3.2. Systèmes hybrides.....	35
<b>Conclusion .....</b>	<b>39</b>

### Chapitre III : Etat de l'Art : Systèmes à base de Connaissances en Imagerie

#### Médicale

<b>Introduction.....</b>	<b>43</b>
<b>1. Systèmes à base de connaissances en Médecine.....</b>	<b>44</b>
1.1. Systèmes d'Assistance .....	44
1.1.1. Assistance médicale d'urgence.....	44
1.1.2. Assistance à l'élaboration des examens complémentaires.....	44
1.1.3. Assistance à l'élaboration des essais cliniques et pharmacologie .....	44
1.2. Systèmes de consultation .....	45
1.3. Systèmes de formation.....	45
<b>2. Interprétation d'images microscopiques.....</b>	<b>46</b>
2.1. Problématique de la cytopathologie.....	46
2.1.1. La cytopathologie dans la pratique médicale.....	46
2.1.2. Problématique de l'inspection du spécimen .....	47
2.2. Systèmes d'assistance en microscopie .....	50
2.2.1. La quantification .....	50
2.2.2. Systèmes experts utilisant des connaissances de référence.....	50
2.2.3. Systèmes experts d'aide au diagnostic .....	51
2.3. Progrès récents et perspectives.....	53
<b>Conclusion .....</b>	<b>55</b>
<b>Conclusion partie A.....</b>	<b>57</b>
<b>Références bibliographiques partie A.....</b>	<b>59</b>
Références bibliographiques chapitre I.....	59
Références bibliographiques chapitre II.....	63
Références bibliographiques chapitre III.....	65

*Partie B : Modélisation des  
connaissances et du raisonnement*

<b>Introduction partie B</b> .....	69
<b>Chapitre I : Modélisation du raisonnement médical</b>	
<hr/>	
<b>Introduction</b> .....	75
<b>1. La Tâche de Validation du Spécimen</b> .....	76
<b>2. La Tâche de Sélection</b> .....	76
<b>3. La Tâche d'Analyse Morphologique</b> .....	78
<b>4. La Tâche d'Identification Cellulaire</b> .....	78
<b>5. La Tâche d'Interprétation Diagnostique</b> .....	79
<b>6. La Tâche de Validation du Diagnostic</b> .....	82
<b>Conclusion</b> .....	83
<b>Chapitre II : Les connaissances</b>	
<hr/>	
<b>Introduction</b> .....	87
<b>1. Axe fonctionnel d'organisation de la connaissance</b> .....	88
1.1. Connaissances figuratives.....	88
1.2. Connaissances opératoires.....	88
1.3. Connaissances réflexives.....	90
<b>2. Axe structurel d'organisation de la connaissance</b> .....	91
2.1. Connaissances intrinsèques.....	91
2.2. Connaissances contextuelles.....	92
2.3. Connaissances compositionnelles.....	94
2.4. Connaissances taxinomiques.....	94
2.5. Connaissances causales.....	96
<b>3. Axe d'organisation de la connaissance par niveaux d'abstraction &amp; domaines d'application</b> .....	98
3.1. Connaissances générales, opératives et routinières.....	98
3.2. Connaissances profondes et de surface.....	99
<b>Conclusion</b> .....	101



## Chapitre III : Le raisonnement

---

<b>Introduction</b> .....	105
<b>1. Raisonnements primaires</b> .....	106
1.1. Typologie fonctionnelle des raisonnements.....	106
1.1.1. Raisonnement figuratif.....	106
<i>forme spatiale</i> .....	107
<i>forme symbolique</i> .....	108
<i>forme temporelle</i> .....	109
1.1.2. Raisonnement opératoire.....	110
1.1.3. Raisonnement réflexif.....	110
<i>forme incertaine ou imprécise</i> .....	111
<i>forme non-monotone</i> .....	113
1.2. Typologie structurelle des raisonnements.....	115
1.2.1. Raisonnements intrinsèques.....	115
1.2.2. Raisonnements contextuels.....	116
1.2.3. Raisonnements compositionnels.....	117
1.2.4. Raisonnements taxinomique et causaux.....	118
1.3. Typologie des raisonnements par niveaux d'abstraction et domaine d'application.....	119
<b>2. Raisonnements hybrides</b> .....	121
2.1. Raisonnements hybrides simples .....	121
<i>forme hypothétique et incertaine</i> .....	121
<i>forme hybride figurative et opératoire</i> .....	121
<i>formes causale et temporelle</i> .....	122
<i>formes temporelle et non monotone</i> .....	122
2.2. Raisonnements hybrides complexes.....	122
<b>Conclusion</b> .....	125
<b>Conclusion partie B</b> .....	127
<b>Références bibliographiques partie B</b> .....	129

### *Partie C : La réalisation*

<b>Introduction partie C</b> .....	137
------------------------------------	-----

## Chapitre I : Le raisonnement en univers multi-agent

---

<b>Introduction</b> .....	143
<b>1. L'agent</b> .....	144
1.1. L'agent et sa structure .....	145
1.1.1. Raisonnements liés aux communications.....	146
<i>moyen de communication</i> .....	146
<i>contenu des communications</i> .....	147

<i>protocole de communication</i> .....	148
1.1.2. Raisonnements liés à la gestion de la base de connaissances .....	148
1.1.3. Raisonnements liés à l'exploitation de ses propres ressources .....	149
1.1.4. Raisonnements intentionnels.....	150
1.2. Le contrôle .....	150
1.3. Relations entre typologie formelle et typologie technologique.....	152
<b>2. Le groupe d'agents</b> .....	<b>153</b>
<b>3. Approches à base du tableau noir</b> .....	<b>155</b>
3.1. L'agent.....	155
<i>les communications</i> .....	155
<i>la gestion de la base</i> .....	155
<i>compétences</i> .....	155
<i>couche intentionnelle</i> .....	155
3.2. Le groupe d'agents.....	156
<i>distribution des tâches et des compétences</i> .....	156
<i>modes et protocoles de communication</i> .....	156
<i>modes d'organisation et de coopération</i> .....	156
<i>quelques avantages de cette approche</i> .....	157
<i>quelques inconvénients de cette approche</i> .....	157
<b>4. Quelques considérations sur l'explication du raisonnement</b> .....	<b>158</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>161</b>

## Chapitre II : L'environnement de programmation MAPS

<b>Introduction</b> .....	<b>165</b>
<b>1. Structure de base des agents</b> .....	<b>165</b>
1.1. L'architecture interne des agents .....	165
1.2. Les communications.....	166
1.3. La gestion des bases de connaissances.....	167
1.3.1. Agents KS.....	167
1.3.2. Agents KP.....	168
1.4. Les compétences .....	168
1.4.1. Agents KS.....	168
<i>capacité de propagation</i> .....	168
<i>capacité de proposition</i> .....	169
<i>capacité d'interrogation</i> .....	169
1.4.2. Agents KP.....	169
1.5. La couche intentionnelle : comportements de haut niveau..	170
1.5.1. Agents KS.....	170
1.5.2. Agents KP.....	172
<b>2. Groupe d'agents</b> .....	<b>174</b>
2.1. Distribution des tâches et de compétences.....	174
2.2. Modes et protocoles de communication.....	175
2.3. Modes d'organisation et de coopération.....	175

2.4. Enchaînement des cycles de contrôle.....	177
<b>3. Le langage de programmation MAPS.....</b>	<b>178</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>181</b>

**Chapitre III : Le système KIDS (Knowledge based Image Diagnosis System)**

<b>Introduction.....</b>	<b>185</b>
<b>1. La connaissance.....</b>	<b>185</b>
1.1. Connaissances Figuratives.....	186
1.2. Connaissances Opératoires.....	186
1.3. Connaissances Réflexives et Heuristiques .....	187
<b>2. Ressources et comportements des agents/groupes d'agents .....</b>	<b>188</b>
2.1. Phase d'exploration.....	189
2.1.1. Problématique.....	189
2.1.2. Distribution des tâches et des compétences.....	189
2.1.3. Choix d'implantation.....	190
2.1.4. Fonctionnement du groupe d'agents .....	194
2.1.5. Etat actuel de l'implantation .....	197
2.2. Phase d'identification cellulaire .....	199
2.2.1. Problématique.....	199
2.2.2. Distribution des tâches et des compétences.....	199
2.2.3. Choix d'implantation.....	201
2.2.4. Fonctionnement du groupe d'agents .....	206
2.2.5. Etat actuel de l'implantation .....	209
2.3. Phase de formulation diagnostique .....	210
2.3.1. Problématique.....	210
2.3.2. Distribution des tâches et des compétences.....	211
2.3.3. Choix d'implantation.....	211
2.3.4. Fonctionnement du groupe d'agents .....	213
2.2.5. Etat actuel de l'implantation .....	214
2.4. Interface graphique .....	215
<b>3. Raisonnements développés par le système KIDS.....</b>	<b>216</b>
3.1. Raisonnements au niveau primaire.....	216
3.1.1. Raisonnements et organisation fonctionnelle de la connaissance.....	216
<i>Raisonnement figuratif</i> .....	216
<i>Raisonnement opératoire</i> .....	216
<i>Raisonnement réflexif</i> .....	217
3.1.2. Raisonnements et organisation structurelle de la connaissance.....	217
3.1.3. Raisonnements et organisation de la connaissance par domaine d'application .....	219
3.2. Raisonnements hybrides .....	219
<b>Conclusion .....</b>	<b>221</b>
<b>Conclusion partie C.....</b>	<b>225</b>
<b>Conclusion THESE.....</b>	<b>227</b>
<b>Références bibliographiques partie C.....</b>	<b>231</b>

## **Introduction THESE**

---

Connaître, apprendre, communiquer, raisonner, décider et agir sont les principales facultés qui confèrent à l'homme son intelligence. Ces facultés, l'homme s'est fixé comme objectif de les transmettre aux systèmes artificiels. Selon le dictionnaire "Le petit Robert" de la langue française, la faculté du raisonnement précède la faculté de l'agir. Conduire un raisonnement consiste donc à enchaîner des jugements pour aboutir à des conclusions qui seront ensuite utilisées pour décider des actions à entreprendre.

L'objectif de cette thèse est l'analyse du raisonnement, et plus particulièrement son étude en univers multi-agent. Pour effectuer cette analyse nous nous trouvons confrontés aux contraintes et pré-requis suivants :

- un domaine d'application complexe, caractérisé par une grande variété des formes de connaissances et des schémas de raisonnements : la modélisation de l'expertise humaine pour l'interprétation d'images biomédicales constitue le cadre privilégié d'application de nos recherches ;
- une technologie informatique puissante et bien adaptée au type de problème qui nous concerne, mais d'utilisation complexe : la technologie multi-agent ;
- une conception "centrée-utilisateur" et non "centrée-système". En effet, il s'agit de concevoir un système dont le "modèle de pensée" soit proche de celui de l'utilisateur, dans le but de faciliter la communication homme-machine ; il s'agit également de garantir des fonctionnalités répondant vraiment aux besoins de l'utilisateur.

Dans ce but, il convient de mener une analyse approfondie des technologies disponibles dans les trois domaines suivants : systèmes multi-agents, systèmes de vision et systèmes d'aide à la décision médicale. Dans cette optique, la partie A de cette thèse intitulée "Situation du problème" a pour but de présenter un état de l'art des recherches menées actuellement dans ces trois domaines. En ce qui concerne le domaine de la médecine l'accent sera mis plus précisément sur l'interprétation d'images biomédicales.

Une compréhension approfondie des connaissances et des raisonnements impliqués dans l'application qui nous intéresse est également nécessaire, afin de concevoir une technologie robuste. Ceci nous a poussé à proposer une typologie formelle, développée dans la partie B de cette thèse, intitulée "Modélisation des connaissances et du raisonnement".

Cette typologie formelle pour la classification des connaissances et du raisonnement permet une vue synthétique d'éléments souvent présentés de façon éparse et peut s'avérer un outil d'assistance à la modélisation des connaissances et des raisonnements. Cependant, cette typologie est assez générale, elle est parfois difficile à cerner, mais surtout demeure loin d'une implantation informatique. C'est la raison pour laquelle nous avons cherché à proposer une nouvelle typologie, cette fois-ci de type technologique, qui considère les aspects les plus significatifs de la technologie multi-agent et qui nous rapproche d'une implantation informatique.

La typologie technologique, décrite et illustrée dans la partie C intitulée "Réalisation", prend en compte les paramètres régissant les raisonnements propres à la technologie multi-agent en les considérant non seulement au niveau individuel de l'agent mais aussi au niveau du groupe d'agents. Ces paramètres ne sont pas indépendants : ils sont au contraire étroitement liés à d'autres problématiques telles que l'étude et la représentation des connaissances, la spécification des structures de contrôle, des protocoles de communication et d'allocation des tâches ou le degré de sophistication de l'architecture interne des agents. C'est la raison pour laquelle nous n'hésiterons pas à les aborder, dans une certaine mesure, au cours de cette thèse.

Enfin, les correspondances possibles entre typologie formelle et typologie technologique, puis l'intérêt de concevoir un système selon une approche "centrée-utilisateur", sont concrétisés par la présentation dans les deux derniers chapitres de la partie C des systèmes MAPS (Multi-Agent Problem Solver), générateur de systèmes multi-agents et KIDS (Knowledge based Image Diagnosis System), système multi-agent dédié à l'interprétation d'images biomédicales. Il convient de souligner ici que la conception du générateur MAPS ne rentre pas dans le cadre de cette thèse. Le système KIDS, quant à lui, par la variété des formes de connaissances et de raisonnements engagées, illustre l'intérêt des typologies formelle et technologique présentées précédemment. De plus, son architecture reflète la démarche de résolution utilisée par le cytopathologue pour la scrutation de spécimens en cytologie mammaire, illustrant ainsi une conception de style "centrée-utilisateur".

## Introduction partie A

---

Le problème concret qui nous intéresse (modélisation du raisonnement médical en cytologie mammaire) se situe au carrefour des technologies disponibles dans les trois domaines suivants : systèmes à base de connaissances, systèmes de vision et systèmes d'aide à la décision médicale. Le but de cette partie, intitulée "Situation du problème", est ainsi de présenter un état de l'art des recherches menées actuellement dans ces trois domaines. Cet état de l'art est établi selon une présentation progressive, des méthodologies générales de conception vers l'étude des systèmes dédiés à l'interprétation d'images biomédicales.

L'objectif est ainsi de concevoir des systèmes dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire qui essaie de confronter les domaines des systèmes à base de connaissances, de la vision par ordinateur et de la médecine. Nous sommes persuadés que les avancées les plus remarquables dans chaque domaine ont bénéficié des efforts d'une recherche coopérative visant à trouver le meilleur compromis entre le développement d'un cadre théorique robuste et la conception d'outils dédiés de haute performance : c'est la raison pour laquelle nous avons décidé de présenter cet état de l'art dans un contexte si large.

En outre, la plupart des systèmes sont actuellement conçus dans des buts très restreints. C'est le cas en vision par ordinateur par exemple lorsque l'on demande de "résoudre automatiquement le problème de la segmentation d'images". Le domaine des systèmes à base de connaissances peut largement contribuer à renouveler et étendre cette problématique par l'introduction de nouveaux paradigmes tels que "le paradigme du raisonnement" mais aussi d'autres paradigmes comme l'assistance à l'expert, l'acquisition de connaissances, l'explication.

Trois axes principaux seront ainsi abordés au long de la partie A : les systèmes informatiques à base de connaissances (chapitre I), ceux concernant la vision par ordinateur (chapitre II) et enfin ceux visant le domaine médical (chapitre III). Le premier chapitre met l'accent sur les aspects caractérisant les systèmes à base de connaissances de première et seconde génération. Le deuxième chapitre aborde essentiellement les systèmes de vision à base de connaissances, une distinction sera faite entre les systèmes d'analyse d'image et les systèmes de compréhension d'images selon qu'ils ont été conçus exclusivement pour assister les tâches de traitement d'image ou bien qu'ils mettent en œuvre des tâches de traitement d'image et des tâches d'interprétation.

Le troisième chapitre est consacré premièrement aux applications médicales des systèmes à base de connaissances. Les systèmes à base de connaissances pour l'imagerie microscopique seront enfin examinés plus en détail.

**Partie A**  
**Situation du problème**

**Chapitre I.** Etat de l'Art : Systèmes à base de  
Connaissances

**Chapitre II.** Etat de l'Art : Systèmes de Vision  
à base de Connaissances

**Chapitre III.** Etat de l'Art : Systèmes à base de  
Connaissances en Imagerie Médicale





*Etat de l'Art :*  
*Systèmes à base de Connaissances*

---

<b>Introduction</b> .....	9
<b>1. Systèmes de première génération</b> .....	10
1.1. Systèmes à base de règles de production.....	10
1.2. Représentations Centrées Objet (RCO) & Langages Orientés Objet (LOO).....	11
<b>2. Systèmes de seconde génération</b> .....	14
2.1. Modes de conception.....	15
2.2. Distribution des tâches et des compétences.....	15
2.2.1. Approches modulaires.....	16
2.2.2. Points de vue multiples.....	16
2.3. Modes et protocoles de communication .....	17
2.3.2. Communication par envoi de messages .....	18
2.3.3. Approches hybrides .....	19
2.4. Modes de coopération.....	19
2.4.1. Négociation.....	20
2.4.2. Échange de résultats intermédiaires.....	20
2.4.3. Approche organisationnelle.....	21
2.4.4. Planification locale.....	21
<b>Conclusion</b> .....	23



## *Etat de l'Art : Systèmes à base de Connaissances*

---

### **Introduction**

Pendant ces dernières décennies des efforts considérables ont été consacrés à la recherche et au développement de systèmes fondés sur des techniques d'intelligence artificielle. Divers domaines d'application sont visés tels que la médecine, la biotechnologie, la robotique, les mathématiques et la linguistique.

Un grand nombre de ces systèmes ont été conçus comme des systèmes à base de connaissances, c'est-à-dire des systèmes qui font une utilisation intensive de bases de connaissances dans un domaine spécifique d'application. Le concept de systèmes à base de connaissances a été introduit pour surmonter quelques-unes des limitations inhérentes aux premiers systèmes procéduraux lors de la résolution de problèmes complexes. Quelques-unes de ces limitations sont les suivantes :

- la difficulté de décrire et de manipuler un ensemble complexe des connaissances ;
- la difficulté de modéliser le raisonnement humain ;
- la difficulté d'adapter des solutions procédurales à des tâches nouvelles ;
- la limitation algorithmique des méthodes procédurales ;
- l'incapacité d'explicitier le contrôle.

Bien que les premiers systèmes à base de connaissances aient démontré leur capacité à pallier quelques-unes de ces difficultés, de nouvelles méthodologies ont émergé en conséquence de la croissance et de l'expansion accélérées des technologies informatiques. Par ailleurs, des difficultés ont surgi du fait de la nécessité de manipuler et maintenir de grandes bases de connaissances.

Les deux sections suivantes sont ainsi dédiées à la présentation des systèmes à base de connaissances appartenant à la “première génération” ou systèmes à schémas de raisonnement simples puis à ceux de la “seconde génération” ou systèmes à schémas de raisonnement multiples, parmi lesquels on peut distinguer les systèmes de type multi-agent. Enfin, l’accent sera mis sur quelques aspects concernant le paradigme du raisonnement. Il convient ici de préciser qu’une contribution approfondie à l’égard du raisonnement sera fournie dans la partie B consacrée à la modélisation des connaissances et du raisonnement.

Dans tous les cas, la présentation qui sera faite ici sur les systèmes à base de connaissances ne prétend pas être exhaustive mais orientée vers la mise en évidence de formes de représentation et de raisonnement que les différentes approches permettent.

## 1. Systèmes de première génération

La première génération de systèmes à base de connaissances est caractérisée par les aspects suivants :

- schémas de représentation de connaissances peu diversifiés ;
- schémas de raisonnement très simples ;
- domaines d’expertise restreints.

### 1.1. Systèmes à base de règles de production

Les règles de production ont été tout d’abord proposées par (Post 43) comme un mécanisme général de calcul : ce formalisme va dorénavant connaître divers développements successifs et sera appliqué à toutes sortes de problèmes. Une règle de production est une paire Prémisse-Conclusion {Pr => Cl}, où “Pr” représente un ensemble de conditions et “Cl” une ou plusieurs actions. Le fait que toutes les conditions dans la règle de production soient vérifiées permet l’exécution de la séquence d’actions attachées à la Conclusion “Cl”.

Tout système à base de règles de production comporte en général 3 composants principaux :

- mémoire de travail (MT) : c’est une structure qui modélise l’état actuel du système ;
- mémoire de production : ensemble de règles de la forme (condition MT --> changements MT) ;

- interpréteur de règles : partie du système consacrée à la sélection et l'application de règles de production sur la mémoire de travail.

Actuellement, un grand nombre de systèmes à base de connaissances utilisent ce formalisme de représentation. En effet, cette méthodologie fournit un cadre souple pour la structuration et la spécification d'amples corps de connaissances. Quelques exemples de systèmes à base de connaissances sont DENDRAL, conçu par (Feigenbaum 71) pour la formulation des analyses chimiques, MYCIN, développé par (Shortliffe 76) pour le diagnostic et le traitement des maladies infectieuses du sang et MOLGEN, conçu par (Stefik 81) et destiné au développement des expérimentations en génétique moléculaire.

Les systèmes à base de règles peuvent être un biais pour la conception de résolveurs de problèmes assistés par ordinateur mais aussi un biais pour l'explication de certains résultats en psychologie expérimentale. Quelques psychologues les utilisent pour la modélisation de la pensée humaine. Les systèmes à base de règles tels que ceux développés par (Waterman 70) et (Michalski 83) ont été utilisés pour étudier l'apprentissage et le comportement adaptatif. Une revue significative à cet égard peut être trouvée dans (Davis 85).

Bien qu'il soit très utilisé pour la résolution de problèmes très divers, le formalisme de règles de production ne fournit pas un cadre approprié pour décrire aisément les structures et relations de certains problèmes dans des domaines spécifiques. C'est la raison pour laquelle d'autres types de formalismes, ou même des structures hybrides pour la représentation des connaissances ont rapidement été proposés dans le domaine de l'intelligence artificielle.

## **1.2. Représentations Centrées Objet (RCO) &**

### **Langages Orientés Objet (LOO)**

Les Représentations Centrées Objet (RCO) fondées sur la notion de schéma ("*frame*") ont permis de répondre à certains besoins de représentation exprimés dans les domaines de l'intelligence artificielle et de la psychologie. La notion de schéma a tout d'abord été introduite par (Minsky 75), mais leur forme actuelle a beaucoup évolué depuis. Un schéma est une entité générique composée d'attributs qui décrivent les différentes propriétés du concept représenté. Un attribut est à son tour décrit par un certain nombre de facettes, possédant des valeurs. Les facettes expriment des modalités descriptives ou comportementales, représentant différents points de vue sur l'attribut ou encore des modalités d'accès à sa valeur, sous forme de réflexes.

Une diversité très riche de facettes peut être définie spécifiant des activités de types réflexes (aussi appelés démons) ou procédurales, définissant des valeurs courantes et par défaut, ou des contraintes type/valeur. Les schémas sont organisés en hiérarchie de classes et instances. Une classe définit une description prototypique de schémas partageant des propriétés et comportements similaires. Le mécanisme de base est l'instanciation, les valeurs des attributs sont obtenues par le biais de l'héritage, de l'attachement procédural ou par défaut.

Divers langages et systèmes à base de connaissances existant actuellement utilisent la notion de schéma, modifiée ou améliorée sous diverses formes, pour la représentation de connaissances. Parmi les langages de schémas citons FRL (Roberts 77) conçu au MIT par Goldstein et Roberts et se présentant comme une bibliothèque de fonctions MacLisp qui permettent de définir des schémas ainsi que de rechercher et de manipuler les informations qu'ils contiennent. Il convient de souligner sa puissance et sa simplicité de conception qui ont fait de lui un modèle, repris par beaucoup de langages de *frames* actuels (Masini 89). Le système interactif de gestion de base de connaissances SHIRKA (Aguirre 87), conçu par François Rechenmann à l'INRIA, est fondé sur l'utilisation de 2 types de schémas (pour la catégorisation de divers types d'objets) : le schéma de classe générateur d'un schéma d'instance, qui ne peut être instancié. En outre, 2 mécanismes d'inférence intégrés à SHIRKA, le filtrage et la classification, font de lui un langage bien adapté à la gestion de bases de connaissances structurées.

D'autre part, les Langages Orientés Objet (LOO) ont été conçus pour surmonter certaines difficultés du génie logiciel classique. Ces difficultés concernent les aspects suivants : la validation et la maintenance, la modularité, la protection et la réutilisation du logiciel. En opposition à l'approche de la programmation classique, les Langages Orientés Objet fournissent une approche de programmation fondée sur une entité unique : l'objet.

Le concept d'objet dans les LOO encapsule les données qui définissent sa structure et les méthodes permettant d'accéder à ses données. Les trois notions suivantes sont essentielles pour la compréhension du concept d'objet dans les langages à objets :

- l'envoi de messages et l'activation des méthodes ;
- les classes, les instances et les mécanismes d'instanciation ;
- la hiérarchie des classes et l'héritage de propriétés.

La manipulation d'objets est mise en œuvre par le biais de l'envoi de messages. Un message quelconque a pour but l'activation d'une des méthodes attachées à l'un des objets de la

hiérarchie d'objets. Si aucune des méthodes n'est activée une valeur par défaut est fournie en réponse. Un exemple très significatif des langages objet est Smalltalk, développé par (Goldberg 85). Une bonne introduction à l'égard des objets peut être trouvée dans (Roche 88).

Des différences importantes existent entre les Langages Orientés Objet et les Représentations Centrées Objet. Ces différences sont dues au fait que les LOO restent encore procéduraux dans le sens qu'ils mélangent connaissances et contrôle. Les RCO tendent au contraire à être déclaratives, c'est à dire qu'elles permettent d'exprimer la connaissance sans préjuger de ses modes d'utilisation (Cheval 90).

Les deux formalismes que l'on vient d'aborder ne constituent pas des choix mutuellement exclusifs par rapport à l'organisation et l'implantation des systèmes à base de connaissances. Un nombre considérable de systèmes à base de connaissances hybrides existant actuellement combinent les formalismes de représentation à base de règles de production avec les formalismes des représentations centrées objet.

Les systèmes à base de connaissances de première génération se sont avérés limités lors de la résolution de problèmes complexes. Quelques-unes de ces limitations sont les suivantes :

- schémas de représentation de connaissances peu diversifiés ;
- schémas de raisonnements très simples donc difficulté de modéliser adéquatement le raisonnement humain ;
- domaines d'expertise restreints ;
- difficulté pour la modélisation et la manipulation des connaissances incomplètes et incertaines ;
- acquisition malaisée des connaissances ;
- difficulté à produire des explications.

En vue de surmonter les limitations des systèmes à base de connaissances de première génération des nouvelles recherches dans le domaine de l'Intelligence Artificielle se sont engagées qui proposent des systèmes à base de connaissances hybrides combinant divers formalismes de représentation de connaissances voire proposant de nouvelles architectures logicielles. Ces systèmes constituent actuellement les systèmes dits de seconde génération.



## 2. Systèmes de seconde génération

Parmi les systèmes de seconde génération nous nous intéressons plus particulièrement aux systèmes de type multi-agent. Le paradigme multi-agent est issu des approches de l'intelligence artificielle distribuée et permet de pallier les limitations rencontrées lors de la résolution de problèmes complexes. Un environnement multi-agent peut être vu comme un univers d'entités autonomes qui travaillent ensemble de façon coordonnée pour la résolution d'un problème. À chacune de ces entités ou agents est attribué un rôle ou une tâche spécifique.

Diverses raisons, de nature pragmatique et/ou fondamentale justifient l'approche multi-agent (Haton 87).

### *raisons pragmatiques*

Certains type d'applications exhibent un caractère distribué intrinsèque, ainsi par exemple:

- une distribution géographique ou spatiale (gestion du trafic aérien ou tâches perceptuelles en vision par exemple) ;
- une distribution parmi plusieurs acteurs (problèmes de transport, environnements industriels multi-robot par exemple) ;
- une distribution fonctionnelle en diverses sous-tâches ;
- une distribution dans la représentation des connaissances et dans les méthodes de traitement requises par l'application.

Par ailleurs, la complexité d'un grand nombre de tâches peut être réduite par décomposition. Une solution distribuée en outre peut s'avérer très intéressante par rapport à des critères tels que : efficacité, précision et intégrité opérationnelles, modularité, facilité dans l'acquisition et mise à jour des connaissances manipulées.

### *raisons fondamentales*

Les systèmes multi-agents permettent d'envisager les développements suivants :

- représentation multi-modale des connaissances et intégration de divers formalismes de représentation ;
- schémas de raisonnement multiples ;
- résolution coopérative de problèmes ;
- utilisation simultanée de techniques diverses de l'intelligence artificielle : vision, planification, raisonnement multiple.

Nous présentons dans les sections suivantes quelques uns des axes de recherche essentiels, dans le domaine de l'Intelligence Artificielle Distribuée.

### **2.1. Modes de conception**

Deux grandes écoles coexistent pour la conception d'environnements multi-agents (Ferber 91). L'école "cognitive", d'ailleurs la plus représentée au sein de la communauté de l'Intelligence Artificielle Distribuée, trouve son origine dans la volonté de faire coopérer et communiquer des systèmes experts classiques. Selon cette école, les agents sont peu nombreux mais leur complexité élevée : chaque agent est une entité intelligente, généralement dotée d'intentionnalité. Ces entités peuvent en effet posséder des buts et des plans explicites pour accomplir ces buts.

En opposition, l'école "réactive" soutient qu'il n'est pas nécessaire que les agents soient intelligents individuellement pour que le système développe un comportement global intelligent. Un grand nombre d'agents est alors nécessaire pour envisager la résolution de problèmes complexes : chaque agent possède des capacités de réaction aux événements mais ne dispose d'aucun moyen d'analyse ou de planification de ses actions.

Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à la problématique des agents cognitifs plutôt qu'à celle des agents réactifs, ces derniers étant en effet dépourvus de capacités individuelles de raisonnement. Ainsi, les aspects concernant les environnements de résolution réactifs ne seront pas étudiés dans cette thèse. Un panorama très complet des activités menées en Intelligence Artificielle Distribuée sur le thème systèmes réactifs ou systèmes cognitifs peut être trouvée dans (Collinot 91). Certains des éléments qui suivent sont tirés de cette revue.

Les travaux sur les agents cognitifs ont contribué au développement des thèmes de recherche variés incluant la distribution des tâches et des compétences, l'étude des modes et protocoles de communication ainsi que celle des modes de coopération entre agents.

### **2.2. Distribution des tâches et de compétences**

En ce qui concerne la distribution des tâches et des compétences, deux approches peuvent être distinguées selon que les tâches sont distribuées de façon modulaire ou que l'expertise est décomposée selon des points de vue multiples ou concurrents.

### 2.2.1. Approches modulaires

Selon l'approche modulaire, un système est décomposé en un ensemble de modules : chaque module est conçu comme un système à base de connaissances possédant sa propre base de connaissances puis communiquant avec les autres modules afin d'effectuer la tâche qui lui est impartie. Ces modules ou spécialistes sont destinés à des tâches spécifiques (diagnostic, planification, gestion de ressources,...) ; ils exploitent la connaissance selon une perspective unique. De tels systèmes multi-agents contiennent généralement un petit nombre d'agents (une dizaine). Leur intérêt essentiel est de permettre une structuration claire et fonctionnelle de la connaissance.

### 2.2.2. Points de vue multiples

Ces systèmes sont essentiellement composés d'agents exploitant une base de connaissances dans laquelle le problème à résoudre est décrit selon plusieurs points de vue différents. Un système de diagnostic par exemple peut être composé d'agents conçus comme des spécialistes en connaissances de surface (c'est-à-dire des agents manipulant des connaissances empiriques et utilisant leurs expériences préalables pour traiter le problème en cours de résolution) (Marzouki 89) alors que d'autres agents seront conçus comme des spécialistes en connaissances profondes (c'est-à-dire des agents utilisant un modèle du raisonnement effectué par l'expert pour résoudre le problème).

Le système TROPES (Marino 90) a pour but la représentation et l'exploitation de connaissances multi-points de vue à l'aide de représentations par objets. Un système réalisé en coopération entre le LAFORIA et l'ORSTOM (Ferber 91) modélise les différents points de vue des spécialistes (halieuthes, ethnologues, biologistes, économistes,...) concernant un écosystème de pêche du Niger. Ces spécialistes interviennent, sous la forme de sources de connaissances, à différents niveaux de comportements des agents (pêcheurs, bancs de poissons, groupes sociaux, fleuve, ...).

D'autres types de systèmes impliquent la coopération d'agents capables de résoudre le même problème de façons totalement différentes. En outre, il n'est pas supposé que leurs modes de raisonnement convergent. Une manipulation permanente des conflits résultants doit être effectuée et l'on doit également contrôler que les agents communiquent entre eux de façon consistante. Ces systèmes "multi-experts" sont actuellement ceux qui présentent le plus d'inconvénients, particulièrement par rapport aux diverses incohérences produites.

Il est clair qu'une approche combinant les caractéristiques essentielles développées par ces différents systèmes est aussi possible. Un système multi-agent complexe pourrait par exemple être composé de divers sous-systèmes travaillant en concurrence, chacun d'eux étant, à son tour, conçu comme un système modulaire.

### 2.3. Modes et protocoles de communication

Deux types de systèmes multi-agents peuvent être distingués selon le mode de communication développé par leurs agents : les approches à base de tableau noir (mécanisme de communication implicite fondé sur le partage de ressources, c.f. fig. 1) et les approches fondées sur la communication par envoi de message (mécanisme explicite de communication). Enfin, ces deux approches peuvent aussi être combinées pour donner naissance à des systèmes hybrides.

#### 2.3.1. Communication par partage de ressources

Parmi les plus connus des systèmes de type tableau noir nous pouvons citer le système générique ATOME (Maître 88a). Cet environnement utilise des sources de connaissances de haut niveau pour contrôler hiérarchiquement les divers spécialistes dédiés à la résolution du problème. Une telle structure permet de décrire un problème complexe en termes de sous-tâches interactives. L'environnement de programmation Hearsay III (Erman 81) a été conçu pour utiliser deux niveaux de sources de connaissances : le premier niveau comprend des sources de connaissances dédiées à la résolution du problème, le second comprend des sources de connaissances dédiées au contrôle.

BB-1 (Hayes-Roth 85) est un autre générateur de systèmes multi-experts comprenant également deux tableaux noirs distincts. Ce système possède en outre, un planificateur de tâches assez sophistiqué lui conférant un contrôle de haut niveau flexible. Le système AGE (Nii 86) est fondé sur une méthodologie de conception similaire.

Une étude comparative de ces systèmes est proposée par (Maître 88b) ; celle-ci met l'accent sur l'intérêt des modes de distribution des connaissances et de supervision des tâches proposés par les approches de type tableau noir. Parmi les inconvénients majeurs de ces systèmes, citons l'accumulation d'informations inutiles dans le tableau noir, la fréquence élevée des accès en lecture/écriture effectués sur le tableau noir, enfin le caractère hiérarchique du contrôle, limitant l'autonomie individuelle des agents.

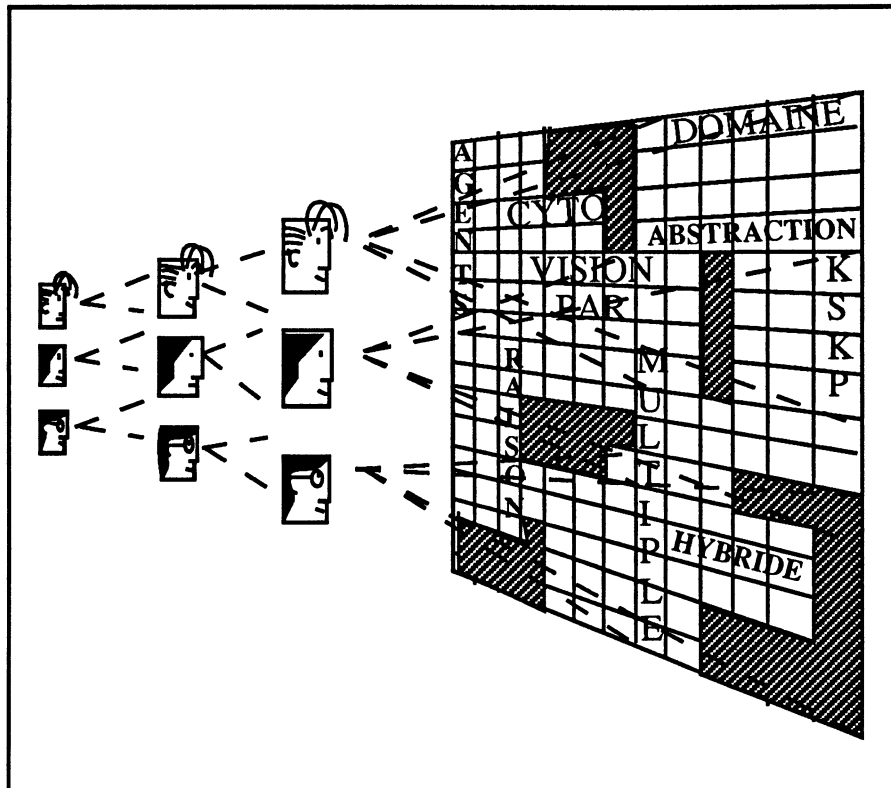


Figure 1 : Les spécialistes coopérants d'après le modèle du tableau noir.

### 2.3.2. Communication par envoi de messages

Certains systèmes multi-agents fondés sur un mode de communication par envoi de messages ont également atteint le stade opérationnel. Tel est le cas du système multi-agent développé au sein du groupe de **R. Brooks**, au MIT, dont chaque agent est un micro-robot (**Erceau 91**). L'objectif ici est la conception d'une société de micro-robots, visant des applications temps réel pour lesquelles les communications entre l'utilisateur et le système sont difficiles, voire impossibles, ou tout ou moins incompatibles avec la dynamique d'évolution du système. Tel est le cas des systèmes embarqués lors de missions sur Mars, pour la construction de certains types de stations orbitales et bien sûr des systèmes travaillant en milieu hostile ou contaminé.

L'environnement de Calcul Multi-Agent MACE (Gasser 87) est un générateur permettant la conception de systèmes multi-agents travaillant à différents niveaux de granularité. Les divers agents sont des unités de calcul qui travaillent en parallèle et possèdent outre des capacités de raisonnement, des facilités de représentation de connaissances incluant connaissances sur le monde ou modèles d'agents (de leurs buts, plans, rôles et capacités). Le générateur MACE a été utilisé pour la conception d'un système à base de règles s'exécutant en parallèle, chaque agent

encapsulant une règle de production. Il a été également utilisé pour la simulation de groupes d'agents utilisant des protocoles de négociation.

L'environnement de programmation MAPS (Garbay 89) est dédié à la conception de systèmes experts multi-agents. Plusieurs applications ont été développées, incluant le système KISS (Baujard 90) dédié à la segmentation d'images et le système KIDS (Ovalle 91a) dédié à l'interprétation d'images biomédicales. L'environnement MAPS ainsi que le système KIDS seront décrits dans la partie C de cette thèse.

### **2.3.3. Approches hybrides**

D'autres travaux de recherche tendent à combiner les deux approches précédentes. BLOBS est un environnement orienté objet dédié au raisonnement temporel (Zanconato 88). Il permet une extension du formalisme du tableau noir, par l'introduction de mécanismes d'envoi de message. Chaque agent est en effet capable de partager de l'information au travers de la structure du tableau noir en même temps qu'il possède ses propres données privées qu'il manipule de façon autonome. Le rajout de ces nouvelles capacités empêche l'accumulation de l'information inutile dans le tableau noir.

Dans le domaine de l'interprétation du signal, un système multi-agent a été conçu (Gong 87) qui distingue plusieurs niveaux conceptuels. Chaque niveau comprend un ensemble de sources de connaissances appelées "associations" qui communiquent au travers d'une structure commune de données. Chaque association possède en outre une structure de contrôle dédiée et peut proposer des hypothèses de résolution aux autres associations.

Ces travaux de façon générale, sont une tentative pour combiner l'efficacité du partage de l'information et de la supervision propres aux approches de type tableau noir avec la flexibilité et l'autonomie des approches de type envoi de messages.

### **2.4. Modes de coopération**

Il s'agit ici de citer quelques-unes des clés d'une coopération "réussie" entre agents : négociation, échange de résultats intermédiaires, organisation, planification. L'objectif de ces approches est d'améliorer le mode de travail des agents en termes :

- de validité et de rationalité des informations échangées et des comportements ;

- d'efficacité des stratégies de résolution employées (alternance entre comportement opportuniste et comportement dirigé par les buts, développement de plans concurrents, révision des stratégies) ;
- de suppression des efforts inutiles de synchronisation, l'un des points clés étant de préserver l'autonomie individuelle en même temps que la consistance globale ;
- de cohérence entre planification locale et globale (coordination entre plans locaux et globaux, choix d'un coordinateur d'activités) ;
- de rééquilibrage dynamique de la charge de travail (attribution des tâches au niveau local selon les disponibilités des agents et au niveau global selon un compromis entre nécessités de la résolution et charge effective du groupe d'agents).

### 2.4.1. Négociation

Dans les approches fondées sur le principe de coopération par négociation les agents établissent des contrats de travail entre eux afin d'attribuer les diverses tâches ou sous-tâches que le système multi-agent doit effectuer (Smith 80). L'intérêt d'une telle approche réside dans le caractère dynamique de l'allocation des tâches : celle-ci dépend des ressources et des capacités effectives des agents. Les contrats sont établis selon un protocole descendant et rigide de type "employeur-employé", tout employé pouvant à son tour devenir employeur.

Parmi d'autres inconvénients de cette approche, citons la possibilité de redondance entre tâches exécutées dans des contrats différents. Celle-ci peut survenir du fait que les agents manquent d'une vue globale des activités engagées par le groupe d'agents à un instant donné. Des risques de récursivité peuvent en outre apparaître si le processus d'allocation des tâches n'est pas bien coordonné. Ces risques surgissent du fait que les agents peuvent adopter des rôles différents pour des contrats différents.

Le groupe de L.Gasser, à l'Université du Massachussets à Amherst, est penché actuellement sur les systèmes de négociation appliqués à la reconnaissance de la parole (Gasser 88).

### 2.4.2. Échange de résultats intermédiaires

Dans les approches fondées sur l'échange de résultats intermédiaires (Lesser 81), il est tenu compte du fait que les divers agents peuvent produire des résultats incomplets, incorrects ou inconsistants. Pour faire face à ce genre de situation, il est proposé que les agents échangent périodiquement des résultats partiels ou des hypothèses de façon à ce que chacun d'entre eux soit averti des contextes de traitements des autres.

En opposition aux approches de coopération par négociation, ces approches suivent une démarche ascendante qui implique que les agents possèdent plus d'autonomie dans la prise de décisions.

Par souci d'efficacité, il conviendrait d'associer à ces approches des mécanismes de planification ou d'allocation des tâches.

### **2.4.3. Approche organisationnelle**

Selon l'approche organisationnelle (Fox 81), une organisation est tout d'abord établie entre un groupe d'agents qui définit préalablement, selon la tâche à accomplir, les rôles attribués aux agents ainsi que leurs relations. Une réduction significative des communications entre agents peut ainsi être atteinte, en même temps qu'une augmentation dans la cohérence des efforts de résolution.

Chaque agent possède ici une vue de haut niveau de son rôle, de ceux des autres et des divers types de relations pouvant exister entre les membres du groupe.

Un des inconvénients majeurs de ces approches est le manque de planification dynamique.

### **2.4.4. Planification locale**

Dans les approches fondées sur la planification locale (Durfee 88), deux niveaux de résolution peuvent être distingués : le niveau agent et le niveau groupe d'agents. Trois types de plans sont utilisés ici pour coordonner la coopération entre agents :

- le plan local est le plan généré et suivi localement par un agent individuel. Il contient l'objectif du plan, une liste ordonnée des étapes principales, la durée attendue pour chaque étape et le détail des actions qui ont déjà eu lieu ou qui auront lieu ultérieurement ;
- le plan synthétique est une représentation synthétique du plan local, transmise au sein du groupe d'agents à des fins de coordination. Il contient l'objectif du plan, une liste ordonnée des étapes principales et leur durée attendue. Les détails des actions effectuées à court terme ne sont pas représentés ici ;
- le plan global partiel représente la stratégie adoptée par le groupe pour atteindre un but global. Il contient des informations sur le but global, les étapes principales vers



ce but ainsi que les moyens utilisés pour intégrer les solutions partielles générées par les différents agents.

Chaque agent dispose ainsi d'une vue globale des efforts de résolution engagés par le système, ce qui est un moyen de pallier les inconvénients de la rationalité limitée (fait qu'un agent n'ait qu'une vue partielle de la réalité extérieure).

Chacune des approches précédentes apporte un point de vue intéressant mais partiel. Il est clair que des approches hybrides combinant des aspects représentatifs de chacune d'entre elles peuvent être aussi proposées et se révéler plus efficaces.

## Conclusion

Bien que les systèmes à base de connaissances de première et de seconde génération aient essayé de surmonter quelques-unes de limitations rencontrées lors de la résolution de problèmes complexes par des approches classiques, il reste encore beaucoup à faire. Parmi les difficultés à surmonter, quelques-unes concernent la modélisation du raisonnement humain, d'autres concernent la conception de systèmes réellement efficaces et utilisables, ce qui implique une recherche approfondie dans des domaines comme l'ergonomie cognitive.

Un intérêt particulier est actuellement porté à la conception de schémas de raisonnement puissants, souples mais surtout très proches du raisonnement humain, capables de modéliser les aspects incertains, imprécis, quelques fois contradictoires, spatiaux et temporels de la connaissance.

Il convient à cet égard de souligner l'intérêt qui est actuellement porté au développement de la connaissance, à ses représentations mentales et modes d'utilisation ; cet intérêt est soutenu d'ailleurs par l'essor actuel des sciences cognitives. En effet, la connaissance est étudiée sous ses diverses formes et prise en compte selon un point de vue dynamique plutôt que d'un point de vue statique ou comme "base de données". Ainsi une compréhension approfondie de la connaissance humaine pourra être obtenue par l'utilisation des approches cognitives.

Le domaine de l'ergonomie cognitive commence à jouer un rôle important dans l'étude des représentations mentales et/ou verbales des images, des concepts et des actions : ce courant de recherche est fondamental pour la conception d'interfaces homme-machine adaptées et souples. Il s'agit en effet de doter un système de la capacité à éliciter des nouveaux éléments de connaissance, à modifier un plan d'actions ou un schéma de raisonnement, ou la capacité à requérir des explications plus ou moins détaillées sur le comportement du système.

Parmi les différentes approches, l'approche multi-agent s'avère un outil technologique de haut niveau bien adapté à la résolution des applications complexes car elle permet une représentation de la connaissance multi-modale, la manipulation de schémas de raisonnement multi-formes, ainsi qu'une résolution coopérative des problèmes.



## Chapitre II

---

### *Etat de l'Art :* *Systèmes de Vision à base de Connaissances*

---

<b>Introduction</b> .....	27
<b>1. Systèmes fondés sur une analyse détaillée des algorithmes</b> .	29
<b>2. Systèmes de supervision des programmes</b> .....	30
2.1. Systèmes de consultation.....	31
2.2. Systèmes de création de programmes à partir de bibliothèques .....	31
2.3. Systèmes d'intégration sémantique de programmes .....	32
<b>3. Systèmes de compréhension à base de connaissances</b> .....	33
3.1. Systèmes séparés.....	33
3.2. Systèmes hybrides.....	35
<b>Conclusion</b> .....	39



# *Etat de l'Art :* *Systemes de Vision à base de Connaissances*

---

### **Introduction**

Les systèmes à base de connaissances pour le traitement d'images ont été conçus pour surmonter quelques-unes des difficultés rencontrées dans ce domaine, concernant entre autres les aspects suivants : la validation de la qualité de l'image, la sélection des opérateurs appropriés et de leurs paramètres optimaux d'exécution, le choix d'une planification efficace, la nécessité d'ajuster soigneusement ces éléments par le biais d'expériences d'essai-erreur fastidieuses et enfin, le manque total d'outils objectifs d'évaluation des résultats obtenus.

Une "expertise" réelle est impliquée ici (Gallesio 86, Woods 87) qui comprend différents types de connaissances sur les opérateurs, leur applicabilité, utilisabilité et modes de séquençement, mais aussi de la connaissance sur la scène et le domaine d'application considéré. Un tel "expert" doit en outre, posséder la capacité de juger les résultats obtenus et alors être capable de moduler ou même de reprendre de façon appropriée la stratégie d'analyse en cours.

Deux tâches essentielles peuvent être identifiées dans les systèmes de Vision par Ordinateur : la tâche de segmentation et la tâche d'interprétation. La segmentation consiste à identifier et délimiter les zones intéressantes, c'est-à-dire les zones susceptibles d'être utilisées par la tâche d'interprétation. Alors que la segmentation a pour objet la recherche d'une correspondance spatiale entre primitives de l'image et constituants de la scène, l'interprétation a pour objet la recherche d'une correspondance sémantique entre primitives et labels symboliques. La recherche de la meilleure correspondance est le défi principal pour chacune de ces deux tâches.

Une partie non négligeable des difficultés rencontrées en Vision par Ordinateur concerne le paradigme du raisonnement. Ces difficultés peuvent être résumées essentiellement par les trois aspects suivants :

- la difficulté de modéliser une démarche experte d'analyse par opposition à la recherche d'une séquence optimale de traitement ;
- le manque de capacité des systèmes de vision à juger les résultats obtenus et donc à évaluer l'application d'un opérateur ou d'une séquence de traitement sur l'image ;
- la difficulté de reprendre de façon appropriée la stratégie d'analyse en cours.

En outre, d'autres aspects liés aux domaines de la communication homme-machine et de l'ergonomie cognitive sont dans la plus part des cas négligés. L'intérêt de ces aspects réside dans l'intégration de l'utilisateur dans le processus de raisonnement du système en tant qu'agent externe. Le rôle joué par cet "agent externe" est d'intervenir dans des cas précis tels que le déblocage d'une situation d'impasse, la confirmation d'une décision prise par le système, la requête des explications ou la génération et la confirmation des hypothèses.

D'autre part, il s'agit de fournir à l'utilisateur des facilités de planification et de génération automatique de séquences optimales de traitement, aussi bien que des facilités de description de problèmes et de formulation de requêtes complexes.

Les approches à base de connaissances ont été introduites en vision pour permettre la représentation et la manipulation explicite des diverses connaissances disponibles, qu'il s'agisse de connaissances sur le contenu de la scène, sur les propriétés des opérateurs à appliquer ou sur les stratégies d'exploration à utiliser.

Une nouvelle "génération" de Systèmes de Vision par Ordinateur a ainsi rapidement émergé qui par l'utilisation de descriptions détaillées et de connaissances a priori peut permettre de développer une analyse robuste et adéquate. Des techniques issues de l'Intelligence Artificielle sont utilisées pour obtenir de meilleurs résultats, qui incluent des représentation à base de schéma ou l'architecture avancée des systèmes à tableau noir.

Nous présentons tout d'abord les systèmes à base de connaissance qui ont été conçu pour assister les tâches de traitement d'image et ensuite les systèmes dédiés à la compréhension de l'image, systèmes mettant en œuvre de façon simultanée des tâches de traitement d'image et des tâches d'interprétation.

Cette présentation ne prétend pas être exhaustive : elle est plutôt orientée vers la mise en évidence des difficultés majeures rencontrées lors de la conception des systèmes de vision. La

classification des systèmes d'analyse d'images à base de connaissances suivante est inspirée de (Matsuyama 88) et (Clément 91).

## **1. Systèmes fondés sur une analyse détaillée des algorithmes**

La caractéristique essentielle de ces systèmes est d'exprimer en détail la façon selon laquelle les algorithmes impliqués dans le traitement travaillent, et de décrire explicitement les mécanismes internes de ces algorithmes.

Des systèmes de vision conçus dans cette optique sont par exemple les systèmes de segmentation d'images à base de règles de production et les systèmes de segmentation d'images guidés par les buts qui seront abordés par la suite.

### *Systèmes de Segmentation d'Images à base de Règles de Production*

Un grand nombre de systèmes de vision par ordinateur utilise le formalisme des règles de production pour représenter les opérateurs et coder les heuristiques intervenant dans la tâche de segmentation d'images. Le système expert de segmentation développé par Nazif (Nazif 84) illustre notamment cette approche.

Deux types de mémoires composent essentiellement ce système : une mémoire à "court-terme" dont le rôle est de stocker des données et des résultats intermédiaires et une mémoire à "long-terme" utilisée pour stocker des procédés bas-niveau représentés sous la forme des règles de production.

Une première initialisation est toute d'abord réalisée dont l'objectif est de segmenter l'image en régions et en lignes. Les deux ensembles obtenus par ce procédé sont stockés au sein de la mémoire à court-terme ainsi que des paramètres comme l'adjacence ou le niveau de gris. En outre, ce système exploite la notion de zones d'intérêt (ensemble de lignes et régions) qui constitue le troisième ensemble stocké en mémoire. Une diversité de règles d'action sont destinées ici aux tâches de fusion et décomposition des éléments de l'image.

L'activation des règles est effectuée selon des stratégies particulières qui sont stockées au sein de la mémoire à long-terme et codées sous forme de règles de contrôle. Le but des règles de contrôle est de focaliser l'attention du système sur un élément ou ensemble d'éléments de l'image. En outre, des règles spécifiques appelées "méta-règles" sont utilisées par ce système, dont le rôle est de superviser l'exécution du système. Ces méta-règles sont ainsi utilisées pour



décider un arrêt dans l'exécution du système ou pour mettre en correspondance un ensemble de règles d'action et un élément obtenu pendant l'analyse de l'image.

Les expériences montrées précédemment illustrent la difficulté de manipuler des systèmes utilisant le formalisme des règles de production et pourvus des larges bases de connaissances. Des stratégies efficaces doivent être conçues qui utilisent les seules connaissances nécessaires à la résolution du problème, à un instant donné (contrôle dynamique). Notons également que le mécanisme de zones d'intérêt introduit par ce système permet l'utilisation des connaissances les plus significatives alors que les règles de contrôle déclenchent à un moment donné les règles d'action, les plus adéquates.

### *Systèmes de Segmentation d'Images guidés par les buts*

Des tels algorithmes utilisent un réseau décrivant la composition de l'image pour guider le processus de segmentation, étant donné un but défini préalablement par l'utilisateur. Les nœuds dans le réseau représentent un résultat ou une donnée tandis que les arcs représentent les transformations qui devront être réalisées pour passer d'un nœud à l'autre. Une spécification des buts est fournie au système qui développe une stratégie descendante pour chercher les procédures de traitement, opérateurs et paramètres qui seront appliqués sur l'image pour accomplir le but. L'ensemble des règles de contrôle est enfin activé si de multiples séquences de traitement ont été générées afin de choisir la meilleure. Le système SIGMA (Matsuyama 85) est particulièrement représentatif de ce type d'approches.

## **2. Systèmes de supervision de programmes**

Les systèmes de supervision de programmes ont pour caractéristique de disposer des connaissances nécessaires pour la sélection et l'utilisation des programmes de traitement d'images, considérés comme des boîtes noires. La fonctionnalité et le contexte d'application de tels programmes sont ici exprimés explicitement.

Nous présentons tout d'abord les systèmes de consultation et ensuite les systèmes de création de programmes à partir de bibliothèques. Enfin, nous abordons les systèmes d'intégration sémantique de programmes.

### **2.1. Systèmes de consultation**

Les systèmes de consultation ont été conçus pour assister et guider l'utilisateur dans la résolution de problèmes d'imagerie. En début de session, l'utilisateur doit spécifier le but du traitement à effectuer (amélioration du contraste ou segmentation par exemple) ainsi que des descripteurs approximatifs de l'image (nombre de niveaux de gris par exemple). Un plan global est ensuite généré et appliqué pas à pas, de façon que l'utilisateur puisse valider chaque étape du traitement. Selon le résultat de cette évaluation, le système prendra la décision de modifier le plan en cours ou de procéder à un retour en arrière pour essayer un nouveau plan.

L'architecture spécifique et les aspects bas niveaux de tels systèmes sont souvent cachés à l'utilisateur de façon à ce qu'il soit uniquement concerné par le traitement d'image à un niveau logique.

Le système EXPLAIN (Tanaka 88) est un système de consultation à base de règles de production contrôlant la recherche de la séquence de commandes la plus appropriée pour résoudre le problème concret spécifié par utilisateur. Ce système utilise notamment la connaissance présente dans le manuel d'utilisation pour guider et assister l'utilisateur dans cette recherche.

### **2.2. Systèmes de création de programmes à partir de bibliothèques**

Les systèmes de création de programmes à partir de bibliothèques ont été conçus comme des systèmes de programmation automatiques qui composent des programmes complexes en chaînant des routines stockées au sein d'une bibliothèque selon une spécification "abstraite" fournie par l'utilisateur. Le problème plus critique concerne les facilités données à l'utilisateur pour décrire ce pseudo-programme. Quelques méthodologies de spécification des pseudo-programmes ont été proposées parmi lesquelles :

- Spécification interactive: cette méthodologie suit un procédé similaire à celui utilisé par les systèmes de consultation qui ont été décrits précédemment. Cela implique que tous les processus de raisonnement sont interactivement guidés par l'utilisateur ;
- Spécification au moyen de commandes abstraites : cette méthodologie consiste à générer des programmes exécutables à partir des commandes abstraites données par l'utilisateur. Le système doit simplement trouver les arguments les plus adéquats, pour chaque opérateur de traitement. En outre, s'il s'avère nécessaire de compléter

l'information, l'utilisateur sera questionné de façon interactive. Un programme exécutable est alors généré, qui est composé d'une part par la déclaration des données et d'autre part, par la séquence d'opérations de traitement d'image qui sera exécutée.

- Spécification par l'exemple, l'objectif est ici spécifié par une figure type. Le système possède alors la capacité de composer un programme (les meilleurs opérateurs avec les paramètres optimaux) de façon à ce que l'image en entrée soit transformée pour obtenir la figure type. Il convient de souligner que cette méthodologie de spécification s'avère naturelle et facile d'emploi pour l'utilisateur et que le fait d'utiliser une figure type aide effectivement à déterminer les paramètres optimaux.

Sakaue et Tamura (Sakaue 85) ont proposés un système de génération automatique des programmes utilisant SPIDER (Tamura 83) : un programme complet écrit en Fortran est généré par le biais d'une séquence de commandes fournie par l'utilisateur. Un autre approche a été proposé par (Woods 89), sous la forme d'un environnement pour l'interprétation d'images implanté comme un système de vision par ordinateur capable d'exécuter une séquence de tâches décrites de façon déclarative. Ce système a été appliqué essentiellement à des tâches d'inspection industrielle et sa performance a été comparée notamment à celle d'un programme procédural écrit spécifiquement pour des tâches similaires. Les résultats montrent que le système est capable d'atteindre le même niveau d'efficacité mais qu'en revanche il peut adapter de manière souple ses stratégies.

### 2.3. Systèmes d'intégration sémantique de programmes

L'objectif de l'intégration sémantique de programmes (Clément 91) est de piloter des algorithmes de traitement d'images utilisés par des applications concrètes. Le développement des applications peut être facilité ainsi car certaines tâches deviennent automatisées (la sélection des meilleurs programmes pour atteindre un but ou l'initialisation des paramètres, par exemple). De plus, si la connaissance d'intégration sémantique est suffisamment développée, ces systèmes pourront être utilisés par des utilisateurs non-experts (tels qu'astronomes, biologistes...). Enfin, une intégration sémantique peut être mise en œuvre au sein des systèmes autonomes travaillant dans des environnements variables et complexes tels que des robots mobiles ou des bras mécaniques flexibles.

Le système OCAPI (Clément 89) est un exemple de systèmes permettant l'intégration sémantique de programmes. Il a été conçu et implanté à l'INRIA à Sophia Antipolis et son but est de permettre le développement de systèmes de vision où une intégration sémantique de

programmes de traitement d'images est possible. Divers concepts ont été empruntés ici des techniques de systèmes experts tels la représentation explicite sous forme d'objets des programmes de bibliothèques de traitement d'images, la représentation explicite sous forme d'objets des séquences de traitement d'images ou la représentation sous forme d'objets des règles de production spécialisées. Ces dernières permettent le choix entre les divers algorithmes ou traitements, l'initialisation des valeurs de paramètres, l'évaluation des résultats obtenus (que ce soit après exécution d'un programme de la bibliothèque ou à un plus haut niveau d'abstraction), et la manière d'ajuster les valeurs des paramètres en cas de résultats jugés non satisfaisants. Il convient de signaler que les systèmes conçus à partir d'OCAPI peuvent être soit entièrement automatiques et donc autonomes ou bien assistés par utilisateur dans le but de permettre un développement incrémental d'applications.

### **3. Systèmes de compréhension à base de connaissances**

L'objectif du processus de compréhension d'images est de proposer une interprétation de la scène à partir d'une ou plusieurs images de cette scène. Trois étapes sont traditionnellement distinguées : l'étape de segmentation, l'étape d'extraction de paramètres et enfin l'étape d'interprétation. De la connaissance telle que la connaissance a priori ou les hypothèses sur l'apparence de la scène et de ses constituants jouent aussi un rôle important dans la compréhension d'images (Suetens 87).

Deux types de systèmes de compréhension d'images peuvent être distingués selon les choix architecturaux ou fonctionnels adoptés pour l'implantation des tâches de segmentation et d'interprétation. Les systèmes dont les tâches de segmentation et d'interprétation sont implantées de façon séparée fournissent des architectures séparées où les modules de segmentation et d'interprétation coexistent et sont entièrement différenciés (c.f. fig. 2). Les systèmes dits "hybrides" au contraire résultent d'une conception hybride caractérisée par une coopération bien équilibrée entre les tâches de segmentation et interprétation.

#### **3.1. Systèmes séparés**

Parmi les systèmes séparés les plus connus, citons :

- ACRONYM (Brooks 83) : ce système à base de connaissances est l'un des premiers et des plus connus des systèmes de vision, visant une applicabilité assez générale. Il est capable d'interpréter des images 3D indépendamment du point de vue

grâce aux modèles d'objets 3D utilisés. Des contraintes (graphe de restriction) sont générées à partir de l'analyse de données, et en conséquence, les instances des modèles sont prédites et recherchées dans l'image par la mise en correspondance entre prédiction et graphes d'objets. Ce système utilise un formalisme mixte combinant des règles de production et des schémas. En ce qui concerne le contrôle, le plus grand inconvénient concerne le manque des stratégies de "retour en arrière" entre le niveau d'interprétation et celui de l'analyse numérique de l'image, auquel se rajoute une description structurée insuffisante des actions de contrôle et des résultats d'interprétation, progressivement obtenus. Actuellement, les améliorations entreprises pour faire face aux limitations du système ACRONYM ont données suite à un nouveau système de vision à base de modèles appelé SUCCESSOR. Ce système conserve les fondements propres des modules d'ACRONYM en ce qui concerne la modélisation, la prédiction et l'interprétation, dont les performances sont améliorées de façon significative.

- Système à base de connaissances pour la reconnaissance de photographies aériennes complexes (Nagao 80) : ce système, utilisant le formalisme du tableau noir, accomplit avec succès la tâche de reconnaissance de photographies aériennes complexes. Après une série d'étapes de traitements d'images classiques (filtrage, segmentation et paramétrisation), le module de haut niveau effectue la reconnaissance d'objets en attachant à chaque région un objet issu d'un ensemble pré-défini : ceci est effectué par l'activation de sous systèmes concurrents de détection d'objectifs (ODS). Les règles de production sont utilisées ici pour représenter la connaissance procédurale ; le problème de la reconnaissance est résolu par un mécanisme d'inférence général qui sélectionne le sous-système d'ODS activé en fonction de l'état du traitement, reflété au sein du tableau noir.
- CLASSIC (Thonnat 88) : la philosophie de ce système, dédié à des tâches d'interprétation, repose principalement sur deux concepts clés. Le premier est l'utilisation simultanée d'objets structurés, les prototypes, contenant la connaissance descriptive des objets à classer, et des règles de production décrivant une connaissance heuristique. Deuxièmement, l'utilisation d'un mécanisme de comparaison floue dérivant de la théorie des possibilités et des ensembles flous, permettant la manipulation de données bruitées, incomplètes ou imprécises.

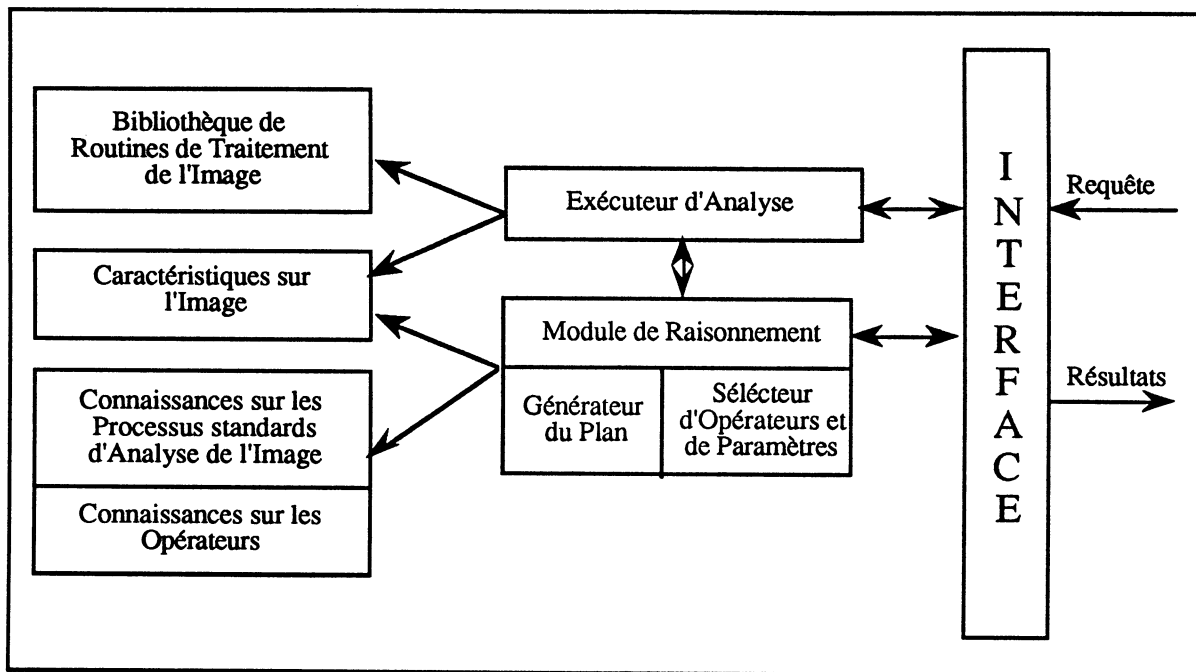


Figure 2 : Architecture générale des systèmes séparés pour la compréhension d'images.

Dans cette approche les indices visuels fournis par la tâche d'interprétation sont rarement utilisés pour améliorer ou bien pour diriger la tâche de segmentation. Il est souvent affirmé à cet égard que la tâche d'interprétation d'images doit être suffisamment puissante pour réussir même si la tâche de segmentation d'images préalable s'est avérée inefficace. Les approches suivantes démontrent par opposition la nécessité d'une interaction assez étroite entre les tâches de segmentation et d'interprétation d'images.

### 3.2. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides peuvent être caractérisés par une coopération étroite entre les tâches de segmentation et d'interprétation. Cette coopération implique l'exploitation simultanée de critères d'analyse et de connaissances de haut niveau. Une description détaillée de ces systèmes peut être trouvée dans (Porquet 86 et Lux 85) ; leurs aspects les plus significatifs sont les suivants :

- certains systèmes hybrides, dans le domaine de la robotique en particulier, suivent une stratégie de prédiction/vérification; dans ce cas, les hypothèses d'interprétation fournissent les contraintes nécessaires au processus de segmentation ;
- divers systèmes hybrides introduisent la notion de "zone d'intérêt" à partir de laquelle le processus d'interprétation est activé ; quelques-unes des règles de segmentation

- (fusion, décomposition par exemple) peuvent être ré-appliquées en cas de défaillance, laquelle est détectée par le niveau d'interprétation ;
- d'autres systèmes hybrides utilisent les procédures classiques pour produire une segmentation initiale de l'image. Cette segmentation peut être raffinée par l'appel de règles "intermédiaires" de segmentation (Kohl 87) ; ces règles particulières sont utilisées par la tâche de segmentation pour revenir en arrière sur des zones étiquetées de façon ambiguë par la tâche d'interprétation. Dans ce cas une connaissance de haut niveau issue du processus d'interprétation, est utilisée par le segmenteur ;
  - la problématique de la reconnaissance de cibles, est un exemple concret où l'efficacité des systèmes hybrides se voit clairement exprimée. Une segmentation particulièrement adéquate est exigée tout d'abord pour laquelle une utilisation intensive des mécanismes de retour en arrière est nécessaire : une rétro-propagation de l'information est continuellement utilisée pour assister la tâche de segmentation, d'une image à l'autre de la séquence d'images en cours d'étude. Ces systèmes utilisent divers types de connaissances sur le contenu de l'image mais aussi sur les techniques d'analyse d'images (Venable 85).

Parmi les systèmes hybrides les plus connus, citons les suivants :

- SIGMA (Matsuyama 85) : ce système est composé de trois "experts" dédiés respectivement au raisonnement géométrique (GRE), à la sélection de modèles (MSE) et à la vision de bas niveau (LLVE). L'intérêt de cette approche réside dans l'intégration des deux types d'analyses ascendante et descendante : à partir des résultats de l'analyse descendante, les experts GRE et MSE génèrent des hypothèses sur la présence et la position des objets dans la scène. En conséquence, une requête est envoyée à l'expert LLVE qui recherche, sous certaines contraintes, des instances possibles des objets impliqués au sein des hypothèses en cours de vérification. Il est important de souligner que la capacité du système pour détecter des objets peu contrastés ou bruités s'est montrée par ce biais remarquablement améliorée. En ce qui concerne la description des modèles d'objets, ils ont été représentés par des schémas alors que la connaissance procédurale est décrite sous forme de règles de production;
- SCHEMA (Hanson 87) : ce système à base de tableau noir est dédié à la reconnaissance de scènes d'extérieurs. Il convient de signaler que ce tableau noir est une extension du système VISIONS. Le but est la conception d'un système de vision

général combinant des systèmes de vision dédiés. En ce qui concerne la représentation de connaissances, les formalismes de règles de production et des schémas ont été utilisés. Chaque source de connaissance contient des descriptions et des stratégies pour la recherche d'un objet particulier ou d'un sous-ensemble plutôt qu'une description structurée des traitements à effectuer ;

- **MESSIE (Garnesson 89)** : ce système utilisant aussi le formalisme de tableau noir est dédié à l'analyse de scènes d'extérieurs, telles des images aériennes. Les sources de connaissances sont spécialisées ici dans des types d'objets ou de formes tels que routes, bâtiments et ombres. Le contrôle dans ce système est chargé de la gestion des conflits entre sources, de la correction des erreurs de segmentation et de la vérification des conditions d'arrêt.
- **KISS (Baujard 91)** : ce système dédié à la segmentation d'images a été conçu à partir du générateur multi-agents MAPS (cf. chapitre I). L'architecture du système KISS est constituée d'agents KS (serveurs de connaissances) qui expriment les 4 niveaux fondamentaux de représentation suivants : sensoriel, primitif, géométrique et sémantique. Ces agents KS sont connectés en un réseau par l'intermédiaire d'agents KP (processeurs de connaissances) correspondant aux 3 phases d'analyse d'image suivants : détection, interprétation géométrique et relationnelle, et interprétation sémantique.

Les systèmes de vision "classiques" ont été rapidement commercialisés, et permettent un accès facile non seulement aux bibliothèques de traitement d'images mais aussi aux outils de reconnaissance des formes. Les performances des systèmes de vision restent encore à améliorer avant d'atteindre une réelle diffusion. Les recherches actuelles visent essentiellement l'amélioration des algorithmes, l'amélioration des performances technologiques, et l'amélioration dans la représentation et la manipulation des connaissances.





## Conclusion

Bien que la technologie des systèmes à base de connaissances puisse contribuer au développement de systèmes complexes de traitement et de compréhension des images, elle n'a été utilisée que dans une certaine mesure. Des efforts ont été concentrés sur la recherche des formes utiles de représentation de l'expertise, qu'il s'agisse de l'expertise propre au domaine d'application, de connaissances de sens commun ou de connaissances sur le traitement de l'image. Cette phase correspond précisément à la phase préliminaire dans la conception d'un système à base de connaissances (Suetens 87).

Dans tous les cas, il convient de souligner que les difficultés majeures des systèmes de vision conçus actuellement sont issues des problèmes d'intégration des outils de traitement existants et de l'interaction "homme-machine". En effet, il s'avère nécessaire tout d'abord de disposer d'une approche logicielle solide qui permette l'intégration d'outils informatiques de nature très diverse, intégration indispensable pour la conception de systèmes de vision. En effet, ces systèmes doivent exploiter des bibliothèques de traitements d'images impliquant des opérateurs et des méthodes de traitement très variés (depuis les opérateurs de détection jusqu'aux méthodes de mise en correspondance ou d'inférence) manipulant des éléments très divers (images ou symboles, par exemple). Ils doivent également intégrer des stratégies de résolution adaptées et des mécanismes de contrôle pour superviser leur exécution.

Deuxièmement, il conviendrait de replacer la problématique de la vision par ordinateur dans le contexte de la vision "assistée par ordinateur", accordant ainsi plus d'importance aux aspects liés à la communication homme-machine et à l'ergonomie cognitive en général, où la conception centrée-utilisateur devrait prévaloir sur la conception centrée-technologie.

D'autres domaines tels que les domaines de l'élicitation, de l'acquisition et de la ratification de connaissances, ainsi que le domaine complet de l'ergonomie cognitive restent, en effet, plus ou moins négligés. La sémantique des règles, par exemple, reste encore assez limitée et il est très difficile de décrire verbalement la qualité d'une image, la forme d'un composant ou les relations spatiales entre objets, de même qu'il reste encore très difficile de représenter, de manipuler, de contrôler et d'évaluer l'application des opérateurs de base sur les images.

En résumé, lors de la conception d'un système de vision l'accent serait mis non pas seulement sur les critères d'efficacité et de coût, mais également sur le développement d'une approche logicielle robuste et solide respectant les besoins effectifs de l'utilisateur et les contraintes spécifiques d'une application. Une problématique majeure se dégage ainsi, c'est celle que nous nous efforcerons d'étudier tout au long de cette thèse.



## Chapitre III

---

### *Etat de l'Art :* *Systèmes à base de Connaissances en Imagerie Médicale*

---

<b>Introduction</b> .....	43
<b>1. Systèmes à base de connaissances en Médecine</b> .....	44
1.1. Systèmes d'Assistance .....	44
1.1.1. Assistance médicale d'urgence.....	44
1.1.2. Assistance à l'élaboration des examens complémentaires.....	44
1.1.3. Assistance à l'élaboration des essais cliniques et pharmacologie.....	44
1.2. Systèmes de consultation.....	45
1.3. Systèmes de formation .....	45
<b>2. Interprétation d'images microscopiques</b> .....	46
2.1. Problématique de la cytopathologie .....	46
2.1.1. La cytopathologie dans la pratique médicale.....	46
2.1.2. Problématique de l'inspection du spécimen.....	47
2.2. Systèmes d'assistance en microscopie.....	50
2.2.1. La quantification .....	50
2.2.2. Systèmes experts utilisant des connaissances de référence .....	50
2.2.3. Systèmes experts d'aide au diagnostic .....	51
2.3. Progrès récents et perspectives.....	53
<b>Conclusion</b> .....	55



# *Etat de l'Art :* *Systèmes à base de Connaissances en Imagerie Médicale*

---

### **Introduction**

La technologie des systèmes à base de connaissances a été largement appliquée au domaine médical, en particulier pour l'aide au diagnostic. Ce champ d'investigation a d'ailleurs contribué à l'expansion de thèmes fondamentaux tels l'ingénierie de la connaissance, l'ergonomie cognitive ou la modélisation du raisonnement. Les premiers systèmes à base de connaissances, considérés comme des "prototypes historiques", sont le système MYCIN (Shortliffe 73), système à base de règles de production pour le diagnostic d'infections bactériennes et CASNET (Kulinowsky 77), système à base de réseaux sémantiques pour le traitement des glaucomes. Ces premiers systèmes experts d'aide à la décision médicale ou systèmes d'assistance médicale peuvent être déjà classés en deux catégories selon qu'ils ont une vocation diagnostique (MYCIN, INTERNIST,...) ou thérapeutique (CASNET, SPHINX,...).

Par ailleurs, ces dernières décennies ont donné naissance à des systèmes à base de connaissances à vocations très diverses qui impliquent outre l'assistance médicale (tant au corps médical qu'aux patients), la consultation et l'analyse de larges banques de données et de connaissances médicales, ou l'enseignement et la formation assistés par ordinateur. L'objectif principal de ces systèmes est de modéliser la démarche médicale d'un spécialiste en exploitant des connaissances de nature très variée. Enfin, les évolutions les plus récentes concernent le développement de systèmes dédiés à l'imagerie médicale, particulièrement en cardiologie.

Quelques-unes des difficultés propres à l'application médicale sont les suivantes :

- difficulté à modéliser le raisonnement médical, du fait de sa complexité, de la subjectivité des décisions et de l'imprécision des informations manipulées ;

- difficulté à acquérir et à représenter la connaissance médicale ;
- existence de barrières de type psychologiques et/ou déontologiques limitant l'introduction des nouvelles technologies au sein des institutions médicales ;

Nous présentons tout d'abord une revue des systèmes experts développés en médecine. La deuxième section est consacrée entièrement à l'étude des systèmes développés dans le domaine de l'interprétation d'images microscopiques.

## **1. Systèmes à base de connaissances en Médecine**

Nous présentons tout d'abord les systèmes d'assistance, puis les systèmes de consultation et enfin les environnements de formation.

### **1.1. Systèmes d'Assistance**

#### **1.1.1. Assistance médicale d'urgence**

Le système ACORN (Emerson 88) permet aux infirmières de décider de l'entrée immédiate des patients en l'unité de soins coronaires, ou bien de différer l'entrée pour lesquels une intervention immédiate n'est pas nécessaire.

#### **1.1.2. Assistance à l'élaboration des examens complémentaires**

Les examens complémentaires font partie intégrante de la démarche diagnostique et sont intégrés comme tels dans plusieurs systèmes à base de connaissances. Cependant, il existe une catégorie de systèmes conversationnels très spécifiques, spécialisés dans les examens complémentaires. L'intérêt pratique de ces systèmes est qu'ils sont opérationnels et peuvent d'ores et déjà être accédés par Minitel, afin de guider les généralistes. C'est le cas du système de diagnostic sérologique des hépatites virales accessible sur Minitel par le 3615 code SM\*E et développé par S. Darmoni, T. Poynard et J.C. Chaput, grâce au générateur de systèmes experts XPER. Selon les résultats des examens médicaux reçus de façon conversationnelle, ce système expert guide dans le diagnostic sérologique de cette éventuelle hépatite virale. De plus, une explication du raisonnement accompagnée d'un raisonnement par réfutation peut être entreprise demandant au système pourquoi une autre pathologie hépatique n'a pas été diagnostiquée.

### **1.1.3. Assistance à l'élaboration des essais cliniques en pharmacologie**

Le coût et la durée (7 à 12 ans) que nécessite la mise au point d'un nouveau médicament sont une charge très lourde que doivent supporter les laboratoires pharmaceutiques (Fargeas 88). Le système ARPEC (Aide à la Réalisation de Protocoles d'Essais Cliniques) est un système à base de connaissances capable d'optimiser la réalisation des essais cliniques de médicaments. Ce système doit prendre en charge la planification de l'ensemble des phases nécessaires au déroulement du plan d'essai clinique concernant un nouveau médicament. Ces phases impliquent des paramètres de nature très hétérogène : méthodologiques et statistiques, toxicologiques, pharmacocinétique et galéniques.

### **1.2. Systèmes de consultation**

Dès les prochaines années, l'information des médecins sera améliorée par le recours à des banques de données et de connaissances. Divers types de banques de données et de connaissances existent déjà sous la forme des banques de références textuelles qui adressent le domaine de la littérature médicale ou de la pharmacologie, des banques de données factuelles qui concernent le diagnostic des pathologies et enfin des banques d'images de référence.

### **1.3. Systèmes de formation**

L'enseignement médical est sans doute un des champs privilégiés d'application des systèmes à base de connaissances. Ces systèmes adressent essentiellement à quatre catégories d'"élèves" : les spécialistes, les étudiants en médecine (externes et internes), les étudiants para-médicaux (infirmiers) et enfin les malades chroniques. Les objectifs du système diffèrent selon la catégorie de l'élève concerné : outil pédagogique, générateur des cas en fonction du niveau de l'élève ou guide fournissant des conseils adaptés à la situation. Dans ce dernier cas, pour les malades chroniques par exemple, une orientation essentiellement pratique doit tenir compte des situations rencontrées quotidiennement.

L'un des systèmes de formation le plus connu est le système GUIDON (Clancey 79) conçu à partir de MYCIN. Son objectif est de fournir aux élèves une aide pédagogique par la génération de cas reflétant l'expertise modélisée dans MYCIN. Le système PSYSTEME (Fargeas 87) est spécialisé dans le domaine du diagnostic psychiatrique. Il est fondé sur la classification établie par L'American Psychiatric Association (classification des troubles mentaux DSM-III). Plusieurs modes d'utilisation de ce système sont possibles : le mode "automatique", le mode "supervisé" ou le mode "confirmation" selon que le raisonnement est pris en charge totalement



ou partiellement, ou que le système est chargé simplement de vérifier une hypothèse proposée par l'utilisateur. D'autres systèmes tels que SESAM-DIABETE (P. Ferrand, M. Lévy - CHU de la Pitié et Hôtel-Dieu 1986) ou CONSULT-EAO (Inserm U 88, Médecins sans frontières - Avignon 1988), dédiés respectivement à la formation des infirmières dans les pays en voie de développement, sont opérationnels et en service actuellement .

## **2. Interprétation d'images microscopiques**

Cette section est consacré à l'exploration d'un domaine encore peu abordé, celui de la conception de systèmes à base de connaissances en imagerie biomédicale (cytopathologie et histopathologie). Ce domaine est notre domaine d'application privilégié, c'est pourquoi nous décrivons la problématique de manière détaillée. Nous présentons ensuite l'état de l'art et les perspectives du domaine.

### **2.1. Problématique de la cytopathologie**

Les principales difficultés en cytopathologie sont dues à la variabilité des objets étudiés et à l'imprécision des descriptions qui en découle. Cette variabilité provient du manque de standardisation et de reproductibilité des techniques de préparation et coloration, mais aussi de la variabilité intrinsèque des morphologies cellulaires et des leurs expressions pathologiques. Il convient enfin de tenir compte des fluctuations inhérentes au jugement humain.

#### **2.1.1. la cytopathologie dans la pratique médicale**

Trois activités majeures peuvent être distinguées en cytopathologie : dépistage, diagnostic et pronostic :

Le **dépistage** est l'activité de routine la plus courante. Il est fondé sur le comptage et l'identification des cellules présentes sur la lame (comptage différentiel). Le résultat premier de cette opération est une décision à caractère binaire sur la normalité ou l'anormalité du spécimen; elle peut se fonder sur un très petit nombre de cellules anormales.

Pour des raisons de charge de travail et de problèmes de coût, un dépistage systématique n'est pratiqué que pour des populations à risques. Tel est le cas des travailleurs manipulant des colorants en industrie (cytologie d'urines pour le dépistage du cancer de la vessie) et des grands fumeurs (cytologie d'expectoration pour le dépistage du cancer du poumon).

L'examen cytologique n'étant ni risqué ni désagréable, il devrait être considéré comme la première méthode qui permet, lorsque cela est possible, une orientation précoce du **diagnostic médical (Lopes 76)**. La cytologie permet le diagnostic des cancers in situ, mais également la détection des réactions pré-cancéreuses, au niveau cellulaire, ou de récives. En gynécologie, l'examen des spécimens cervicaux permet le diagnostic des lésions dysplasiques, susceptibles d'évoluer vers des cancers. En hématologie, le diagnostic d'états pré-leucémiques peut aisément être pratiqué grâce à l'analyse de prélèvements de moelle osseuse.

L'examen cytologique permet également l'orientation précoce du diagnostic. L'examen cytologique de cellules cancéreuses provenant d'effusions pleurales peut laisser supposer l'existence d'un site primitif de tumeur maligne. La connaissance du type et du grade d'un cancer et celle de l'étendue des atteintes lymphatiques, permet enfin d'estimer le degré d'intervention chirurgicale nécessaire.

Le **pronostic** implique en outre la capacité du cytopathologiste à prévoir l'évolution de la maladie, selon la sévérité des altérations subies par le spécimen observé. Il implique la prise en compte du passé du malade, et particulièrement des diagnostics effectués à partir d'éventuelles observations microscopiques antérieures. Il implique également l'évaluation du grade d'un cancer. Parmi des patients atteints de cancers du sein ou de la prostate, la présence de tumeurs de grade 3 est souvent corrélée avec un pronostic moins favorable qu'en cas de tumeurs de grade 1 : rechute précoce; état sain de courte durée; espérance de vie plus courte. (**Mouriquand 86**).

### **2.1.2. Problématique de l'inspection du spécimen**

#### ***préparation et coloration***

Il y a un manque de standardisation dans la préparation du matériel cytologique pour l'observation au microscope : cela augmente la variabilité des apparences morphologiques des cellules et parfois les difficultés pour identifier et classer les cellules et pathologies.

Divers types de préparations cytologiques peuvent être réalisées (étalements, empreintes, grattage, cyto centrifugation) et la qualité des préparations manuelles est très dépendante de l'habileté et de la pratique. Les étalements, par exemple, conduisent souvent à des échantillons contenant des cellules isolées, mais aussi des colonies des cellules regroupées en agrégats plus ou moins denses et donc d'observation difficile. La cyto centrifugation, par ailleurs, peut provoquer des altérations morphologiques, telles des distorsions ou des modifications de texture.

Très peu de colorants biologiques ont été standardisés : jusqu'à maintenant, seules les colorants de Romanowsky-Giemsae de Papanicolaou l'ont été (Wittekind 82a, 82b). Mais ces colorants standardisés sont rarement utilisés dans les laboratoires de cytopathologie. L'utilisation de colorants non standard conduit à une variabilité de la couleur des cellules d'un laboratoire à l'autre et même dans un laboratoire donné, selon les différents lots de colorants. L'alliance œil-cerveau est capable de surpasser beaucoup de ces variations et donc d'identifier correctement beaucoup de cellules et de lésions même lorsque des altérations se produisent. Cette variabilité complique l'apprentissage de la cytologie et le rend difficile et long.

#### *variabilité intrinsèque de la morphologie cellulaire*

Les cellules du sang, des tissus et des organes ne sont pas des structures inertes ou fixes ; elles vivent, travaillent et meurent ; elles prolifèrent et se différencient. Pendant ces processus, la morphologie des cellules peut changer. Les caractéristiques morphologiques d'une cellule peuvent varier du début à la fin du cycle cellulaire : la surface nucléaire est plus grande en phase G2 qu'en phase G1, la texture de la chromatine est également modifiée au cours du cycle. Les caractéristiques morphologiques d'une cellule varient selon son activité fonctionnelle : les cellules thyroïdiennes sont petites et regroupées lorsqu'elles sont inactives ; pendant la sécrétion hormonale, elles sont plus grandes, ont un noyau plus lumineux, des nucléoles plus apparents.

De plus, beaucoup de changements morphologiques apparaissent pendant un processus pathologique tel qu'une inflammation, une infection ou une transformation maligne.

Chaque type cellulaire peut être représenté par un large spectre d'images ; cela explique l'imprécision des descripteurs sémantiques des cellules et la difficulté d'affirmer avec certitude que la cellule qui est en train d'être observée est anormale ou non.

Il y a d'autres causes de variabilités cellulaires ; les cellules significatives peuvent être partiellement cachées ou altérées par un matériel étranger au milieu, tels des fluides protéiniques, des artefacts extérieurs ou une cristallisation.

#### *les cellules malignes ont parfois l'apparence de cellules bénignes*

Le diagnostic cytologique de cancer est fondé sur la détection d'anomalies cellulaires telles que l'augmentation de la taille des cellules, l'augmentation du rapport nucléo-cytoplasmique ou la présence de nucléoles larges et nombreux. Mais parfois, les cellules cancéreuses ne se différencient pas des cellules non malignes. Les cellules épithéliales dans les cas de cancers du

sein bien différenciés peuvent difficilement être distinguées des cellules de type fibroadénome ; le diagnostic est alors réalisé grâce à des méthodes cytologiques complémentaires comme la cytophotométrie (analyse quantitative de l'ADN).

Il se peut de plus que les cellules significatives d'une pathologie soient très rares. Une telle rareté des cellules significatives est parfois seulement due à des artefacts de préparation : prélèvement pauvre en cellules, perte de cellules pendant la centrifugation ou les procédures de fixation ou de coloration.

***reproductibilité du jugement humain***

La cytologie est une science cumulative dont les performances sont directement liées à l'apprentissage. Bien que d'importants efforts aient été réalisés pour unifier langages et description, il peut persister certaines imprécisions se traduisant par des divergences de diagnostic ou de classification entre cytologistes.

Une expérience a été conduite pour juger de la reproductibilité inter-observateurs, celle-ci impliquait 76 lames test (cancer mammaire), l'objectif étant de "grader" la tumeur. La table 1 montre les résultats obtenus par deux observateurs indépendants. On observe un désaccord dans 30 % des cas.

**Table 1 :** Matrice de confusion montrant la reproductibilité du jugement humain en cytopathologie mammaire et confrontant le diagnostic émis par 2 cytologistes.

		Cytologiste 1		
		Grade	1	2
Cytologiste 2	1	6	3	0
	2	6	18	2
	3	0	11	30

## **2.2. Systèmes d'assistance en microscopie**

### **2.2.1. La quantification**

L'objectif de la quantification est d'obtenir des critères plus objectifs et plus reproductibles de l'appréciation des morphologies cellulaires.

Depuis les premiers travaux de Prewitt et Mendelsohn (Prewitt 66), un effort important de recherche a été consacré au domaine de la microscopie quantitative (Koss 87) qui a conduit à la commercialisation rapide de systèmes d'analyse "automatiques" (Preston 76).

Ces systèmes demeurent néanmoins très spécialisés et difficiles à utiliser. L'emploi des seuls critères quantitatifs conduit à mettre en œuvre des techniques statistiques d'analyse de données, dont l'applicabilité est très restreinte. De plus, ces techniques rendent mal compte de la démarche humaine de raisonnement.

La formulation diagnostique en effet est essentiellement fondée sur une variété de critères qualitatifs issus de l'expérience, mais surtout de la consultation d'ouvrages de référence. Diverses sources incluant entre autres les livres, les atlas, les journaux ou les archives des patients peuvent ainsi être utilisées pour extraire et enrichir les connaissances de référence.

### **2.2.2. Systèmes experts utilisant des connaissances de référence**

Beaucoup de systèmes d'aide au diagnostic impliquent l'accès à des connaissances de référence. Des archives ont été informatisées pour permettre la consultation efficace de cas déjà diagnostiqués, dans le but d'effectuer des études comparatives ou des évaluations (Stichting 88). En outre, des connexions par réseau aux bibliothèques médicales ainsi que le stockage de références et des résumés sur disques optiques existent déjà, ce qui facilite l'accès à des publications récentes.

L'avènement de nouvelles technologies telles que les vidéo-disques permet en effet le stockage de connaissances très diverse, impliquant non seulement du texte, mais aussi des images ou de la voix. Ils sont utilisés dans beaucoup de champs de la cytologie et de l'histologie : des images des ovaires (Ginneken 88), du poumon (Silbert 86), de la moëlle osseuse (Gyde 88) ou le système lymphatique (Horvitz 84).

Le système DEW (Diagnostic Encyclopedia Workstation) (Ginneken 89) par exemple contient de la connaissance de référence pour l'aide au diagnostic des pathologies ovariennes, la base de connaissances contenant non seulement des images de référence mais aussi de la

connaissance verbale et textuelle sur les cas pathologiques. Le système DEW contient actuellement 85 diagnostics de pathologie ovarienne qui couvrent outre les cas les plus fréquents beaucoup de cas rares. Le volume d'images s'élève environ à 3000 images couvrant 158 diagnostics différents.

Ces systèmes pour être utilisables doivent être d'accès simple; ils doivent rendre des services adaptés aux besoins réels des pathologues.

### **2.2.3. Systèmes experts d'aide au diagnostic**

Les systèmes à base de connaissances ont donc été introduits, pour offrir un contrôle plus souple et plus puissant des étapes d'analyse, mais également pour permettre la modélisation de la démarche humaine d'investigation des spécimens microscopiques (Bartels 89a) et enfin une utilisation des connaissances de référence.

La méthodologie la plus classique de représentation des connaissances demeure celle des règles de production. Elle a en particulier été employée dans le système USERS (Garbay 88), un système expert dédié au diagnostic des cancers de la vessie. Ce système, qui travaille sur la base d'un dialogue avec l'expert, est capable de proposer ou de confirmer telle ou telle hypothèse diagnostique.

Le système développé par (Dhawan 88), et dédié à la détection précoce des mélanomes, est également un système de production. Il combine plusieurs modules de règles, dits principaux, responsables de l'analyse bas niveau de l'image, de son analyse haut niveau et de l'interprétation. Ces modules sont assistés par des modules secondaires, spécialisés dans des tâches précises (pronostic des mélanomes, connaissance des caractéristiques pigmentaires locales, par exemple).

De plus, ce système utilise des prédicats flous pour traiter le raisonnement incertain. Quant à l'explication de raisonnements les solutions s'apparentent plutôt à une simple trace d'exécution.

Une approche similaire a été adoptée par (Wu 87) pour développer un système expert d'analyse des chromosomes, qui utilise une stratégie de prédiction-vérification. Le module de bas niveau est responsable de la segmentation des métaphases, et du calcul des paramètres (localisation du centromère, détermination de l'axe médian...). Ces paramètres sont utilisés par le module de haut niveau, responsable de la classification/interprétation des données images. Une approche bayésienne classique est utilisée en phase de génération d'hypothèse, alors que la confirmation est obtenue par un processus d'inférence "classique".

Un système complexe de compréhension d'images en histopathologie (HES) a été conçu par l'équipe de Bartels (Bartels 89b), qui dispose de capacités d'analyse (système SES) mais également de facultés diagnostiques (système DES). Le système DES, Système Expert de Diagnostic en histopathologie, conçu comme un générateur de systèmes d'aide au diagnostic, a été écrit en ICON, un langage de programmation classique (type C) étendu au traitement de listes. La version actuelle du système est dédiée au diagnostic des cancers du colon. La représentation des connaissances du système est originale: elle utilise non pas le formalisme des règles de production, mais une représentation "tabulaire" de la connaissance, où les entrées dans la table représentent respectivement les "symptômes" et les diagnostics susceptibles de leur être associés.

Le système SES, Système Expert de Segmentation des images d'histopathologie, est chargé d'identifier les composants de l'image, leurs caractéristiques et leurs relations. Il est couplé à cette fin à une bibliothèque de procédures d'analyse d'image, DIPL. SES est essentiellement un système à base de règles, fonctionnant en marche avant. Les règles sont regroupées en modules, selon les buts qu'elles permettent d'atteindre (séparation de noyaux superposés, par exemple), elles régissent l'application des procédures d'analyse de l'image. Un modèle de l'image histologique est utilisé pour guider les traitements, qui est implanté sous la forme d'un réseau sémantique construit à partir de schémas. Les systèmes SES et DES communiquent par le biais du système IES (Système Expert d'Interprétation), chargé d'interpréter les critères iconiques fournis par SES en termes symboliques plus abstraits, manipulables par DES.

Une représentation mixte de la connaissance (impliquant des objets et des règles de production) a été également appliquée au diagnostic histologique du cancer du sein (Garbay 88). L'image histologique est ici décrite comme une hiérarchie d'objets (canaux, lobules, acini) impliqués à différents niveaux de l'organisation histologique. Les descripteurs morphologiques sont obtenus par interaction avec un observateur externe. la base de règles comprend plusieurs modules, dont l'activation dépend du niveau de l'analyse: l'image histologique est exploitée selon un processus descendant, depuis l'examen de son architecture, vers la scrutation des morphologies cellulaires, qui définit une stratégie de prédiction/vérification.

Une approche mixte est également adoptée dans le système développé par (Pycock 89), dédié à l'analyse et la classification des chromosomes, et construit à partir de l'environnement ART. Un système à base de schémas est utilisé pour représenter la connaissance du domaine, et un système à base de règles en contrôle l'exécution. Le contrôle de l'interprétation est ici issu d'une combinaison entre des résolutions guidées par les buts, par les données ou par les modèles. Le chaînage arrière s'effectue en parcourant les relations de composition et d'héritage

au sein des schémas, il définit une planification des tâches à accomplir. Une résolution guidée par les modèles est utilisée pour établir les correspondances entre les données empiriques et les modèles. Une approche guidée par les données, enfin, contrôle la mise à jour des degrés de correspondance et des affichages.

Le noyau SBS, un générateur de type tableau noir, a été enfin utilisé pour développer un système de segmentation des chromosomes (Piper 89). Un réseau de schémas est utilisé pour représenter les chromosomes. Un ensemble d'experts (ou "sources de connaissances") ont été conçus, qui ont la responsabilité d'une tâche particulière au sein du système et qui coopèrent à la résolution du problème posé. Parmi les experts "principaux" (une douzaine au total), citons l'expert en segmentation, en sélection de cellules, en calcul de paramètres, ou en classification statistique.

### **2.3. Progrès récents et perspectives**

La cytopathologie se révèle être un domaine complexe d'application des systèmes experts, par la variété des éléments manipulés (images, descripteurs morphologiques, diagnostics) et des raisonnements mis en jeu (exploration du spécimen, recherche d'événements rares, analyse morphologique, identification cellulaire, formulation diagnostique,...). Il convient enfin de rappeler que l'exploration d'un spécimen suppose l'analyse de très nombreux champs d'observation, d'où un volume de données à gérer extrêmement important.

D'un point de vue plus technique, des progrès pourraient être attendus des architectures spécialisées, encore peu utilisées dans les environnements de type "expert". Le système multiprocesseur POLYP a néanmoins été utilisé par (Bartels 89b) et a permis un gain en temps d'un facteur 10, malgré les contraintes résultants des communications inter-processeurs. Les approches distribuées devraient connaître un regain d'intérêt, en stimulant les recherches sur les approches orientées tâches, le raisonnement distribué, ou les techniques de coopération.

Il convient également de redéfinir les objectifs visés par ces recherches: si la fonction d'assistance à l'utilisateur demeure essentielle, la vocation de tels systèmes peut aussi concerner la formation des jeunes pathologues. Le système TTCC1 (Tang 88) a été conçu comme un système de formation en cytologie cervicale. Son but est de confirmer les types et sous-types cellulaires qui correspondent aux paramètres nucléaires et cytoplasmiques observés et enregistrés par l'étudiant, étant donné une cellule test particulière. Le raisonnement utilisé pour parvenir au résultat est également fourni par le système.



Enfin les efforts à plus long terme devraient concerner la conception de stations de travail "intelligentes", dotées d'interfaces multimédia et multifonctionnelles, capables de communiquer à distance, d'apprendre, mais aussi de former.

## **Conclusion**

De nombreuses difficultés limitent la diffusion des systèmes à base de connaissances en médecine. Ces difficultés demeurent principalement les suivantes :

- la difficulté à acquérir, à représenter et à modéliser la connaissance et le raisonnement médical ;
- l'existence de barrières de type psychologiques et/ou déontologiques limitant l'introduction des nouvelles technologies au sein des institutions médicales ;
- le manque d'une analyse convaincante des besoins médicaux qui se reflète par le manque actuel de systèmes véritablement opérationnels.

En outre, nous avons signalé la nécessité de concevoir pour le domaine médical des systèmes réellement "centrés-utilisateur", dans le but de faciliter la communication homme-machine et de garantir des fonctionnalités répondant vraiment aux besoins de l'utilisateur.

Malgré ces difficultés on constate déjà la pénétration de la technologie informatique en pratique médicale quotidienne et particulièrement l'utilisation accrue des systèmes de consultation à distance. Ces systèmes, de type conversationnel, permettent aux médecins mais aussi aux patients la consultation et l'analyse de larges banques de données médicales ; ils constituent également des outils de formation assisté par ordinateur.

La plupart des efforts se concentrent aujourd'hui vers la conception de systèmes réellement efficaces et utilisables, ce qui implique une réelle synergie entre utilisateurs, spécialistes et concepteurs, ainsi que la recherche d'une ouverture et d'une amélioration des voies de communication entre l'homme et la machine. Il s'agit donc de gagner une compréhension plus approfondie de la connaissance et des capacités humaines de résolution de problèmes, mais aussi d'améliorer les formes d'interaction entre l'homme et la machine.

En ce qui concerne le domaine de l'interprétation d'images biomédicales, les principaux problèmes rencontrés sont la taille, l'hétérogénéité et la complexité des applications. En ce qui concerne la taille, les problèmes rencontrés proviennent de la nécessité d'analyser un grand nombre d'images et de constituer de larges bases de connaissances. Un intérêt croissant est porté ainsi à l'utilisation d'architectures parallèles et dédiées mais aussi à l'amélioration des mécanismes de consultation, d'accès et d'analyse des bases de connaissances. Les problèmes de l'hétérogénéité proviennent de la nécessité d'intégrer divers schémas de représentation des connaissances et des raisonnements. Pour répondre à la question de la complexité, enfin, il

convient de développer des architectures logicielles robustes supportant la décomposition et l'expression haut niveau des problèmes abordés.

## Conclusion partie A

---

Divers besoins à caractère technologique ont été soulevés dans cet état de l'art pluridisciplinaire, parmi lesquels nous pouvons citer :

- le besoin de disposer d'un outil technologique de conception robuste et de haut niveau qui respecte les besoins effectifs de l'utilisateur et les contraintes spécifiques d'une application ;
- le besoin de disposer d'une approche logicielle solide qui permette l'intégration d'outils informatiques de natures très diverses (opérateurs à vocation multiples, méthodes de traitement très variées, entre autres), mais aussi permettant l'intégration de stratégies de résolution et de mécanismes de contrôle.

La nécessité de faciliter la communication homme-machine a été soulevée ainsi que l'importance de garantir des fonctionnalités répondant vraiment aux besoins de l'utilisateur, permettant ainsi la pénétration des systèmes informatiques en pratique médicale. Ces deux points seraient atteints par une conception "centrée-utilisateur" et non "centrée-système".

En effet, un besoin d'effectuer des analyses convaincantes des vrais besoins médicaux s'avère indispensable qui permettent ainsi de pallier principalement le manque actuel de systèmes véritablement opérationnels. Ce besoin ne peut être comblé que par l'existence d'une réelle synergie entre utilisateurs, spécialistes et concepteurs, ainsi que par la recherche d'une ouverture et d'une amélioration des voies de communication entre l'homme et la machine.

En ce qui concerne le domaine de l'interprétation d'images biomédicales, les besoins ici proviennent de la nécessité d'intégrer divers schémas de représentation des connaissances et des raisonnements. Pour ce fait, il convient de développer des architectures logicielles robustes supportant la décomposition et l'expression haut niveau des problèmes abordés.

Parmi les différentes approches, l'approche multi-agent s'avère un outil technologique de haut niveau bien adapté à la résolution des applications complexes car elle permet une représentation de la connaissance multi-modale, la manipulation de schémas de raisonnement multi-formes, ainsi qu'une résolution coopérative des problèmes. Cependant, une des difficultés majeures des approches multi-agent est le risque pour le concepteur de tels systèmes, de se trouver rapidement "perdu", confronté à la manipulation des paramètres très divers caractérisant cette technologie. En effet, la technologie multi-agent permet beaucoup de possibilités

d'implantations, de choix techniques qui exigent d'ailleurs beaucoup d'investissement de conception, et le risque pour le concepteur de se trouver confronté à un logiciel ingérable et lourd.

Pour éviter ces situations d'impasse, il s'avère nécessaire de disposer d'une typologie formelle robuste provenant d'une étude approfondie des connaissances et des raisonnements, qui aide à cerner les besoins réels de l'application. Cette étude approfondie doit d'une part confronter les connaissances et les raisonnements de façon générale, dépourvue de toute application. D'autre part, cette étude doit en opposition, traiter les connaissances et les raisonnements spécifiques à l'expertise humaine, dépendants de l'application.

L'objectif de cette étude est de dégager une transcription informatique des éléments de connaissance et du raisonnement, qui fasse le lien entre l'utilisateur et la technologie et qui guide la conception. Cette modélisation n'est pas un processus linéaire ou séquentiel ; il s'agit plutôt d'un processus itératif, dont le but est la structuration et la transcription progressive des connaissances du domaine exploré, et dont les moyens sont l'utilisation alternée de connaissances spécifiques propres de l'expertise humaine dans un domaine d'application et de connaissances générales de résolution. Cette modélisation formelle ne peut être fondée que sur une compréhension plus approfondie de la connaissance et des capacités humaines de résolution de problèmes.

Dans tous les cas, lors de la conception des systèmes pluridisciplinaires (informatique, vision et médecine) il est nécessaire de fournir des efforts tendant à une recherche coopérative et visant à trouver le meilleur compromis entre le développement d'un cadre théorique robuste et la conception d'outils dédiés de haute performance.

---

## Références bibliographiques :

---

*Sigles*

ACM	Association for Computers Machinery
AFIA	Association Française pour l'Intelligence Artificielle
C(V)GIP	Computer (Vision), Graphics & Image Processing
CVPR	Computer Vision & Pattern Recognition
EMBS	Engineering in Medicine & Biology Society
ICAP	International Conference on Image Analysis and Processing
ICPR	International Conference on Pattern Recognition
IJCAI	International Joint Conference on Artificial Intelligence
IPMI	International Conference on Information Processing & Medical Imaging
PAMI	Pattern Analysis & Machine Intelligence
PRC -	Programme de Recherche Coordonnée -
GRECO	Groupe de REcherche COordonnée
RFIA	Congrès Reconnaissances de Formes et Intelligence Artificielle
SMC	Systems, Man and Cybernetics

---

### *Chapitre I : Etat de l'Art : Systèmes à base de Connaissances*

---

- (Aguirre 87)  
 Aguirre J.L., Bloch D., Rechenmann F. & Rouibah N.  
**SHIRKA : compilation, explication et cohérence dans des bases de connaissances centrées-objet.**  
 Cognitiva 87 / Image Electronique, CESTA, Paris, La Vilette, 1987.
- (Baujard 90)  
 Baujard, O. & Garbay, C.  
**A programming environment for distributed expert system design.**  
 Expert System Applications, ExpertSys., pp. 27-32.
- (Cheval 90)  
 Cheval J.L., Culet A., Ovalle A. & Rieu D.  
**Familiarisation aux approches orientées objet.**  
 TD d'analyse organique.  
 IUT Informatique, décembre, 1990.
- (Collinot 91)  
 Collinot A.  
**Dossier : Intelligence Artificielle Distribuée.**  
 Bulletin de l'AFIA, n°6, pp. 16-19, juillet, 1991.
- (Davis 85)  
 Davis R. & King J.J.  
**The Origin of Rule-Based Systems in AI.**  
 In "Rule-Based Expert Systems", pp. 20-52.  
 Buchanan B.G. & Shortliffe E.H. (eds), Addison-Wesley Publishing Company, 1985.
- (Durfee 88)  
 Durfee E.H. & Lesser V.R.
-

- Using Partial Global Plans to Coordinate Distributed Problem Solvers.**  
In "Distributed Artificial Intelligence", A. Bond & L. Gasser (eds), Morgan Kaufman., 1988.
- (Erceau 91)  
Erceau J. & Ferber J.  
**L'Intelligence Artificielle Distribuée.**  
Revue "La Recherche".  
Num 233, Vol 22, pp. 750, juin 1991.
- (Erman 81)  
Erman L.D., London P.E. & Fickas S.F.  
**The Design and an example Use of Hearsay-III.**  
Proc. 7th IJCAI, pp. 409-415, 1981.
- (Feigenbaum 71)  
Feigenbaum E.A., Buchanan B.G. & Lenderberg J.  
**On generality and problem solving: A case study using the DENDRAL program.**  
In "Machine intelligence ", 6:165-190, B. Meltzer & D. Michie (eds), Edinburgh University Press, 1971.
- (Ferber 91)  
Ferber J.  
**Introduction à l'Intelligence Artificielle Distribuée.**  
Dossier : Intelligence Artificielle Distribuée.  
Bulletin de l'AFIA, n°6, pp. 16-19, juillet, 1991.
- (Fox 81)  
Fox M.  
**An Organizational View of Distributed Systems.**  
IEEE Trans. on SMC-(11):70-80, 1981.
- (Garbay 89)  
Garbay C. & Pesty S.  
**A Multi-Agent Problem Solving Environment.**  
In "Proc. IASTED Int. Symp. on Expert System Theory & Applications", 1989.
- (Gasser 87)  
Gasser L., Braganza C. & Vailly A.  
**MACE: A Flexible Tesbed of Distributed AI Research.**  
In "Distributed Artificial Intelligence", M.N. Huhns (eds), Morgan Kaufman., 1987.
- (Gasser 88)  
Gasser L., Braganza C. & Herman N.  
**Implementing Distributed AI Systems Using MACE.**  
In "Distributed Artificial Intelligence", A. Bond & L. Gasser (eds), Morgan Kaufman., 1988.
- (Goldberg 85)  
Goldberg A. & Robson D.  
**Smalltalk 80, the Language and its Implementation.**  
Addison Wesley Publishing Company, 1985.
- (Gong 87)  
Gong Y. & Haton J.P.  
**Une Société de Spécialistes à Niveaux Multiples pour l'Interprétation de Signaux.**  
In "Actes du 6ième Congrès RFIA", pp. 245-257, AFCET/INRIA, 1987.
- (Haton 87)  
Haton J.P.

- Reconnaissance de formes et intelligence artificielle en traitement d'images médicales.**  
Intelligence Artificielle et Imagerie Médicale, Auguste Wackenheim (Rédacteur).  
Springer-Verlag, Paris, 1987.
- (Hayes-Roth 85) Hayes-Roth B.  
**A Blackboard Architecture for Control.**  
Artificial Intelligence, 26:251-321, 1985.
- (Lesser 81) Lesser L., Braganza C. & Herman N.  
**Functionally Accurate, Cooperative Distributed Systems.**  
IEEE Trans. on SMC-(11):81-96, January, 1981.
- (Maître 88a) Maître B., Lâasri H., Mondot T., Charpillet F. & Haton J.P.  
**Knowledge Source coordination in an Incomplete and Evolutive Universe: Studies and Achievements in ATOME.**  
Research Report CRIN 88-R-39, University of Nancy, 1988.
- (Maître 88b) Maître B., Lâasri H. & Haton J.P.  
**A Blackboard-Based Shell for Multi-Level Knowledge Organization.**  
Research Report CRIN 88-R-25, University of Nancy, 1988.
- (Marzouki 89) Marzouki, M., Laurent, J. & Courtois, B.  
**A unified use of deep and shallow knowledge in an expert system for prototype validation of integrated circuits.**  
Proc. of the 9th International Workshop Expert Systems and their Applications, Specialized Conference Second Generation Expert Systems", pp. 55-69, EC2., 1989.
- (Marino 90) Marino O., Rechenmann, F. & Uvietta, P.  
**Multiple Perspectives and Classification Mechanism in Object-Oriented Representation.**  
9th European Conference on Artificial Intelligence, Stockholm, August 1990.
- (Masini 89) Masini, G., Napoli, A., Colnet, D., Léonard, D, et Tombre, K.  
**Les langages à objets.**  
InterEditions, Paris, 1989.
- (Mazier 90) Mazier B., Lavallée S & P. Cinquin.  
**Computer assisted interventionist imaging : application to the vertebral column surgery.**  
In "Proc. 12th Int. Conf. IEEE - EMBS", vol. 1, pp. 430-431, 1990.
- (Michalski 83) Michalski R.  
**A Theory and Methodology of Inductive Learning.**  
In "Machine Learning", Chap. 4, Springer Verlag, 1983.
- (Minsky 75) Minsky M.  
**A framework for representing knowledge.**  
In "The psychology for computer vision", pp. 211-277, Winston (eds), New-York: Mc Graw Hill., 1975.
- (Nii 86)



- Nii H.P.  
**Blackboard Systems: Blackboard Application Systems, Blackboard Systems from a Knowledge Engineering Perspective.**  
AI Magazine, 7(3):82-106, 1986.
- (Ovalle 91a)  
Ovalle, A. & Garbay, C.  
**KIDS : A Distributed Expert System for Biomedical Image Interpretation.**  
12th International Conference on IPMI, pp. 419-433, Colchester & Hawkes (Eds), Springer-Verlag, Kent, juillet 1991.
- (Ovalle 91b)  
Ovalle, A. & Garbay, C.  
**Raisonnement et Contrôle en Univers Multi-Agent : Une Application à l'Interprétation d'Images Biomédicales.**  
AFCET-RFIA, pp. 625-633, Lyon, novembre 1991.
- (Post 43)  
Post E.  
**Formal reductions of the general combinatorial problem.**  
American Journal of Mathematics, 65:197-268, 1943.
- (Roberts 77)  
Roberts R.B. & Goldstein I.P.  
**The FRL Primer.**  
AI Memo 408, AI Lab, MIT, Cambridge, Massachusetts.
- (Roche 88)  
Roche C.  
**Object in Expert Systems.**  
In "Artificial Intelligence & Cognitive Sciences", pp 3-14, J. Demongeot, T. Hervé, V. Rialle, C. Roche (eds), Manchester University Press, 1988.
- (Shortliffe 76)  
Shortliffe E.H.  
**Computer-based Medical Consultation: MYCIN.**  
American Elsevier, New-York, 1976.
- (Smith 80)  
Smith R.G.  
**The contract net protocol : high level communication and control in a distributed problem solver.**  
IEEE Trans Comput, C-29, pp. 1104-1113.
- (Stefik 81)  
Stefik M.  
**Planning with constraints (MOLGEN: Part 1).**  
Artificial Intelligence, 16:111-139, 1981.
- (Stefik 81)  
Stefik M.  
**Planning and Meta-planning (MOLGEN: Part 2).**  
Artificial Intelligence, 16:141-169, 1981.
- (Waterman 70)  
Waterman D.A.  
**Generalization learning techniques for automating the learning of heuristics.**  
Artificial Intelligence, 1:121-170, 1970.
- (Zanconato 88)  
Zanconato R.  
**BLOBS - An Object-Oriented Blackboard System Framework for Reasoning in Time.**

In "Blackboard Systems", Addison-Wesley, 1988.

---

*Chapitre II : Etat de l'Art : Systèmes de Vision à base de Connaissances*

---

- (Brooks 83) Brooks R.A.  
**Model-based Three-dimensional Interpretation of Two-dimensional Images.**  
IEEE Trans. PAMI , 5(2):140-150, 1983.
- (Baujard 91) Baujard O., Pesty S. et Garbay C.  
**A Programming Environment for Distributed Vision System Design.**  
X International Conference on IAPR, Cuomo, Italie, septembre 1991 (à paraître).
- (Clément 89) Clément V. et Thonnat M.  
**Handling knowledge in image processing libraries to build automatique systems.**  
2nd International Workshop on Industrial Applications of Machine Intelligence and Vision, pp. 187-192, Tokyo, avril 1989.
- (Clément 91) Clément V. et Thonnat M.  
**Integration of Image Processing Procedures : OCAPI, a knowledge-based approach.**  
International Conference on CVGIP Image Understanding (à paraître)
- (Gallesio 86) Gallesio E., Serfaty V., Bol L. & Zavidovique B.  
**An Object to Capture some Fuzzy Expertise.**  
SPIE Proceedings "Applications of Artificial Intelligence" IV, 657:26-33, 1986.
- (Garnesson 89) Garnesson Ph., Giraudon G. et Montesinos Ph.  
**MESSIE : un système multi-spécialistes en vision.**  
Application à l'interprétation en imagerie aérienne.  
Rapport de Recherche INRIA No. 1012, avril 1989.
- (Hanson 87) Hanson A.R. & Riseman C.M.  
**The VISIONS Image Understanding System-1986.**  
In "Advances in Computer Vision", Brown C. (eds), L Erlbaum, 1987.
- (Kohl 87) Kohl C.A., Hanson A.R. & Riseman E.M.  
**A goal-directed intermediate level executive for image interpretation.**  
Proc. 10th IJCAI, 2:811-814, 1987.
- (Lux 85) Lux A.  
**Algorithmique et Contrôle en Vision par Ordinateur.**  
Thèse d'Etat, Université Joseph Fourier et Institut Polytechnique de Grenoble, 1985.
- (Matsuyama 85) Matsuyama T. & Hwang V.

- (Matsuyama 88) **SIGMA: A Framework for Image Understanding.**  
Proc. 9th IJCAI, pp.908-915, 1985.
- Matsuyama T.  
**Knowledge-based composition of image analysis processes.**  
Expert Systems for Image Image Processing.  
Proc.9th ICPR, pp. 125-133, 1988.
- (Nagao 84) Nagao M.  
**Control Strategies in Pattern Analysis.**  
Pattern Recognition, 17 (1):45-56, 1984.
- (Nazif 84) Nazif A.M. & Levine M.D.  
**Low-level image segmentation: an expert system.**  
IEEE Trans. on PAMI, 6:555-577, 1984.
- (Porquet 86) Porquet C.  
**Le métalangage AIRELLE comme outil de développement de maquettes d'interpréteurs d'images.**  
Thèse de Doctorat, Université de Caen, 1986.
- (Sakaue 85) Sakaue K. & Tamura H.  
**Automatic generation of image processings programs.**  
Proc. of CVPR, pp. 189-192, 1985.
- (Suetens 87) Suetens P. & Oosterlink A.  
**Using Expert Systems for Image Understanding.**  
IJPRAI, 1(2):237-250, 1987.
- (Tanaka 88) Tanaka H. et Sueda N.  
**Knowledge aquisition in image processing expert system EXPLAIN.**  
International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications.  
Hitachi City, Japon, mai 1988.
- (Thonnat 89) Thonnat M. et Bijaoui.  
**Knowledge-based classification of galaxies.**  
Knowledge-based systems in astronomy, Murtagh F. et A. Heck (eds), pp. 121-159, Springer-Verlag, 1989.
- (Tamura 83) Tamura H. & al.  
**Design and Implementation of SPIDER - a Transportable Image Processing Software Package.**  
CVGIP, 23:273-294, 1983.
- (Venable 85) Venable S.F., Richter D.J. & Wiedermann M.  
**A rule-based system for improving on segmentation.**  
IEEE Trans. on PAMI, 94-99, 1985.
- (Woods 87) Woods, P.W., Taylor, C.J., Cooper, D.H. & Dixon, R.N.  
**The use of geometric and grey-level models for industrial inspection.**  
Pattern Recognition Letters, 5:11, 1987.

---

**Chapitre III : Etat de l'Art : Systèmes à base de Connaissances en  
Imagerie Médicale**

---

- (Clancey 79) Clancey, W.J.  
**Dialogue management for rule-based tutorials.**  
Proceedings IJCAI-79, pp. 155-161, 1979.
- (Emerson 88) Emerson, P.A. , Wiatt, J. Dillistone, C. Crichton N. & Russel N.J.  
**"The Development of ACORN, an expert system enabling  
nurses to make admission decisions about patients with chest  
pain in an accident & emergency department"**  
Proc. of Medical Informatics '88 : Computers in Clinical Medicine,  
Nottingham, 13-15 sept. 1988,  
British Medical Informatic Society, pp. 37-40., 1988.
- (Fargeas 87) Fargeas X. & Frydman F.  
**PSYSTEME**  
CMME de l'hôpital Sainte-Anne et Intellitec, 1987.
- (Fargeas 88) Fargeas X. & Frydman F.  
**Les systèmes experts en médecine**  
Technologies de pointe, Editions Hermès, 1988.
- (Ginneken 88) A.M. van Ginneken and A.W.M. Smeulders  
**"An analysis of five strategies for reasoning in uncertainties  
and their suitability in pathology".**  
In : Gelsema ES and Kanal LN (eds.), Pattern Recognition and Artificial  
Intelligence, Elsevier Science Publisher B.V. North Holland., 1988.
- (Gyde 88) Gyde O.H.  
**"Computer assisted bone marrow aspirate reporting"**  
In : Proceedings of the Second International Conference on Artificial  
Intelligence Systems (Expert Systems) as Diagnostic Consultants for the  
Cytologic and Histologic Diagnosis of Cancer, March 13-15, Chicago, III,  
USA., 1988.
- (Horvitz 84) E.H. Horvitz, D.E. Heckerman, B.N. Nathvani and L.M. Fagan (1984),  
**"Diagnostic Strategies in the Hypothesis-directed  
PATHFINDER system".**  
In : Proceedings of the First Conference on Artificial intelligence  
Applications, IEEE Computer Society, pp. 630-66., 1984
- (Kulikowski 80) Kulikowski, C.A.  
**Artificial intelligence methods and systems for medical  
consultation.**  
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.  
PAMI-2, n°5, pp. 464-476, 1980.
- (Kulikowski 82) Kulikowski, C.A. & Weiss S.M.  
**Representation of expert knowledge for consultation: the  
CASNET and EXPERT project.**
-

- "In Artificial Intelligence in Medicine", pp. 21-55, P. Szolovitz (ed),  
Boulder, Colo.: Westview Press, 1982.
- (Lopes 76) Lopes Cardozo P.  
**Atlas of Clinical Cytology**, 1976.
- (Mouriquand 86) Mouriquand J, Gozlan-Fior M, Villemain D et al.  
**Value of cytoprognostic classification in breast carcinomas.**  
J Clin Pathol, 39:489-496, 1986.
- (Shortliffe 73) Shortliffe, E.H., Axline, S.G., Buchanan, B.G., Merigan, T.C., &  
Cohen, S.N.  
**An artificial intelligence program to advise physicians  
regarding antimicrobial therapy.**  
Computers and Biomedical Research, vol. 6, pp. 544-560, 1973.
- (Silbert 84) Silbert J.A.  
**"Producing a Videodisc for Pathology Slides".**  
Informatics in Pathology 1, pp. 38-44., 1986.
- (Stichting 84) Stichting  
**"PALGA, Handleiding Koderen en Minithesaurus".**  
Spinhex, Amsterdam, 1988.
- (Wittekind 85) Wittekind, D.  
**"Standardisation of dyes and stains for automated cell pattern  
recognition"**  
Anal. Quant. Cytol. Histol., 7, pp 6-30., 1985

*sous-section :*  
***Systèmes à base de Connaissances pour l'interprétation d'images  
microscopiques***

- (Bartels 88) Bartels P.H., Weber J.E. & Duckstein L.  
**Machine Learning Quantitative Histopathology.**  
*Analyt Quant Cytol Histol*, 10 (4):299-306, 1988.
- (Bartels 89a) Bartels P.H. & Weber J.E.  
**Expert Systems in Histopathology.**  
*Analyt Quant Cytol Histol*, 11(1):1-7., 1989.
- (Bartels 89b) Bartels P.H., Bibbo M., Graham A., Paplanus S., Shoemaker R.L. &  
Thompson D.  
**Image understanding system for histopathology.**  
*Analytical Cellular Pathology*, 1:195-214, 1989.
- (Dhawan 88) Dhawan A. P.  
**An Expert System for the Early Detection of Melanoma Using  
Knowledge-Based Image Analysis.**  
*Analyt Quant Cytol Histol*, 10 (6):405-416, 1988.

- (Garbay 88)  
Garbay C. & Pesty S.  
**Expert system for biomedical image interpretation.**  
In "*Artificial Intelligence & Cognitive Sciences*", pp 323-345, J. Demongeot, T. Hervé, V. Rialle, C. Roche (eds), Manchester University Press, 1988.
- (Koss 87)  
Koss, L.G.  
**Automated Cytology and Histology: a historical perspective.**  
*Analyt Quant Cytol Histol*, 9(5):369-374, 1987.
- (Pycock 89)  
Pycock D. & Taylor C.J.  
**Chromosome Classification in a General Purpose Frame-based Interpretation System.**  
Proc. of the 5th Alvey Vision Conference, Reading, septembre 1989.
- (Piper 89)  
Piper J., Baldock R., Towers S. & Rutovitz D.  
**A Knowledge-Based Chromosome Analysis System.**  
In "*Automation of Cytology: Advances in Systems and Techniques*", J. Piper and C. Lundsteen (eds), Springer Verlag, Heidelberg, 1989.
- (Preston 76)  
Preston, K.  
**Digital Picture Analysis in Cytology.**  
In "*Digital Picture Analysis*", pp.209-294, A. Rosenfeld (eds), Springer Verlag., 1976.
- (Prewitt 66)  
Prewitt, J.M.S. & Mendelsohn, M.S.  
**Analysis of cell images.**  
*Annals of the New-York Academy of Sciences*, 128:1036-1053, 1966.
- (Tang 88)  
Tang Z., Savino A., Wong E.K., Koss L.G. & Shaw L.G.  
**An Expert System Designed as a Tutoring Tool in Cervical Cytology: TTCC-1 System.**  
*Analyt Quant Cytol Histol*, 10 (6):417-422, 1988.
- (Wu 87)  
Wu Q., Suetens P. & Oosterlink A.  
**Toward an expert system for chromosome analysis.**  
*Knowledge-Based Systems*, 1(1):43-52, 1987.



## Introduction partie B

---

Un besoin de modélisation formelle fondée sur une compréhension plus approfondie de la connaissance et des capacités humaines de résolution de problèmes s'est manifesté dans la partie A. L'objectif de cette modélisation formelle est la transcription informatique progressive des éléments de connaissance et du raisonnement du domaine d'application exploré, qui facilite le lien entre l'utilisateur et la technologie et qui guide la conception.

Dans ce but, nous considérons tout d'abord dans le chapitre I de cette partie, la modélisation du problème concret qui nous intéresse (raisonnement médical pour le diagnostic du cancer du sein). Ce problème concret va étayer les développements proposés dans les deux thématiques qui nous intéressent, les connaissances et le raisonnement, mais aussi cet exemple concret sera utilisé pour les illustrer.

Cette modélisation formelle sera ensuite abordée, dans une perspective plus générale. Le deuxième chapitre met ainsi l'accent sur les aspects caractérisant les connaissances ; une typologie formelle et originale pour la classification des connaissances est proposée ici, qui définit quatre axes d'organisation de la connaissance : axe fonctionnel, axe structurel, axe des niveaux d'abstraction et axe des domaines d'application. Les diverses formes de connaissances composant chacun des axes seront présentés plus en détail dans le déroulement de ce chapitre.

Le troisième chapitre, suivant la même optique formelle que le précédent, aborde le "paradigme du raisonnement" ; une première perspective étudie le raisonnement dans ses diverses formes à l'aide de la typologie proposée dans le chapitre II. Une deuxième perspective étudie le raisonnement selon plusieurs niveaux de complexité : les raisonnements primaires sont d'abord étudiés, suivis des raisonnements hybrides.





## Partie B

### Modélisation des connaissances et du raisonnement

**Chapitre I** : Modélisation du raisonnement médical

**Chapitre II** : Les connaissances

**Chapitre III** : Le raisonnement



*Modélisation du  
raisonnement médical*

---

<b>Introduction.....</b>	<b>74</b>
<b>1. La Tâche de Validation du Spécimen.....</b>	<b>75</b>
<b>2. La Tâche de Sélection.....</b>	<b>75</b>
<b>3. La Tâche d'Analyse Morphologique.....</b>	<b>77</b>
<b>4. La Tâche d'Identification Cellulaire.....</b>	<b>78</b>
<b>5. La Tâche d'Interprétation Diagnostique.....</b>	<b>78</b>
<b>6. La Tâche de Validation du Diagnostic.....</b>	<b>81</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>82</b>



# *Modélisation du raisonnement médical*

---

### **Introduction**

Diverses formes d'examens cytologiques existent, qui s'appliquent à des domaines et à des organismes d'une extraordinaire richesse. Il est de ce fait très difficile de dégager des méthodes ou des règles générales, communes à ces diverses approches cytologiques. Nous avons donc choisi d'étudier un exemple précis, la cytologie mammaire, en espérant par la suite en dégager des méthodes plus générales de raisonnement applicables à d'autres types de cytologies.

Nous décrivons tout d'abord l'expertise développée par le cytopathologue, dans le domaine particulier de la cytopathologie de la glande mammaire, expertise "acquise" au terme d'une longue série d'entretiens et d'expérimentations avec le Pr. Seigneurin. La modélisation informatique de cette expertise (système KIDS) sera présentée plus en détail dans la partie C : elle fait appel à l'environnement de génération de systèmes à base de connaissances, de type distribué (système MAPS) qui sera lui aussi présenté dans la partie C.

La modélisation de l'expertise humaine qui sera présentée dans ce chapitre s'appuie sur la notion de tâche. La raison principale de ce choix est le fait que les connaissances figuratives ne prennent leur sens que dans un contexte opératoire. En effet, une même connaissance figurative s'exprime différemment dans des contextes opératoires distincts. Nous allons ainsi décrire la démarche du cytopathologue en terme de tâches et identifier alors les connaissances figuratives manipulées dans chacune de ces étapes opératoires.

L'examen des spécimens cytologiques s'effectue en général en deux étapes: une étape préliminaire, de repérage, conduite par les laborantines, suivie d'une étape d'interprétation, assumée par les pathologues.

L'étape préliminaire, conduite par des laborantines consiste à valider la préparation (tâche T1), puis à marquer les zones intéressantes de la préparation à l'aide d'un stylo (tâche T2). L'étape

d'interprétation, conduite par le pathologue, doit conduire à la mise en évidence, à l'identification et à l'interprétation des lésions bénignes ou malignes présentes dans la préparation. Elle implique la mise en oeuvre de trois tâches différentes: tâche d'analyse morphologique (T3), tâche d'identification cellulaire (T4) et enfin tâche d'interprétation diagnostique (T5).

La tâche finale, enfin, est la tâche de validation diagnostique (T6) : il s'agit ici d'exploiter les renseignements administratifs et cliniques attachés au patient examiné et de vérifier que le diagnostic proposé est consistant à leur égard.

## **1. La Tâche de Validation du Spécimen**

La tâche de validation (T1) est orientée vers l'acquisition de paramètres globaux de description du spécimen: cellularité et sociologie cellulaire, qualité de la coloration, par exemple. Des conditions de prélèvement et de préparation dépendent en effet l'aspect global du spécimen, sa lisibilité, et la qualité des indications morphologiques dont il est porteur: une coloration dense donnera à la chromatine nucléaire un aspect foncé, motté, empêchant toute lecture et interprétation précise de cet indicateur.

Un balayage grossier de la préparation est effectué (objectif 10) fondé sur la sélection aléatoire de quelques zones d'analyse. L'analyse des paramètres obtenus conduit à l'acceptation ou au rejet de la lame. Cette tâche conduit également, dans certaines situations extrêmement rares, à la formulation d'une hypothèse diagnostique: lorsqu'une zone présentant une malignité manifeste est repérée, elle est immédiatement explorée à fort grossissement.

## **2. La Tâche de Sélection**

La tâche de repérage (T2) s'effectue, elle, selon une démarche systématique d'exploration: elle vise à sélectionner un ensemble de champs pertinents d'analyse dont le contenu informatif devrait a priori permettre de guider la formulation diagnostique. Les critères de sélection (objectif 10) sont susceptibles d'impliquer autant des paramètres associés à la description du spécimen que des éléments de description diagnostique: lorsque la densité cellulaire est particulièrement faible, par exemple, tout champ comportant des cellules sera sélectionné; lorsqu'elle est normale, par contre, et que l'hypothèse diagnostique courante fait état d'une potentielle malignité, un champ ne sera sélectionné que s'il présente des cellules de morphologie "anormale".

Table 2: Représentation des tâches impliquées dans l'exploration des spécimen en cytologie.

Tâches	Entrée	Sortie	Objectif	Approche	Remarques
T1	Spécimen	Descripteurs Globaux du Spécimen	Inspection & Validation	Balayage Aléatoire	Non Orienté Diagnostic
T2	Spécimen	Champs Significatifs	Sélection de Champs Significatifs	Balayage Systématique	Fortement Dépendant du Contexte
T3	Champs Significatifs	Descripteurs Morphologies	Description Morphologie Cellulaire	Observation à Basse & Haute Résolution	L'Analyse Basse Rés. peut suffire
T4	Descripteurs Morphologies	Types Cellulaires	Identification Cellulaire	Prédiction Vérification	La Phase de Prédiction peut suffire
T5	Types Cellulaires	Diagnostic	Formulation du Diagnostic	Accumulation d'Evidences	Influence Recherches Ultérieures
T6	Diagnostic & Données Patient	Confirmation du Diagnostic	Validation du Diagnostic	Vérification de Cohérence	Peut Induire une Nouvelle Exploration

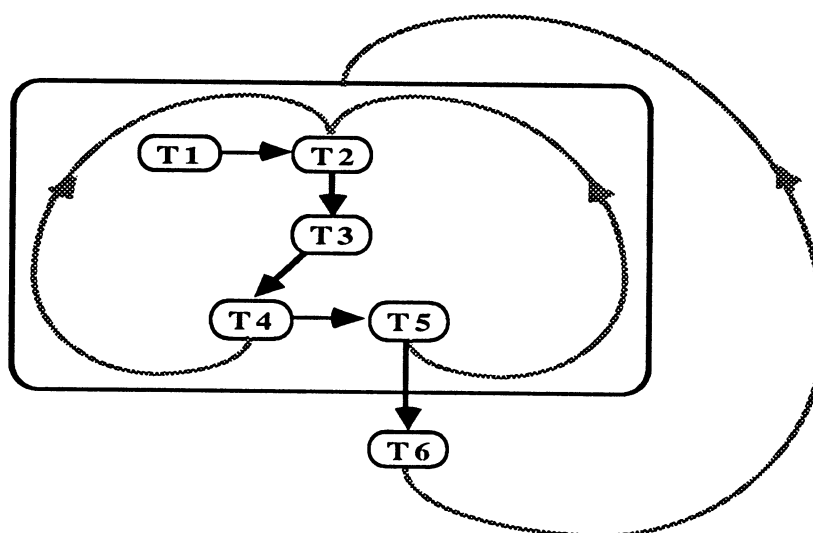


Figure 3 : Graphe de dépendance des tâches d'exploration du spécimen cytologique. Les flèches noires soulignent le séquençage des tâches, les flèches grises en soulignent les influences mutuelles.



Lors de cette exploration, l'attention est normalement attirée par les signes pathologiques ; si le spécimen néanmoins révèle une benignité apparente, et plus particulièrement en cas d'homogénéité des faciès cellulaires, une attention soutenue sera portée au spécimen, qui sera scruté en détail: un spécimen normal exprime toujours, en effet, une certaine hétérogénéité.

Il convient enfin de souligner qu'un spécimen, observé à l'objectif 10, se décompose en 180 zones différentes, dont 30 seulement seront finalement retenues, en moyenne. On conçoit donc l'importance de cette étape, sur le plan de la compression de données qui y est réalisée, et donc de la perte d'informations qu'elle est susceptible d'entraîner.

### **3. La Tâche d'Analyse Morphologique**

Les zones sélectionnées sont ensuite analysées plus en détail (Tâche 3), afin d'appréhender les morphologies et l'organisation des constituants présents. Une observation à faible résolution est tout d'abord pratiquée (objectif 10), qui peut être suivie d'un examen à haute résolution (objectif 40), lorsque l'identité cellulaire ne peut être affirmée avec certitude. Les critères morphologiques utilisés sont représentés dans la Table 3.

### **4. La Tâche d'Identification Cellulaire**

Il s'agit ici d'identifier les types des cellules présents dans la zone étudiée. Cette identification repose sur les indicateurs morphologiques obtenus lors de la tâche précédente (T3); elle s'effectue selon une stratégie de prédiction/vérification. Les indicateurs obtenus à faible grossissement sont utilisés en phase de prédiction, alors que les indicateurs "haute résolution" permettent une confirmation de cette hypothèse. Cette dernière phase n'est pas toujours engagée: un faible grossissement suffit par exemple à l'identification des adipocytes.

Chaque type cellulaire présente en principe un certain faciès morphologique qui le caractérise et permet aussi de le reconnaître. Cependant, entre deux cellules différentes, les dissemblances peuvent être infimes; elles peuvent au contraire révéler une forte hétérogénéité des faciès cellulaires alors que le type cellulaire concerné est le même. Cette variabilité morphologique est aussi contextuelle, l'environnement des cellules variant d'une lame à l'autre, d'une zone à l'autre d'une même lame. La difficulté est ainsi extrême de reconnaître une cellule donnée et d'expliquer formellement les raisons de cette reconnaissance. Un véritable savoir-faire est ici exercé au delà du savoir: c'est dans la représentation de ce savoir-faire, par définition non formalisable, que se fonde la démarche "système expert".

On trouvera en Table 3, résumées sous forme d'un tableau, les caractéristiques morphologiques essentielles à la description des différents types cellulaires :

- Adipocyte (AD) ;
- Fibro-blaste (FB) ;
- Noyau nu benin (NNB) ;
- Noyau nu malin (NNM) ;
- Métaplasie apocrine (MA) ;
- Cellule spumeuse (SP) ;
- Cellule épithéliale (EP) ;
- Cellule myoépithéliale (MEP) ;
- Cellule cancéreuse (CC).

**Table 3 : Caractéristiques morphologiques des types cellulaires essentiels au diagnostic (vue partielle).**

	AD	FB	NNB	NNM	MA	SP	EP	MEP	CC
Arrangement	Isolé Groupe	Isolé	Noyau	Noyau	Groupe Superp.	Isolé	Groupe Superp. Isolé	Isolé	Groupe Superp. Isolé
Taille	Grand	Petit Moyen	Petit	Petit	Moyen	Grand Moyen	Small	Petit	Grand Moyen
Forme	Rond	Allongé	/	/	Rond	Rond	Rond	Allongé	Rond Irrégul.
Cytoplasme	Homogène	Homogène	/	/	Red Granul	Vacuoli- sé	Homogène	Homogène	Homo. Vacuol.
Rapport N/C	Petit	Moyen	/	/	Moyen Petit	Petit	Moyen	Moyen	Grand Moyen
Nombre Vacuoles	Rare	Absent	Absent	Absent	Absent	Nom- breux	Absent	Absent	Rare
Taille Vacuoles	Grand	/	/	/	/	Petit	/	/	Grand Moyen

## 5. La Tâche d'Interprétation Diagnostique

L'ensemble des observations obtenues au cours des tâches précédentes, et particulièrement les identifiants cellulaires, conduit finalement à la formulation d'une hypothèse diagnostique (Tâche 4), progressivement documentée, confirmée ou infirmée, au cours des explorations ultérieures.

On trouvera en Table 4, résumées sous forme d'un tableau, une représentation des relations unissant les types cellulaires aux pathologies :

- Hyperplasie épithéliale (HEP);
- Adénome (AD);
- Fibro-adénome (FAD);
- Mastose (M);
- Kyste (K);
- Lipome (L);
- Cancer (C), auquel les grades 1, 2 ou 3 sont associés.

**Table 4** : Des types cellulaires aux pathologies (vue partielle).

Le signe \* signifie que le type cellulaire concerné est dans ce cas difficilement identifiable. Le signe / indique l'absence de cellules dans le type concerné.

	HEP	AD	FAD	M	K	L	C
AD	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 100	> 0
FB	< 20	< 20	> 20	< 20	/	/	/
NNB	/	/	> 0	/	> 0	/	> 0
NNM	/	/	/	/	/	/	> 0
MA	/	/	/	> 0	> 0	/	/
SP	> 0	> 0	> 0	> 50	> 50	/	> 0
EP	< 5	> 5	> 5	< 20	< 5	/	> 0
MEP	*	*	*	*	/	/	/
CC	/	/	/	/	/	/	> 0

Une forme pathologique unique est en principe observable sur une lame donnée, exception faite du kyste et de la mastose, susceptibles d'entraîner une dégénérescence maligne. Le lipome, quant à lui, est susceptible de se manifester simultanément avec toute autre pathologie.

Dans tous les cas, on remarque qu'il est très difficile de donner une description typique d'une manifestation pathologique donnée, dont les symptômes sont éminemment variables. En effet, du fait de la grande diversité des cellules et de leur apparence morphologique, il existe souvent une grande différence entre la manifestation observée et le cas typique.

Le diagnostic est progressivement formulé lors d'une démarche séquentielle et systématique d'examen des zones qui ont été sélectionnées. Lors de cette recherche, les éléments cellulaires les plus malins sont toujours conservés en mémoire, et servent de référence aux explorations ultérieures. Dans ce processus, une nouvelle référence est créée dès lors qu'une manifestation jusqu'alors inconnue est rencontrée. Ceci est susceptible d'impliquer des retours arrière visuels et/ou mentaux visant à comparer différentes zones entre elles. Cette démarche permet de noter la présence de toutes les manifestations pathologiques et d'éliminer les manifestations rares et/ou peu significatives. Lorsqu'une manifestation pathologique d'un type donné n'a pu être observée que très rarement, la lame est entièrement réexaminée afin de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse diagnostique sous-jacente.

Un "ordonnement" des références mentales par malignité décroissante est sans doute effectué: il permet de situer rapidement une nouvelle manifestation, par son degré de malignité, la fréquence d'apparition des symptômes venant compléter ce système mental de référence.

Lorsqu'une zone se rapportant à une référence connue est rencontrée, la structure mentale qui lui est associée est rappelée en mémoire. Si la structure est restée longtemps sans être évoquée, elle est peu à peu oubliée. Selon l'importance des pertes dues à ce phénomène d'oubli, un retour arrière physique pourra être invoqué, permettant le rafraîchissement de la structure mentale. La structure évoquée est alors modifiée en fonction des éléments observés. Ces modifications pourraient s'apparenter à un processus de généralisation de la connaissance, la structure référentielle étant considérée comme un "prototype" représentant un type cellulaire donné.

Ces modifications permettent en effet :

- de rassembler autour d'une même structure tous les indicateurs s'apparentant à un même manifestation pathologique, quelque soit leur variabilité ;
- de généraliser par conséquent certaines caractéristiques communes aux éléments rencontrés ;
- d'approfondir le savoir-faire pour identifier un type cellulaire donné ;
- de reconnaître un élément d'un type cellulaire donné même s'il présente de fortes variations morphologiques par rapport aux cas "d'école" (apprentissage dynamique) ;
- de stocker en mémoire les seules classes génériques, prototypes des divers éléments rencontrés.

Ceci explique le fait que l'expert examine de plus en plus superficiellement les zones d'une lame se rapportant à une même référence, jusqu'à noter seulement leur présence dans le cas le plus extrême. L'accroissement des zones observées permettant de créer un prototype suffisamment générique, l'apparition de nouvelles zones n'apporte aucune nouvelle information, hormis l'incrémentation du nombre d'éléments rencontrés pour un type donné.

## **6. La Tâche de Validation du Diagnostic**

Le dossier médical du patient comporte son nom, son âge et son sexe, ainsi que toute information sur son passé médical, telles que opérations chirurgicales, traitements passés ou en cours. Il comporte également les compte-rendus des différents examens médicaux déjà subis.

Ce dossier est consulté par le cytopathologue lorsque l'examen du spécimen est terminé. Une observation "en aveugle" des spécimens est en effet requise pour garantir l'objectivité diagnostique. Une fois ce dossier consulté, le cytopathologue peut revenir sur certaines zones et modifier son diagnostic à leur rencontre.

## Conclusion

Nous avons présenté l'expertise du cytopathologue, telle que le Pr. Seigneurin nous l'a transmise. Trois niveaux essentiels de formalisation sont apparus, celui de la démarche, celui du savoir-faire (analyse des tâches entreprises) et celui du savoir (analyse des éléments de connaissances manipulés). Plusieurs formes de représentation de cette expertise nous ont aidé à la "capturer" :

- au niveau de la démarche, il s'agit du graphe de dépendance des tâches (Figure 3);
- au niveau des tâches, il s'agit d'une structure formelle de représentation (Table 2);
- au niveau du savoir enfin, il s'agit des matrices d'association représentées dans les Tables 3 et 4.

La modélisation de l'expertise en cytopathologie se révèle très complexe du fait de l'hétérogénéité des éléments de connaissance manipulés (images, descripteurs morphologiques, diagnostics) mais aussi de la variété des tâches qui ressortent de la démarche de l'expert.

Des éléments associés à des niveaux d'abstraction différents (correspondance entre des fréquences d'apparition de types cellulaires et des formulations diagnostiques, par exemple), impliquent des raisonnements mis en jeu à différents niveaux d'abstraction (exploration du spécimen, recherche d'événements rares, analyse morphologique, identification cellulaire, formulation diagnostique,...), ce qui complique le processus de modélisation.

En outre, la complexité de cette modélisation augmente du fait qu'au sein d'une tâche diverses formes de raisonnements peuvent avoir lieu. La tâche d'exploration du spécimen par exemple, implique les deux raisonnements suivants : un raisonnement qui détermine la sélection d'une des stratégies d'exploration ainsi qu'un autre raisonnement qui détermine la sélection des champs significatifs.

Des raisonnements plus complexes sont enfin mis en œuvre, dont l'objectif est d'articuler correctement deux ou plusieurs des tâches ou d'intégrer des raisonnements différents au sein d'une même tâche.

Nous faisons donc face à des problèmes techniques de représentation tant au niveau des connaissances qu'au niveau des raisonnements. Cela démontre l'intérêt de disposer d'une typologie des connaissances et/ou des raisonnements facilitant ainsi le processus de modélisation.



## *Les connaissances*

---

<b>Introduction</b> .....	87
<b>1. Axe fonctionnel d'organisation de la connaissance</b> .....	88
1.1. Connaissances figuratives.....	88
1.2. Connaissances opératoires.....	88
1.3. Connaissances réflexives.....	90
<b>2. Axe structurel d'organisation de la connaissance</b> .....	91
2.1. Connaissances intrinsèques.....	91
2.2. Connaissances contextuelles.....	92
2.3. Connaissances compositionnelles.....	94
2.4. Connaissances taxinomiques.....	94
2.5. Connaissances causales.....	96
<b>3. Axe d'organisation de la connaissance     par niveaux d'abstraction &amp; domaines d'application</b> .....	98
3.1. Connaissances générales, opératives et routinières.....	98
3.2. Connaissances profondes et de surface.....	99
<b>Conclusion</b> .....	101





# *Les connaissances*

---

### **Introduction**

Notre problème concret de modélisation, développé dans le chapitre précédent, nous a fait comprendre, du fait de la complexité de l'expertise humaine, de l'existence de problèmes techniques de représentation tant au niveau des connaissances qu'au niveau des raisonnements. Une nécessité de disposer d'une typologie des connaissances et/ou des raisonnements facilitant ce processus de modélisation s'est également révélée tout au long de la partie A.

Notre but ici est donc de proposer une typologie formelle pour la classification des connaissances, nous permettant de "connaître la connaissance" et ainsi non seulement de faciliter le processus de modélisation pour la transcription de connaissances mais aussi d'étudier le raisonnement dans sa nature intrinsèque, c'est-à-dire selon la nature des connaissances manipulées. Cette typologie nous permettra en outre, de faciliter le développement d'une conception "centrée-utilisateur" et guidera la conception informatique de l'application.

La typologie formelle des connaissances définit une classification des connaissances fondée selon divers axes d'organisation soulignant les propriétés et différences qui décrivent chacune des classes et sous-classes ainsi identifiées.

Nous proposons de distinguer quatre axes d'organisation de la connaissance : l'axe fonctionnel, l'axe structurel, l'axe des niveaux d'abstraction et l'axe des domaines d'application. Nous allons explorer tout d'abord l'axe fonctionnel d'organisation de la connaissance, qui implique une distinction entre connaissances figuratives (objets), opératoires (actions), réflexives (connaissance sur la nature de la connaissance) et heuristiques (connaissance sur l'exploitation de la connaissance). Les autres axes seront ensuite introduits, qui permettront de considérer ces connaissances respectivement selon les perspectives structurelle, des niveaux d'abstraction et des domaines d'application .

## 1. Axe fonctionnel d'organisation de la connaissance

Dans les apports de la psychologie cognitive à l'étude des activités cognitives de l'être humain une des approches est l'approche fonctionnaliste, engendrée par les travaux des chercheurs nord-américains comme Newell et Simon ; elle étudie les connaissances individuelles à travers leurs fonctions, leurs rôles et les traitements possibles sur celles-ci (Aussenac 89).

Nous proposons ici de distinguer entre connaissances figuratives, opératoires, réflexives et heuristiques. Cette distinction est une distinction de type fonctionnel, qui recouvre effectivement les grandes classes de connaissances utiles au raisonnement médical. En effet la notion de tâche (connaissance opératoire) a été utilisée de façon centrale dans la description proposée. Au chapitre I, ces tâches ont été décrites comme manipulant des connaissances de types différents telles que des éléments de description (connaissances figuratives) présentant souvent un caractère incertain ou imprécis (connaissances réflexives). Enfin, ces diverses connaissances sont exploitées selon des stratégies particulières (connaissances heuristiques).

### 1.1. Connaissances figuratives

Une connaissance figurative (ou objet) permet de nommer et de décrire les éléments d'un problème tels que données, faits, hypothèses ou résultats. Quelques exemples de connaissances figuratives manipulées pour le diagnostic cytologique sont une image d'un spécimen, un champ d'observation, une morphologie cellulaire ou une pathologie.

D'autres types de connaissances doivent être introduites pour décrire complètement les connaissances figuratives : pour décrire leurs propriétés (cellularité d'un spécimen, par exemple), pour déterminer leur contexte (topographique ou conceptuel) d'apparition (des noyaux nus malins sont présents de façon isolée, par exemple), pour décrire leur caractère simple ou composite (une cellule est composée d'un noyau et d'un cytoplasme, par exemple), pour présenter les hiérarchies de généralisation / spécialisation qui leur sont attachées (une hiérarchie de pathologies, par exemple) ou pour décrire les relations de cause à effet unissant leurs composants (une relation causale peut être établie entre la présence du type cellulaire "fibro-blaste" et la pathologie "fibroadénome"). Ces connaissances à caractère structurel seront développées lors de l'étude de l'axe structurel d'organisation de la connaissance.

### 1.2. Connaissances opératoires

Une connaissance opératoire (ou action), telle une procédure de traitement ou une action d'inférence, permet de manipuler des éléments figuratifs de connaissance. On peut classer les

connaissances opératoires selon les axes structurels unissant les connaissances figuratives manipulées. On distingue ainsi les tâches de description et mise en correspondance (l'évaluation d'une déviation morphologique, par exemple), les tâches de focalisation (sélectionner un champ d'exploration, par exemple), les tâches de perception (compter le nombre de cellules dans un champ, par exemple), les tâches de classification (classer une pathologie dans une hiérarchie de pathologies, par exemple) et les tâches de déduction (la présence du type cellulaire "cancer" implique la pathologie cancer, bien évidemment). Ces connaissances à caractère structurel seront développées dans l'étude de l'axe structurel d'organisation de la connaissance.

De même que pour les connaissances figuratives, d'autres types de connaissances doivent être introduites pour décrire complètement les connaissances opératoires, les connaissances sont les suivantes :

- intrinsèques, qui décrivent les propriétés de l'action (complexité par exemple) ;
- contextuelles, qui décrivent le contexte d'exécution de l'action ;
- compositionnelles, qui décrivent la structure de l'action ;
- taxinomiques, qui déterminent le type de l'action ;
- causales, qui infèrent l'effet de l'application de l'action, ou qui expriment des relations de cause à effet entre actions.

Il convient par ailleurs de distinguer entre actions d'afférence (globalement actions dont le but est la production de nouvelles connaissances) et actions d'efférence (actions déclenchées par l'introduction d'une nouvelle connaissance). Des exemples d'action d'afférence sont les actions de description, de perception et de déduction. Des actions d'efférence bien connues sont les actions de propagation et de focalisation.

Notons qu'une connaissance peut être exprimée indistinctement sous forme figurative ou opératoire selon l'utilisation que l'on veut faire de cette connaissance. C'est le cas par exemple de l'assertion suivante (Ziébelin 90) : "*une barre en fer est en métal*" pouvant être traduite sous la forme de deux connaissances figuratives : "*barre fer*", "*fer métal*", ou sous la forme d'une connaissance opératoire (une action d'inférence dans ce cas) : "*SI x est en fer ALORS x est en métal*".

Enfin, dans certains contextes de traitement il est courant de faire appel à la notion de tâche (décomposition en tâches, par exemple) plutôt qu'à la notion d'action ; il convient donc de les distinguer. Soulignons qu'une tâche se distingue essentiellement de l'action par son attachement à la démarche de résolution de problèmes. Ainsi, deux tâches distinctes, impliquées

dans deux phases différentes de résolution, peuvent impliquer des actions identiques, ces actions définissant un ensemble d'activités non spécialisées, c'est-à-dire indépendantes du problème à résoudre.

### 1.3. Connaissances réflexives et heuristiques

On appelle connaissance réflexive tout élément de connaissance précisant la nature d'une connaissance sur un domaine particulier. Une connaissance (figurative ou opératoire) sera ainsi qualifiée de : vague ou imprécise, incertaine, ambiguë, complète ou parcellaire, cohérente ou conflictuelle, ...

Trois types de connaissances réflexives peuvent être distingués (Aussenac 89) :

- connaissances vagues ou imprécises : le degré de valeur logique de ces connaissances ne peut pas être mesuré, c'est-à-dire qu'elles n'engendrent pas deux classes distinctes d'objets ceux pour qui l'affirmation est vraie, ceux pour qui elle est fautive. C'est le cas, par exemple, des attributs caractérisant les descripteurs morphologiques des types cellulaires.
- connaissances incertaines : il s'agit des formules dont on a une idée de la fausseté ou de la vérité, mais dont la valeur "absolument vraie" ou "absolument fautive" ne peut pas être affirmée. C'est ainsi, lors de la formulation diagnostique par exemple, que la présence des pathologies n'est qualifiée qu'avec un certain degré de vraisemblance tel que "absent", "peu-probable", "incertain", "peut-être", "sans-doute" ou "vraisemblable".
- connaissances ambiguës : il s'agit d'une connaissance qui peut être interprétée de diverses façons. Le problème de l'apparence cellulaire est bien un exemple de ce type de connaissances.

On appelle connaissance heuristique tout élément de connaissance précisant les formes et conditions possibles d'exploitation d'une connaissance : deux classes d'heuristiques seront distinguées, selon qu'elles concernent l'exploitation de connaissances figuratives ou opératoires.

Ces deux classes de connaissances - réflexive et heuristique - sont toutes deux des connaissances sur la connaissance ; elles sous-tendent l'expression de formes variées de raisonnement et seront examinées plus en détail dans ce cadre.

## **2. Axe structurel d'organisation de la connaissance**

Dans les apports de la psychologie cognitive à l'étude des activités cognitives de l'être humain l'approche structuraliste constitue un courant de pensée particulier. Piaget (Piaget 76) s'est en particulier consacré à l'étude des structures de connaissances dont dispose un sujet (nature des structures, mode de création, d'évocation et processus d'évolution) (Aussenac 89).

Une connaissance structurelle est définie ici comme un arrangement de connaissances reliées par des associations de nature diverses. Deux structures particulières sont très utilisées dans ce but : des arbres et des graphes. La première est à la base des connaissances taxinomiques et la seconde peut être utilisé pour exhiber des relations de cause à effet entre connaissances. Cette dernière structure est ainsi appelée graphe de causalité.

Selon l'axe structurel d'organisation de la connaissance, nous distinguons les connaissances intrinsèques, contextuelles, compositionnelles, taxinomiques et causales, mentionnés auparavant.

### **2.1. Connaissances intrinsèques**

Les connaissances intrinsèques décrivent les propriétés attachées aux connaissances. Il s'agit de déterminer des propriétés représentatives capables de décrire, d'identifier et de différencier une connaissance par rapport à d'autres. C'est ainsi par exemple que l'on peut déterminer pour les objets visuels des descripteurs morphologiques tels la taille, la forme, la texture, la couleur, l'épaisseur... ou des descripteurs de malignité tels le grade ou le stade d'une tumeur.

La notion d'objet de référence peut être introduite ici définissant un objet type ou objet "norme" décrit au travers de valeurs de propriétés précisées préalablement. Cet objet de référence sera utilisé ultérieurement pour identifier les objets inconnus.

D'autres types de propriétés peuvent aussi décrire la nature interne ou comportement développé par un objet ou une action : actif ou passif, statique ou dynamique, permanent ou évolutif, ...

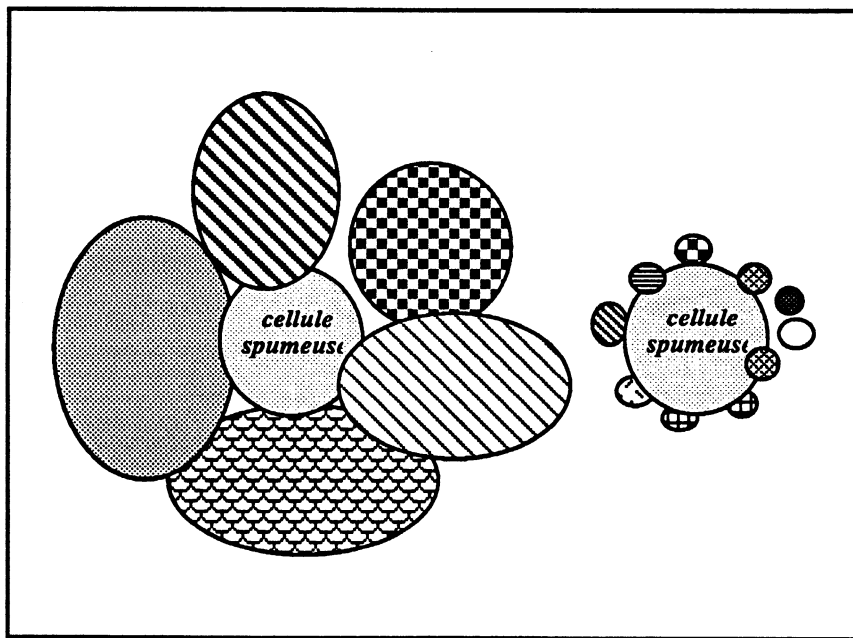
Des connaissances intrinsèques décrivant des connaissances opératoires pour les actions de "magnification" et d'"identification" sont respectivement : action manuelle, simple et rapide, résultat fiable et action intellectuelle, complexe, résultat incertain, par exemple.



**Figure 2 :** Les connaissances intrinsèques pour une image cellulaire : trois classes de cellules qui se différencient par la propriété de niveaux de gris.

## 2. Connaissances contextuelles

Une connaissance contextuelle permet de focaliser ou de situer un objet ou une action dans un contexte précis. Un même objet placé dans des contextes différents sera vu différemment : un objet n'aura pas la même taille apparente selon qu'il est entouré d'objets de grosses ou de petites tailles (c.f. figure 4).



**Figure 4 :** Erreur d'interprétation visuelle due au contexte d'apparition d'une cellule spumeuse : la cellule spumeuse de gauche, entourée des cellules de grandes taille semble plus petite que celle de droite, entourée celle-ci des cellules de petite taille.

Enfin, le contexte peut permettre d'inférer un certain nombre de situations, configurations ou éléments attendus : proportions ou types des objets composant la scène par exemple. Il permet dans ces cas la détection rapide d'événements non prévus, tels la présence d'un objet non attendu.

Du point de vue topologique, le rôle des connaissances contextuelles est de définir et de prédire la disposition relative des objets dans une scène donnée (respect des contraintes habituelles d'organisation spatiale).

Une action selon le contexte, peut s'avérer pertinente ou déplacée ; elle peut s'avérer plus ou moins performante. C'est par exemple le cas de l'action d'exploration d'un spécimen pour qui engager l'exploration n'est pertinente que si une validation du spécimen a eu déjà lieu, ou bien l'action de décrire une cellule n'a de sens que si le champ observé n'est pas vide.

**Table 5** : Exemple des tâches et de leurs descriptions en actions : on observe que trois tâches différentes impliquent les mêmes actions, mise en œuvre sur des connaissances figuratives différentes, avec des perspectives différentes : observer s'applique à l'image dans les deux premiers cas et à collection de types cellulaires dans le dernier.

Tâches spécifiques	Actions générales
Valider spécimen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- compter des éléments significatifs ;</li> <li>- observer apparence ;</li> <li>...</li> </ul>
Identifier types cellulaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>- observer apparence ;</li> <li>- décrire morphologies ;</li> <li>- inférer type ;</li> <li>...</li> </ul>
Interpréter spécimen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- collecter des types cellulaires</li> <li>- inférer type de pathologie selon des scores des types cellulaires;</li> <li>...</li> </ul>



### 2.3. Connaissances compositionnelles

Une connaissance compositionnelle décrit le caractère simple ou composite d'un objet ou d'une action. Pour un objet donné, il s'agit par exemple de déterminer si l'objet est composé d'autres objets ou s'il détermine en lui même une unité indécomposable.

Une organisation spatiale sera facilement décrite par le biais des connaissances compositionnelles : pour chaque niveau d'abstraction spatiale il s'agit de déterminer les liens de composition unissant les objets entre eux. En outre, des liens de composition peuvent être identifiés qui relient les divers niveaux d'abstraction spatiale (niveaux de représentation).

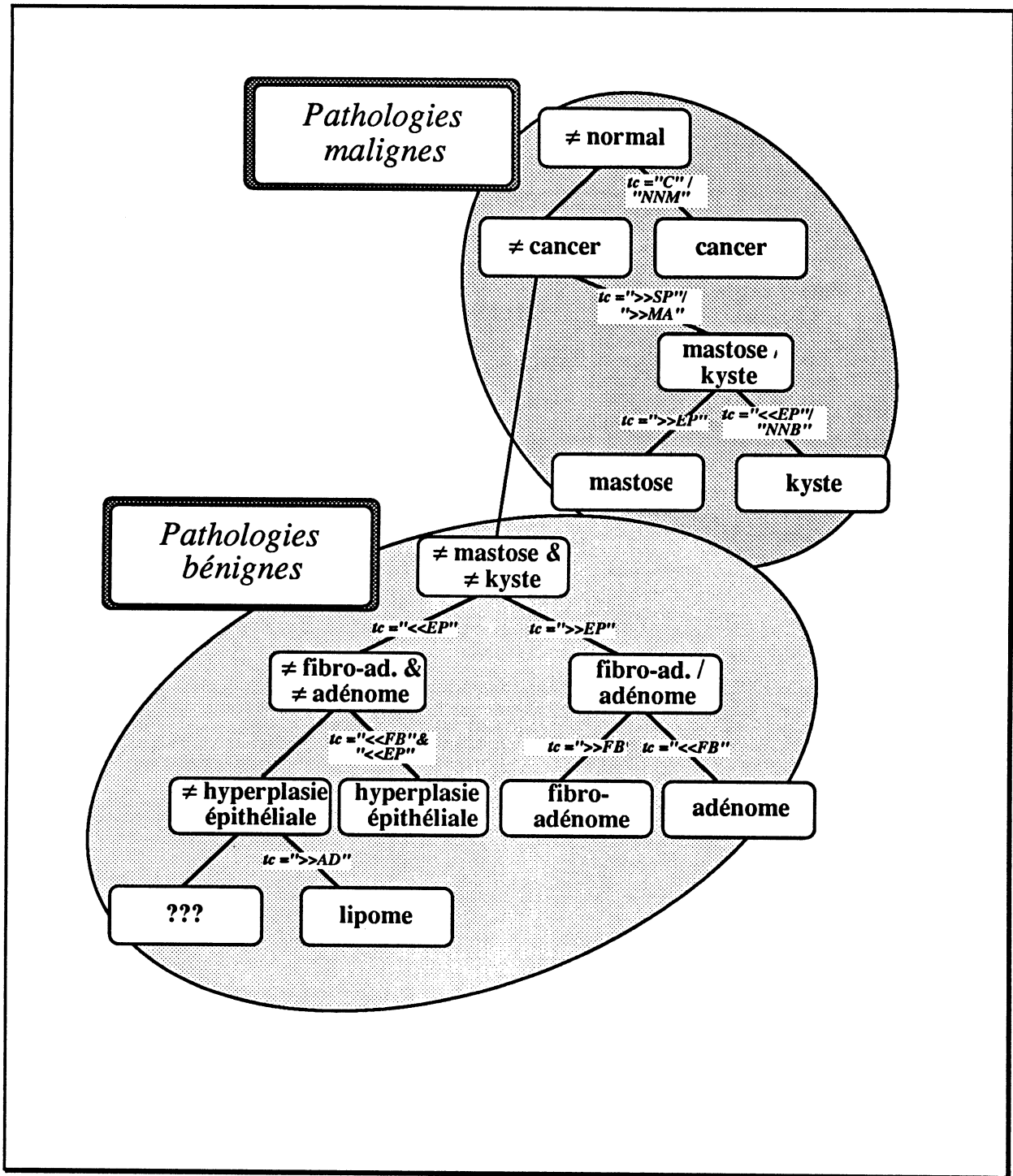
Par ailleurs, une connaissance compositionnelle attachée à une action permet d'appréhender son implication dans des tâches distinctes d'un processus de résolution (Table 5).

### 2.4. Connaissances taxinomiques

On appelle taxinomie toute structure pouvant se décrire sous forme d'un arbre dont les nœuds sont des connaissances figuratives ou opératoires reliées par des relations hiérarchiques de spécialisation. Une taxinomie présente donc un élément supérieur, la racine de l'arbre, et une relation d'ordre partiel définissant les liens entre les nœuds.

La taxinomie qui est montrée dans la figure 5 établit une relation d'ordre partiel entre diverses pathologies. Cette relation d'ordre concerne le "degré de malignité" des pathologies impliquées dans le diagnostic du cancer du sein. Ainsi, alors que la pathologie "cancer", dont l'affirmation ou l'infirmité est l'objectif essentiel du diagnostic, est trouvée au plus haut de l'arbre, la pathologie "lipome", qui s'avère la plus bénigne des pathologies, est placée en bas de l'arbre. Dans cette taxinomie, une structure apparaît sous la forme des deux sous-arbres : le premier contient les pathologies susceptibles d'évolution maligne et le second contient les pathologies bénignes.

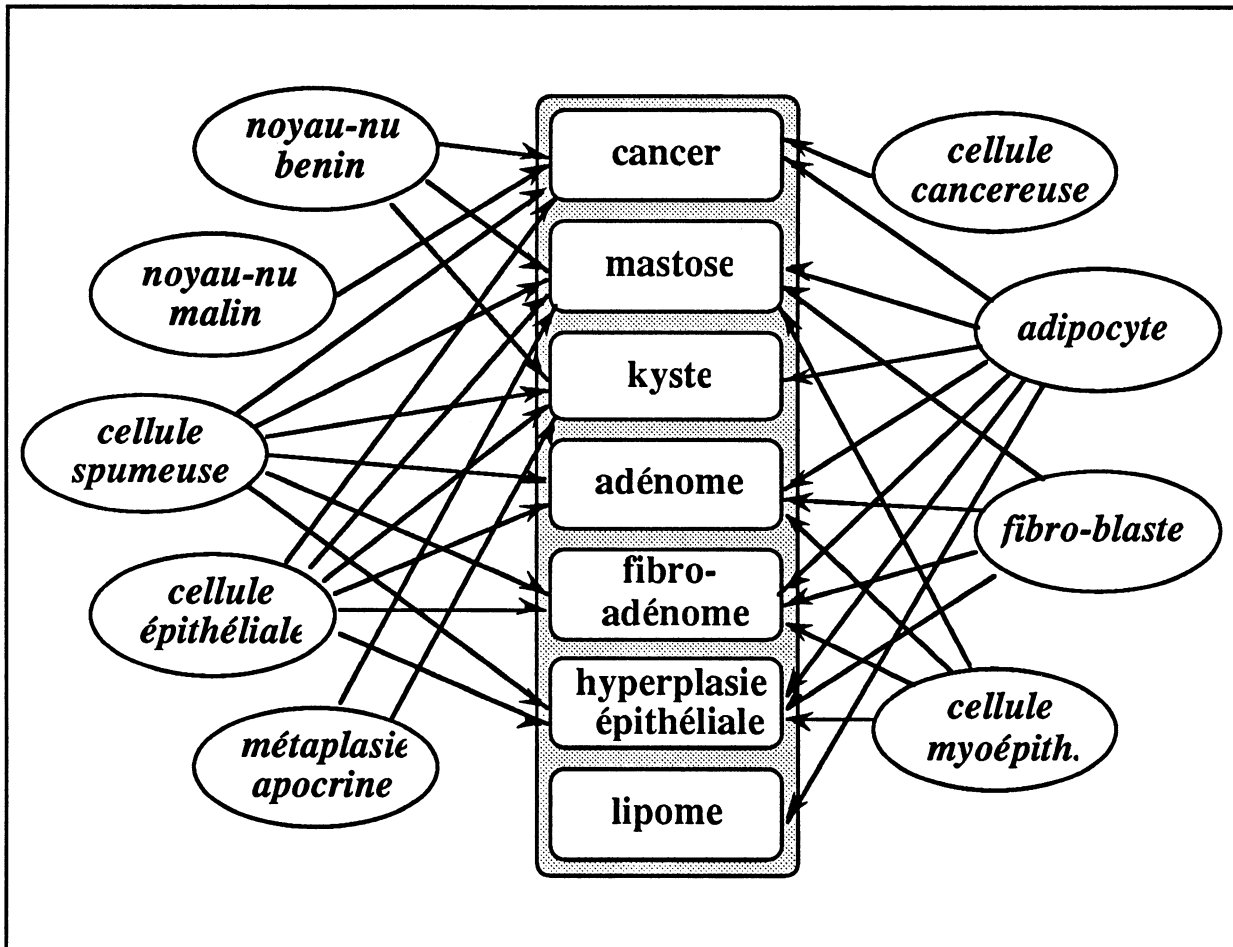
Parmi les systèmes experts, certains se fondent sur la notion de "taxinomies conceptuelles" (ou "conceptuel clustering") (Michalski 83). Une étude approfondie sur la construction automatique de taxinomies conceptuelles à partir d'exemples dans un modèle de connaissances par objets a été effectuée par (Aguirre 89) dans le cadre de l'apprentissage automatique.



**Figure 5 :** Taxinomie des pathologies impliquées dans le diagnostic du cancer du sein. Une combinaison appropriée des scores des types cellulaires (tc) conduira à une des pathologies à tendance maligne ou bénigne.

### 2.5. Connaissances causales

Les connaissances causales décrivent les relations de cause à effet unissant les variables d'un système (physique ou biologique) et son état observé (panne ou maladie).



**Figure 6 :** Graphe de causalité décrivant les relations de cause à effet entre types cellulaires et pathologies dans la démarche experte pour le diagnostic du cancer du sein. La colonne centrale regroupe les diverses pathologies entourée des types cellulaires y intervenant.

Le diagnostic de pannes est la principale application des graphes de causalité et la propagation de cause à effet est le schéma de base de son raisonnement. Le graphe de causalité qui est montré dans la figure 6 aide à décrire les relations de cause à effet entre types cellulaires et pathologies impliquées le cytodagnostic des cancers du sein. Il s'agit d'un graphe orienté dont les nœuds centraux représentent les diverses pathologies et les symptômes sont les divers types cellulaires représentés en périphérie.

Les graphes de causalité ne sont pas une invention récente ; les économistes les utilisaient déjà dans les années 50 pour analyser les propriétés de leurs modèles. L'étude de leurs extensions et des mécanismes d'inférence qui leur sont applicables revient cependant essentiellement au domaine de l' Intelligence Artificielle.

La simplicité des graphes de causalité masque deux difficultés (Page 90). Tout d'abord, la relation de cause à effet est imprécise : l'assertion "l'âge favorise l'apparition de certaines maladies" ne signifie pas de façon précise qu'une relation de cause à effet existe entre l'âge et la maladie. La seconde difficulté est liée à la faible quantité d'information contenue dans la représentation. L'existence de liens de causalité est souvent insuffisante pour raisonner sur le comportement d'un système : l'intensité des relations, leur probabilités, leur durée, etc s'avèrent fréquemment nécessaires.

**Table 6** : Connaissances figuratives par niveaux d'abstraction dans l'expertise médicale en cytologie mammaire.

niveaux de représentation	connaissances figuratives
niveau image	spécimen
	champ basse résolution
	champ haute résolution
niveau descripteurs de l'image	morphologie cellulaire
	constituant cellulaire
niveau interprétation	type cellulaire
	pathologie

### 3. Axe d'organisation de la connaissance par niveaux d'abstraction & domaines d'application

Il convient de noter que les connaissances figuratives, opératoires, heuristiques et réflexives sont susceptibles de se distribuer sur plusieurs niveaux d'abstraction : en vision par exemple, on distinguera les niveaux sensoriels, perceptuels, iconiques et sémantiques. Parmi ces connaissances, certaines dépendent du domaine d'application considéré, alors que d'autres présentent un caractère plus général : toujours en vision, il est usuel de considérer que les connaissances de "bas" niveau sont générales alors que les connaissances de "haut" niveau dépendent de l'application considérée.

Nous présentons dans la table 6 la distribution par niveaux d'abstraction des diverses connaissances figuratives utilisées en cytopathologie.

Les deux typologies proposées ci-après sont un exemple d'organisation impliquant la notion de domaine d'application (Aussenac 89).

#### 3.1. Connaissances générales, opératives et routinières

Les **connaissances générales** correspondent à des connaissances de bon-sens. L'expert ne les applique pas directement pour exécuter des tâches habituelles, mais dans des situations, nouvelles ou exceptionnelles, qu'il ne sait pas traiter a priori. Leur généralité rend ces connaissances versatiles mais elles sont lourdes à manipuler car non finalisées.

Les **connaissances opératives**, au contraire sont finalisées et spécifiques d'un domaine ou d'une tâche. L'acquisition de telles connaissances découle de la pratique répétée d'une tâche, d'une série d'expériences pratiquées de façon analogue dans un *environnement imparfaitement stable*. Elle correspond à la mémorisation d'un schéma sous-jacent aux représentations élaborées par le sujet en fonction des circonstances.

Les **connaissances routinières**, très familières pour le sujet, sont des automatismes de traitement, mis en œuvre en l'absence d'un contrôle conscient. Ces connaissances ne sont générées qu'après la répétition d'une série de situations correspondant à des conditions extrêmement proches. L'automatisation se traduit par une sorte de compilation des procédures de résolution, c'est-à-dire un affinage par élimination des informations non directement pertinentes dans ces procédures.

### 3.2. Connaissances profondes et de surface

La principale caractéristique et en même temps limitation des systèmes à base de connaissances de première génération tels que MYCIN ou PROSPECTOR est la priorité absolue accordée aux connaissances opératives et routinières. En vue de surmonter les limitations des premiers systèmes, de nouvelles recherches font appel à des connaissances plus générales désignées par l'appellation de **connaissances profondes**, fondement des systèmes à base de connaissances de seconde génération. Ces connaissances, à caractère théorique ou fondamental, permettent de structurer le domaine d'application.

Le principal intérêt des **connaissances profondes** est leur adaptabilité à la résolution de nouveaux problèmes. En outre, les connaissances profondes doivent être en mesure d'expliquer, de justifier et de donner des indications sur le raisonnement suivi par l'expert pour traiter un problème.

En opposition, on appelle **connaissances de surface** (c'est-à-dire opératives et routinières), des raccourcis de raisonnement ou heuristiques de décision formés à partir de connaissances profondes. Les connaissances de surface sont des connaissances utilisées par l'expert pour traiter un problème particulier, c'est à dire des règles heuristiques et des procédures qui correspondent à l'adaptation de son mode de raisonnement à la situation. Elles peuvent également recouvrir des associations empiriques ou "fortuites", dont la justification est alors malaisée. Ces connaissances, contrairement aux connaissances profondes, ne sont pas adaptées à la résolution de nouveaux problèmes.

Le tableau suivant et la figure 6 sont un essai de récapitulation des différents axes d'organisation de la connaissance. On peut avancer que des connaissances figuratives, opératoires et réflexives peuvent être considérées comme des connaissances profondes dès lors qu'elles s'organisent au sein d'un réseau complexe impliquant des connaissances intrinsèques, contextuelles, compositionnelles, taxinomiques et causales variées.

Organisation de la connaissance			
Axe fonctionnel	Axe structurel	Axes des niveaux d'abstraction & domaine d'application	
connaissances figuratives, opératoires, réflexives & heuristiques	connaissances intrinsèques, contextuelles, compositionnelles, taxinomiques & causales	connaissances profondes  connaissances de surface	connaissances générales  connaissances opératives  connaissances routinières

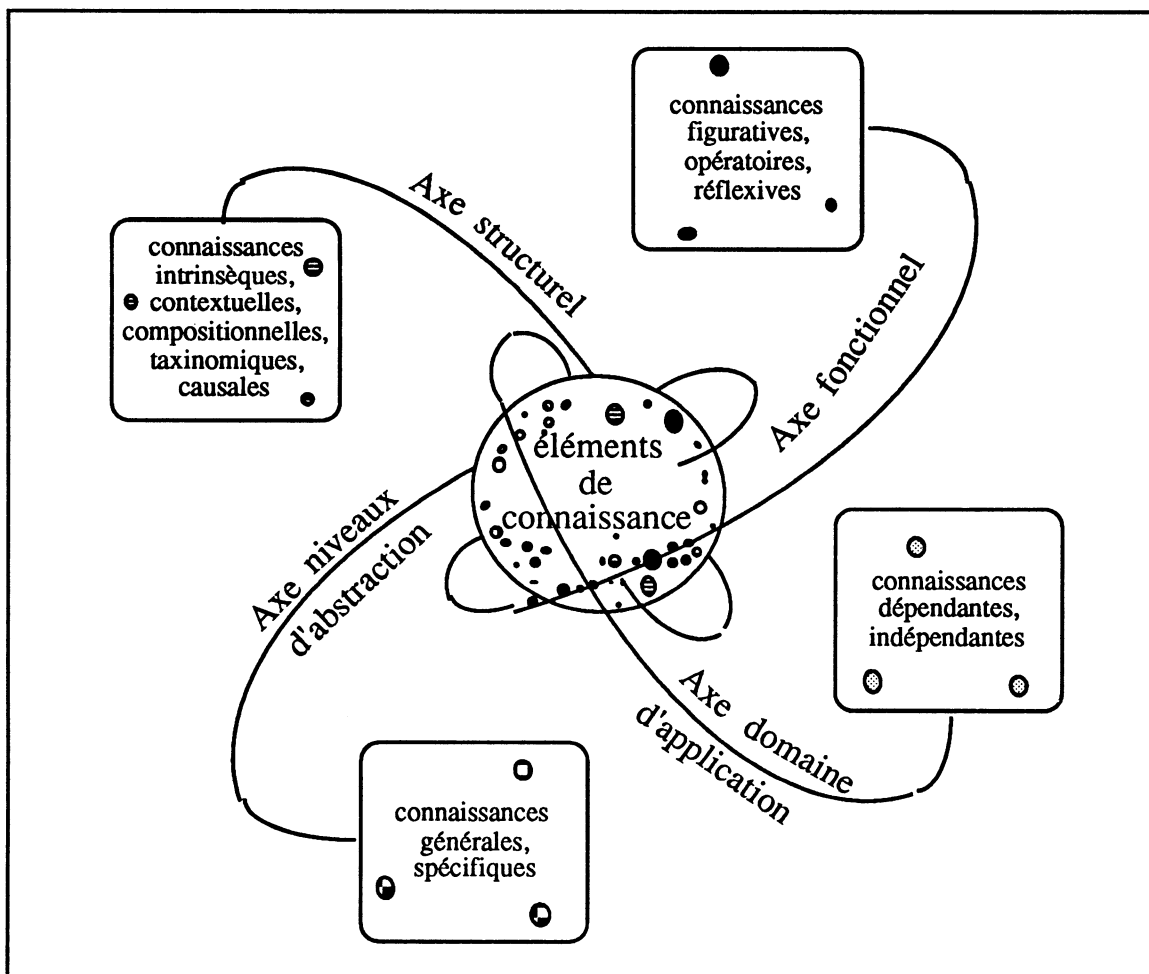


Figure 6 : Schéma récapitulatif des quatre axes principaux d'organisation de la connaissance.

## Conclusion

La connaissance s'exprime de façons très diverses selon son rôle, sa fonction ou les traitements qu'elle assume ou subit à un moment donné. Nous distinguons ainsi les connaissances à caractère figuratif, opératoire, réflexif mais aussi les connaissances à caractère routinier, ou opératif. En outre, ces connaissances s'organisent souvent au sein d'une structure en exprimant ainsi diverses formes d'interactions et interdépendances.

L'étude des diverses formes de connaissances, organisées selon une typologie formelle, s'avère indispensable pour l'appréhension des aspects intrinsèques du raisonnement. Parmi quelques uns des avantages de proposer une typologie des connaissances citons les suivants:

- une connaissance peut être jugée d'après divers critères, sa dépendance ou indépendance au domaine d'application, son niveau d'abstraction dans la résolution, son caractère opératoire ou réflexif, ... ;
- la modélisation des connaissances est facilitée par la structuration faite selon les axes d'organisation des connaissances manipulées ;
- il apparaît que des catégories différentes de raisonnement se distinguent selon le type de connaissances manipulées à un instant donné.

Cette typologie formelle présente néanmoins des points faibles :

- du fait de son caractère souple et ouvert, une sensation d'éparpillement peut être éprouvée ;
- des relations nombreuses associent les diverses catégories de connaissances identifiées ;

La contrepartie en est la difficulté à en retirer une vision claire et structurée.





## *Le raisonnement*

---

<b>Introduction</b> .....	105
<b>1. Raisonnements primaires</b> .....	106
1.1. Typologie fonctionnelle des raisonnements.....	106
1.1.1. Raisonnement figuratif.....	106
<i>forme spatiale</i> .....	107
<i>forme symbolique</i> .....	108
<i>forme temporelle</i> .....	109
1.1.2. Raisonnement opératoire.....	110
1.1.3. Raisonnement réflexif .....	110
<i>forme incertaine ou imprécise</i> .....	111
<i>forme non-monotone</i> .....	113
1.2. Typologie structurelle des raisonnements .....	115
1.2.1. Raisonnements intrinsèques .....	115
1.2.2. Raisonnements contextuels .....	116
1.2.3. Raisonnements compositionnels .....	117
1.2.4. Raisonnements taxinomique et causaux.....	118
1.3. Typologie des raisonnements par niveaux d'abstraction et domaine d'application .....	119

<b>2. Raisonnements hybrides .....</b>	<b>121</b>
2.1. Raisonnements hybrides simples.....	121
<i>forme hypothétique et incertaine .....</i>	<i>121</i>
<i>forme hybride figurative et opératoire .....</i>	<i>121</i>
<i>formes causale et temporelle.....</i>	<i>122</i>
<i>formes temporelle et non monotone .....</i>	<i>122</i>
2.2. Raisonnements hybrides complexes.....	122
<b>Conclusion .....</b>	<b>125</b>

## Chapitre III

---

### *Le raisonnement*

---

#### **Introduction**

Ce chapitre concerne l'étude du paradigme du raisonnement analysé selon sa nature intrinsèque, c'est-à-dire selon la nature des connaissances manipulées. Un raisonnement est défini comme un enchaînement de jugements visant à décider des actions à entreprendre et des éléments auxquels appliquer ces actions. Il est défini de façon déclarative par le biais d'heuristiques. La nature du raisonnement dépend ainsi étroitement des éléments (objets et actions) manipulés, ainsi que de la nature des critères de sélection spécifiés au sein des heuristiques. Un raisonnement global peut être défini de façon explicite (cas d'une résolution planifiée, par exemple), ou apparaître comme résultant de la juxtaposition d'heuristiques locales de sélection. Deux grandes formes de raisonnement peuvent d'ores et déjà être distinguées : les raisonnements "experts", qui s'appuient sur des éléments spécifiques, issu d'un domaine bien délimité, et les raisonnements de "sens commun", qui s'appuient sur des éléments de nature plus courante.

Le précédent chapitre organisait la connaissance selon quatre axes : l'axe fonctionnel, l'axe relationnel, l'axe des niveaux d'abstraction et l'axe des domaines d'application. Cette organisation nous aidera ici pour classer les raisonnements et les étudier sous leurs diverses formes.

Puisque la nature du raisonnement dépend étroitement des éléments de connaissances manipulés, les quatre axes d'organisation de la connaissance définissent eux-mêmes des types de raisonnement organisés selon l'axe fonctionnel, l'axe structurel, l'axe du domaine d'application et l'axe des niveaux d'abstraction de la connaissance. Il convient ici de préciser que ces différents raisonnements primaires interagissent entre eux pour donner naissance à des raisonnements que nous appellerons "hybrides".

On appelle en effet **raisonnement primaire** l'exploitation d'un type particulier de connaissance, selon la typologie présentée dans le chapitre précédent (connaissances figuratives

ou opératoires, par exemple). Un exemple de raisonnement primaire est l'exploration d'une hiérarchie de connaissances opératoires (un plan d'actions, par exemple).

Les raisonnements hybrides émergent de la nécessité d'intégrer ou combiner de raisonnements primaires. Un raisonnement hybride fait donc l'exploitation de divers types de connaissances.

## **1. Raisonnements primaires :**

Nous abordons en premier lieu la typologie fonctionnelle de raisonnements, suivie de la typologie structurelle et enfin la typologie des raisonnements organisés par niveaux d'abstraction et domaine d'application.

### **1.1. Typologie fonctionnelle des raisonnements**

Trois catégories de raisonnements seront présentées ici : la catégorie des raisonnements figuratifs, celle des raisonnements opératoires et enfin la catégorie des raisonnements réflexifs.

#### **1.1.1. Raisonnement figuratif**

Nous distinguons 3 grandes formes de raisonnement figuratif, selon le type de faits analysés et la nature de l'objet sur lequel porte le raisonnement. Cet objet représente tout ou partie du phénomène étudié (entités de l'image à analyser en vision, organes en radiologie, dispositifs mécaniques dans les systèmes physiques, ...). Les trois formes sont les suivantes :

- forme spatiale
- forme symbolique
- forme temporelle

Dans le domaine de la vision par ordinateur, ces trois formes fondamentales de raisonnement peuvent coexister de façon alternée (analyse d'images en mouvement, par exemple). La forme spatiale et la forme symbolique, dont le rôle est le développement d'espaces de recherches à dominante perceptuelle ou conceptuelle, sont les deux formes les plus couramment considérées en vision.

*forme spatiale*

Les formes de raisonnement spatiales interviennent de deux façons distinctes, selon que l'objectif est la mise en correspondance (d'objets et des modèles) à des fins d'identification, ou l'exploration d'un espace (recherche d'une trajectoire).

Dans le premier cas, la mise en correspondance des entités est effectuée essentiellement à base des modèles (Besl 88). Plusieurs modèles ainsi que plusieurs techniques de mise en correspondance en fonction de ces modèles sont utilisés en vision par ordinateur ; les modèles les plus courants sont : les polyèdres, les quadrees (Hell 82), la représentation des trajectoires (Nevatia 86), les octrees (Chien 86) et super quad-trees (Bajcsy 87).

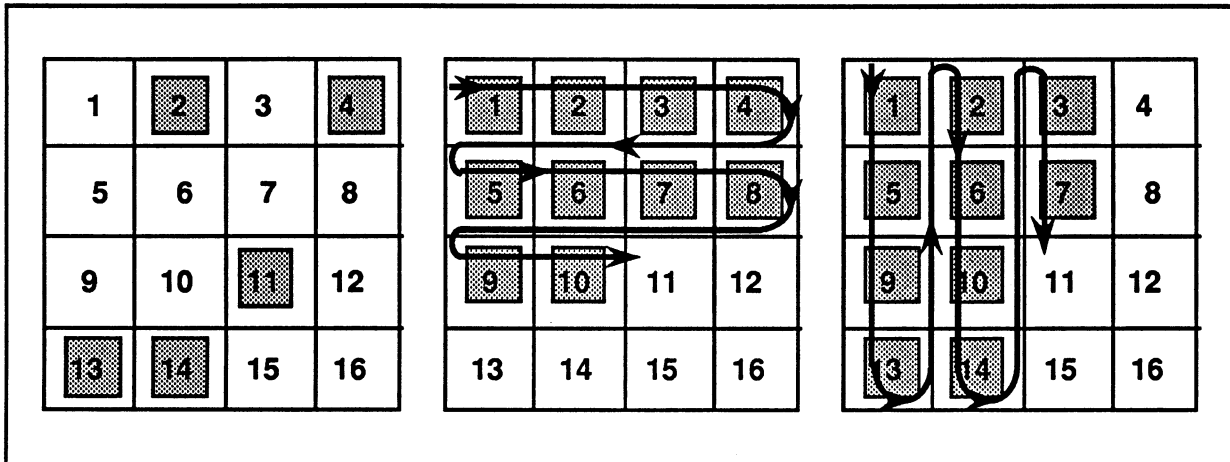
Dans le dernier cas, l'exploration de l'espace peut être effectuée sous forme d'inférences à caractère figuratif si les critères de sélection sont de nature figurative (pour la sélection des champs d'exploration du spécimen, par exemple) ou à caractère opératoire si les critères de sélection sont de nature opératoire (pour la sélection de déplacements sur le spécimen, par exemple).

Nous illustrons dans ce paragraphe certaines formes de raisonnements figuratifs et opératoires à caractère spatiale (focalisation perceptuelle et sélection de déplacements, respectivement) développées par le cytopathologue.

La sélection des champs, de même que celle des cellules intéressantes dans chaque champ, est guidée par un ensemble varié de critères :

- critères intrinsèques : pertinence intrinsèque du champ, de la cellule ;
- critères contextuels : type des cellules déjà observées, hypothèse diagnostic en cours ;
- objectif de l'analyse (screening ou diagnostic)

Le spécimen cytologique est exploré plusieurs fois, de façons différentes, et dans des buts différents: exploration aléatoire pour valider le spécimen, exploration systématique pour sélectionner les champs significatifs (figure 7).



**Figure 7 :** Trois stratégies possibles d'exploration du spécimen : une stratégie aléatoire (à gauche) sélectionne divers champs au hasard qui seront en suite analysés de façon approfondie. Deux types de stratégies systématiques d'exploration développées selon les sens horizontal ou vertical sont montrées respectivement dans les grilles d'exploration au centre et à droite de la figure.

### *forme symbolique*

L'interprétation d'une image implique la construction d'une description symbolique de la scène représentée (Lux 85). Cette description symbolique doit contenir, sous forme codée, l'essentiel de l'information pertinente contenue dans la scène : la notion d'information pertinente dépend du problème posé et de l'exploitation ultérieure qui en est faite. Le raisonnement symbolique en définit les stratégies de sélection et d'exploitation. Les techniques de mises en correspondance et d'inférence en sont la base.

L'identification des types cellulaires implique d'abord l'observation soigneuse de la morphologie cellulaire. Plusieurs autres critères peuvent néanmoins influencer le raisonnement, de façon plus ou moins consciente :

- contexte d'apparition de la cellule : une attention différente sera portée à une cellule isolée ou à une cellule impliquée au sein d'amas de cellules apparemment similaires ;
- cellules observées précédemment : l'accumulation d'observations similaires génère l'"attente prédictive" d'événements identiques ;
- hypothèse diagnostique courante : de façon similaire, l'hypothèse courante est susceptible d'influencer l'observation en générant l'attente de tel ou tel type de cellules ;

- connaissances sur le spécimen, le type de prélèvement et la coloration (restriction directe de l'espace de recherche).

La formulation diagnostique, quant à elle, dépend de la quantité de cellules observées dans chaque type. Un diagnostic plus fin (classification cytopronostique des cancers) est obtenu par l'évaluation de critères morphologiques précis. D'autres critères peuvent également influencer le raisonnement mis en jeu à cet égard :

- aspect global du spécimen ;
- hypothèse de diagnostic en cours : on cherchera plutôt à confirmer une hypothèse déjà élaborée, qu'à la remettre en question de façon permanente ;
- toutes informations a priori sur le patient, le type de prélèvement, les autres lames déjà observées.

Nous constatons dans toutes ces formes de raisonnement la présence simultanée de critères issus de niveaux d'analyse extrêmement différents, qui explique l'existence d'influences mutuelles complexes entre les tâches.

### *forme temporelle*

Une image dynamique peut être définie comme une séquence d'images statiques ordonnées par une fonction de temps connue. L'information extraite dans ce cas est obtenue non seulement de chaque image mais aussi de la séquence d'images. Cela signifie qu'un ensemble cohérent doit être dérivé des diverses images, après avoir eu une compréhension des changements ayant eu lieu dans un intervalle de temps donné. Le bruit est un problème supplémentaire se rajoutant dans ce processus complexe : il convient de supposer que les changements dus au bruit doivent être ignorés.

Un grand nombre d'algorithmes ont été développés en analyse d'images où le problème est décomposé en étapes successives : la détection et l'analyse du mouvement (Martin 78). Les deux principales techniques pour la détection du mouvement sont la corrélation croisée et la différenciation d'images; la correspondance par centroïde et l'analyse de formes ont été utilisées au contraire dans l'analyse du mouvement.

En vue d'une représentation explicite du temps, des extensions des réseaux sémantiques tel que le formalisme de (Levesque 79) et les réseaux de schémas ou scriptes (Waterman 86) ont été développés pour décrire des séquences d'actions ainsi que des situations dynamiques.



En médecine ALVEN (Tsotsos 80) est un exemple très représentatif des systèmes à base de connaissances possédant des capacités temporelles fondé sur un formalisme PSN.

La notion d'espace 4D a été proposé par (Besl 88) pour décrire le monde réel, qui prend en compte les dimensions 3D ainsi que la dimension temporelle. Des représentations 3D paramétriques et implicites peuvent être facilement étendues par rajout de la nouvelle dimension, pouvant représenter les changements dans le temps, aussi bien que les déformations des formes statiques 3D (c'est le cas aussi lorsqu'il est question de la représentation des classes d'objets ou de la prise en compte de la tolérance). Notons que la dimension temporelle est absente de notre application.

### 1.1.2. Raisonnement opératoire

Il est usuel de distinguer 4 formes élémentaires de raisonnement (Masini 90), selon les activités symboliques sous-jacentes :

- le raisonnement déductif est un enchaînement d'activités de déduction (ou inférences par spécialisation à partir de principes généraux) ;
- le raisonnement inductif est un enchaînement d'activités de généralisation ;
- le raisonnement abductif est un enchaînement d'activités d'abduction (ou inférences des causes à partir des effets) ;
- le raisonnement par analogie est un enchaînement d'activités analogues .

Ces diverses formes de raisonnement impliquent plutôt des activités d'exploration des axes taxinomiques et causaux d'organisation de la connaissance.

La planification est un exemple de raisonnement opératoire, le système TASK désigne à la fois un modèle de représentation et le système de gestion des tâches. La représentation-centrée tâche (RCT), proposée dans le modèle TASK, procède selon la démarche suivante : le but est de disposer de structures de données (appelées tâches) qui permettent de refléter la globalité des opérations conceptuelles impliquées dans le raisonnement (vu comme un traitement des informations) à modéliser (Pierret-Golbreich 90).

### 1.1.3. Raisonnement réflexif

Le raisonnement réflexif est fondé sur des connaissances réflexives ; celles-ci permettent de préciser la nature d'une connaissance sur un domaine particulier. Une connaissance (figurative

ou opératoire) sera ainsi qualifiée de : imprécise, incertaine, complète ou parcellaire, cohérente ou conflictuelle, ...

Nous distinguons 2 grandes formes de raisonnement réflexif :

- forme incertaine ou imprécise
- forme non-monotone

### *forme incertaine ou imprécise*

La résolution de problèmes et la prise de décisions chez les humains sont souvent effectuées au sein d'environnements où l'information concernant le problème est partielle ou approximative. Seule une représentation formelle composée d'un nombre fini de symboles chacun ayant une interprétation précise et prédéfinie pourrait être considérée comme un environnement de résolution complètement défini.

Quand un système destiné à la prise de décisions souhaite sélectionner une alternative parmi un ensemble d'entre elles, il doit à cette fin connaître l'état du monde courant. L'information sur l'état du monde est en effet nécessaire de façon à sélectionner la meilleure alternative. C'est précisément cette information concernant l'état du monde qui dans la plus part de cas est incertaine.

Pendant longtemps, le modèle bayésien a été l'approche numérique primordiale pour la représentation et l'inférence en univers incertain. La plupart des modèles mathématiques proposés durant ces dernières décades pour la manipulation de l'incertitude utilisent à la base une approche probabiliste. Quelques uns des plus représentatifs sont le modèle bayésien, la théorie de l'évidence de Shafer et la théorie de possibilités de Zadeh. Une description plus détaillée de ces méthodes peut être trouvée dans (Bhatnagar 86). Une brève revue des ces trois méthodes est présentée dans les paragraphes suivantes.

### *modèle bayésien*

Etant donné le modèle du monde décrit entièrement par  $m$  variables, une probabilité de distribution est affectée à chacune de ces  $m$  variables. Le fait d'affecter ces probabilités permet de limiter l'ensemble des mondes possibles, mais aussi attache une hiérarchie de probabilités aux modèles du monde. Le contenu syntaxique de ces  $m$  distributions de probabilités spécifie exactement l'incertitude sur le modèle du monde. Les incertitudes sur cette spécification exacte

peuvent être représentée à l'aide des probabilités de second ordre pour les  $m$  distributions de probabilité. Une revue de ses méthodes peut être trouvée dans (Cheeseman 85).

Dans tous les développements actuels à caractère pratique, les probabilités sont utilisées comme des coefficients qui pondèrent la connaissance déterministe, représentée par des règles de production. Quelques méthodes intuitives pour la combinaison et la propagation de ces coefficients ont été suggérées et utilisées. L'utilisation de facteurs de certitude est développée clairement par le système MYCIN (Heckerman 86).

### *théorie de l'évidence de Shafer*

La théorie de l'évidence a été introduite par Shafer au courant des années soixante comme une extension de la théorie des probabilités (Shafer 76). Le modèle est fondé sur l'idée très commune d'utiliser un nombre compris entre 0 et 1 pour indiquer le poids donné à une proposition par l'ensemble des évidences disponibles. Une information est exprimée dans ce cadre en termes de fonctions de croyance.

Un avantage de cette approche, mis à part le cadre probabiliste qui est fourni, est le fait qu'une représentation explicite de l'ignorance est possible. La principale déficience est que, bien que fournissant une méthode pour la représentation de l'information incertaine, très peu d'efforts ont été destinés au développement de capacités de raisonnement et d'inférence manipulant cette information. L'inconvénient majeur des approches mesurant l'incertitude sous forme numérique demeure le manque de règles formelles de combinaisons.

### *théorie des possibilités de Zadeh*

La théorie des possibilités a été proposée par Zadeh (Zadeh 78). Elle est inspirée de la théorie des ensembles flous pour la représentation de l'imprécision inhérente aux termes linguistiques.

La théorie des ensembles flous (Negotia 85) s'avère en effet très appropriée pour représenter l'imprécision intrinsèque des prédicats linguistiques indéterminés tels que par exemple "jeune", "haut", ... Le prédicat "jeune" détermine un ensemble flou qui est associé à sa distribution de possibilités. L'imprécision portée par l'assertion suivante : "la boîte pèse entre 10 et 16 kg" peut être aussi représentée en termes des distributions de possibilités. D'un point de vue sémantique, les valeurs restreintes données par la distribution de possibilités sont toutes plus ou moins éligibles pour la variable.

La quantification imprécise est un autre concept utile, bien maîtrisé par la théorie de possibilités. Cette quantification représente la cardinalité des ensembles flous et est souvent associée aux concepts linguistiques tels que “peu”, “quelques uns”, “beaucoup”, “la plupart”, ...

La théorie des possibilités peut nous aider à formaliser par exemple le concept indéterminé de “hauteur”, mais il reste inadéquat pour représenter la caractéristique “taille” d’une personne. En conséquence, il apparaît que cette théorie s’avère plus appropriée pour la représentation des concepts définis de façon inexacte que pour celle de l’information incertaine sur le monde.

Afin de corriger les imprécisions lors de la reconnaissance automatique d’organes, le système IBIS (Dellepiane 87) utilise un raisonnement par ensembles flous pour la représentation des propriétés “floues” des organes radiologiques. En outre, l’usage de la logique “floue” permet d’utiliser des gammes de valeurs des caractéristiques plus grandes pour la description d’un organe et par suite d’obtenir plusieurs hypothèses (dans le cadre d’un raisonnement hypothétique) pour la reconnaissance à différents degrés d’appartenance. Enfin, le but ultérieur de cette approche consiste à étendre la théorie des “ensembles flous”, afin d’approcher d’avantage le raisonnement du radiologue, en augmentant le pouvoir de déduction des règles.

### *forme non-monotone*

Le raisonnement non-monotone offre un cadre logique plus souple et plus complet que la logique monotone en permettant la manipulation de connaissances incomplètes. Les études sur le raisonnement non-monotone peuvent être classées en deux grandes familles : le raisonnement par défaut et le raisonnement hypothétique. Les systèmes non-monotones permettent une représentation qui accepte des exceptions à la règle générale sans nuire à la validité fournie par l’ensemble d’hypothèses.

Le raisonnement par défaut consiste à supposer que les informations absentes sont implicites (Cordier 86). En l’absence de connaissances plus précises, les règles de défauts sont déclenchées afin de compléter la description partielle des connaissances existante. Le raisonnement par défaut part du principe que les cas exceptionnels sont précisés, et donc que, en l’absence d’informations indiquant le contraire, de telles inférences peuvent être faites.

Un exemple de raisonnement par défaut peut être illustré par la notion d’héritage dans les langages à objet (Barthès 90). En effet, l’héritage peut être compris comme un mécanisme d’inférence non-monotone selon lequel une copie virtuelle “par défaut” de l’ensemble de la sur-classe est recopié dans la sous-classe, en plus de ses caractéristiques propres (attributs et

méthodes définis à son niveau). Les attributs des objets issus directement ou indirectement de la sur-classe disposeront de la valeur par défaut tant que leurs attributs ne seront pas redéfinis dans l'une de ses sous-classes.

Le raisonnement hypothétique consiste à raisonner en considérant les informations absentes comme des informations inconnues ; les différentes valeurs que peuvent prendre ces informations deviennent des hypothèses envisageables. Des hypothèses sont proposées à l'utilisateur, qui supposent vrais certains faits venant compléter la base de connaissances, permettant ainsi la poursuite d'un raisonnement qui autrement serait en cas d'impasse. Ces hypothèses correspondent en effet à l'ensemble des contextes (ou ensemble d'hypothèses) dans lesquels sa requête est vérifiée, permettant ainsi d'infirmer ou de confirmer les hypothèses initiales.

Ce type de raisonnement n'est pas destiné à prouver qu'une donnée est vraie ou fausse, mais plutôt à fournir les conditions suffisantes, en termes d'hypothèses, pour que cette donnée soit vraie ("La déduction automatique en France" 90 GRECO ).

Le raisonnement hypothétique s'avère d'applicabilité limitée dans la résolution de certains types de problèmes. Des inférences non monotones peuvent être utilisées pour proposer automatiquement des hypothèses (Euzenat 90). C'est par exemple le cas dans la situation suivante : en l'absence de l'information «Dominique est une femme» proposer l'hypothèse que «Dominique est un homme» et ainsi établir la validité absolue pour l'assertion «Dominique doit avoir fait son service militaire».

Un système de maintenance de la vérité (TMS) à propagation des contextes a été proposé par (Euzenat 90) pour la gestion d'un environnement d'hypothèses non monotones. Il convient ici de rappeler qu'un système de maintenance de la vérité est chargé, compte tenu d'un certain nombre d'inférences produites sur un ensemble de formules, de maintenir les raisons de croire ou non dans la validité des formules inférées.

Différents critères de sélection d'objets ou de sélection d'actions peuvent être identifiés, selon la forme des propriétés examinées :

- critères réflexifs (envisager d'abord les objets de plus forte certitude).
- critères réflexifs (envisager d'abord les actions les plus sûres).

Les stratégies de prédiction-vérification (ou d'hypothèse-test) sont couramment utilisées en interprétation d'images : elles consistent à émettre des hypothèses sur la présence de certaines

primitives dans une image (en utilisant à la fois des informations extraites de l'image et des connaissances de haut niveau), que l'on cherche ensuite à vérifier, par analyse de l'image. Cette vérification est presque toujours approximative : la présence d'une forme primitive n'est jamais sûre, car les données sont bruitées et les connaissances souvent incertaines (Haton 87).

Une stratégie de prédiction / vérification est en effet mise en œuvre pour la description morphologique des types cellulaires mais aussi pour la formulation diagnostique. En effet, une prédiction effectuée à faible grossissement (scrutation rapide) est suivie d'une vérification à haute résolution (scrutation soignée) dans le premier cas. Le nombre des cellules vues orientent vers une hypothèse diagnostique que l'on cherche à alimenter par explorations ultérieures.

Une stratégie de prédiction / vérification exhibe deux grandes classes de raisonnements pouvant être conduits de façon alternée : un raisonnement ascendant (plutôt opportuniste et guidé par les données) et un raisonnement descendant (plutôt prémédité et guidé par les buts). Ces deux raisonnements distinguent respectivement les méthodes procédant par regroupements et généralisations successives des méthodes procédant par décompositions et spécialisations progressives.

## **1.2. Typologie structurelle des raisonnements**

Nous présentons tout d'abord les raisonnements intrinsèques, suivis des raisonnements contextuels, compositionnels, et enfin les raisonnements taxinomiques et causaux.

### **1.2.1. Raisonnements intrinsèques**

Les raisonnements intrinsèques impliquent l'exploitation des propriétés intrinsèques attachées aux connaissances figuratives ou opératoires. Outre leur implication classique dans les processus d'inférence et de mise en correspondance, citons l'existence de critères intrinsèques de focalisation :

- sélectionner les objets de grande taille, par exemple ;
- préférer les actions de complexité faible, par exemple.

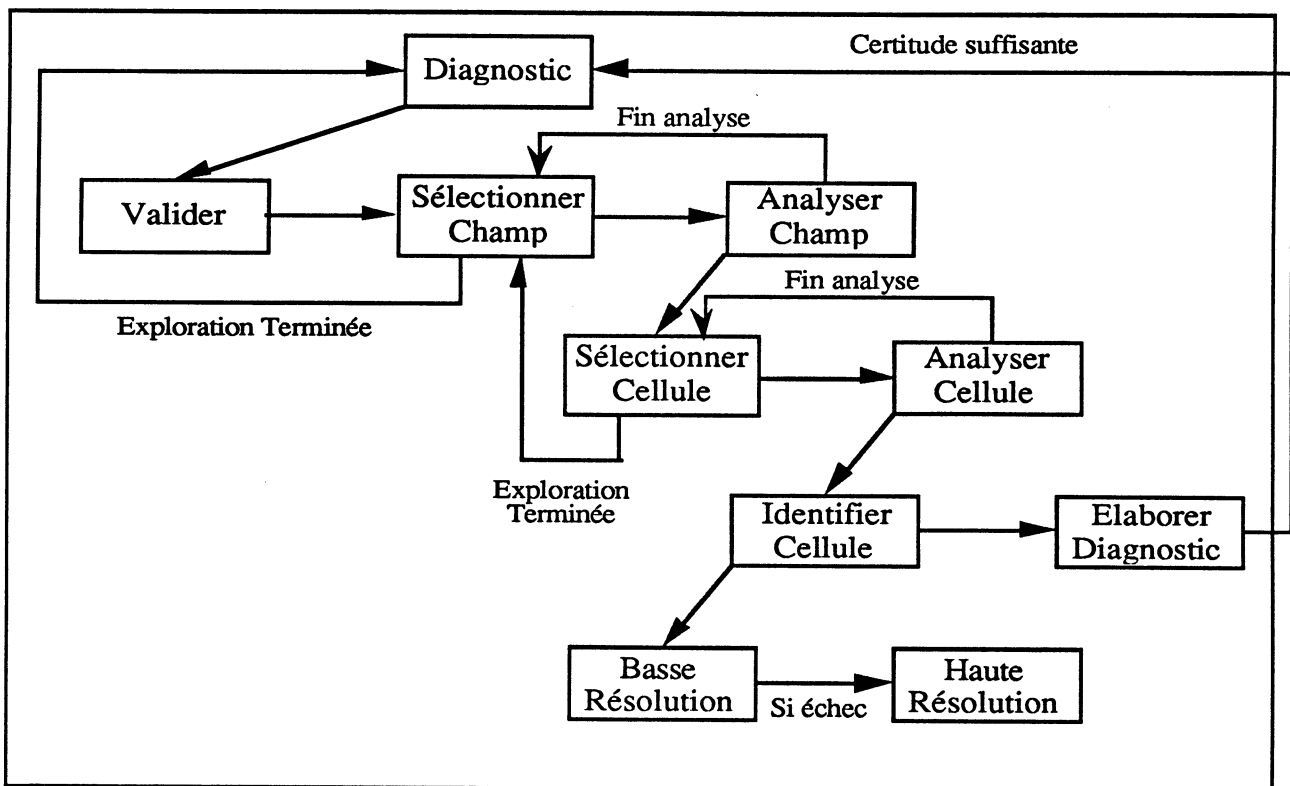
Ces critères permettent le développement d'heuristiques variées de sélection d'objets, qui exploitent des propriétés caractérisant l'objet lui-même (heuristiques "absolues").

### 1.2.2. Raisonnements contextuels

Ces raisonnements visent à l'exploitation des connaissances de type contextuel ; on rappelle qu'une connaissance contextuelle permet de focaliser une analyse selon un contexte précis. Un raisonnement figuratif ou opératoire développe un caractère contextuel lorsqu'il prend en considération le contexte d'apparition de l'objet ou le contexte d'application de l'action. Des heuristiques sont ici introduites, qui en fonction de la situation examinée exploitent les critères de type contextuels.

Des raisonnements contextuels figuratifs sont par exemple les critères de focalisation contextuelle tels que les sélections des champs qui dépendent non seulement du contexte effectif (à caractère intrinsèque) mais de l'hypothèse en cours. Un exemple des raisonnements contextuels opératoires est le basculement d'une stratégie aléatoire à une stratégie systématique dans le cas où la recherche d'un événement rare avec une confirmation très poussée est nécessaire.

Du point de vue topologique, des raisonnements contextuels peuvent être développés consistant à raisonner sur les implications de la disposition des objets au sein d'une structure : le pourquoi et les conséquences de la présence d'un objet à la proximité d'un ou d'autres objets.



**Figure 8 :** Illustration des raisonnements compositionnels opératoires décrivant l'enchaînement des phases principales du raisonnement impliquées dans la formulation diagnostique, en cytologie.

### 1.2.3. Raisonnements compositionnels

Ces raisonnements visent à l'exploitation des connaissances décrivant la composition structurelle de l'objet ou de l'action. Les connaissances compositionnelles s'intéressent au caractère simple ou composite d'un objet ou d'une action au sein d'une organisation ou structure des connaissances.

Dans le domaine de l'histopathologie du sein, des connaissances sur l'organisation tissulaires sont utilisées pour guider le raisonnement d'un système expert de diagnostic (Garbay 88). Des hypothèses diagnostiques sont formulées aux plus hauts niveaux d'observation, puis confirmées par scrutation progressive des détails.

Nous illustrons dans la figure 8 le raisonnement compositionnel opératoire mis en œuvre en cytopathologie. L'axe vertical d'organisation des tâches montre les dépendances structurelles entre tâches et sous-tâches. L'axe horizontal, par contre, illustre les relations de séquençement entre tâches.



#### 1.2.4. Raisonnements taxinomique et causaux

Ces deux grandes classes de raisonnement exploitent respectivement les arborescence taxinomiques et causales. Le premier mode de raisonnement est utilisé lorsqu'une classification hiérarchique des hypothèses possibles (hypothèses affectées de leur degré de certitude) est disponible : étant donné une hypothèse initiale, l'objectif est alors de chercher le "meilleur" chemin conduisant à l'hypothèse plus spécifique la plus plausibles. Le raisonnement procède ici par sélections et raffinements successifs ; il est poursuivi jusqu'à ce qu'aucun autre raffinement ne puisse être effectué.

Le second mode de raisonnement procède par regroupement d'hypothèses abductives, hypothèses capables d'expliquer certains aspects d'une situation donnée en termes de causes et d'effets. Etant donnée une situation, l'objectif est ici de trouver l'hypothèse composite qui en propose la meilleure explication. Ce raisonnement est appliqué à chaque étape de la résolution aux données inexpliquées les plus significatives. Les meilleurs hypothèses d'explication sont alors ajoutées à l'hypothèse composite en cours. Un mécanisme de critique est en général implanté, dont le rôle est de supprimer à chaque stade les éléments d'explication superflus. Le processus s'arrête lorsque toutes les données ont été expliquées, ou lorsque toutes les hypothèses ont été considérées.

Plus généralement, on distinguera les méthodes procédant par regroupements et généralisations successives des méthodes procédant par décompositions et spécialisations progressives : deux grandes classes de raisonnement se distinguent alors, le raisonnement ascendant (plutôt opportuniste et guidé par les données) et le raisonnement descendant (plutôt prémédité et guidé par les buts). Ces deux raisonnements enfin peuvent être conduits de façon alternée, dans le cadre de stratégies de prédiction / vérification (Lux 85).

La résolution d'un problème peut ainsi être planifiée de façon hiérarchique : différents plans sont ici générés à des niveaux d'abstraction différents, qui décomposent le problème en sous-problèmes. A chaque sous-problème est attaché une tâche particulière. Le raisonnement procède alors par raffinement progressif des plans d'actions : la situation est examinée à chaque niveau de résolution, afin d'activer ou suspendre tel ou tel plan. Des décisions sont enfin prises au sein de chaque plan, qui déterminent les actions à exécuter.

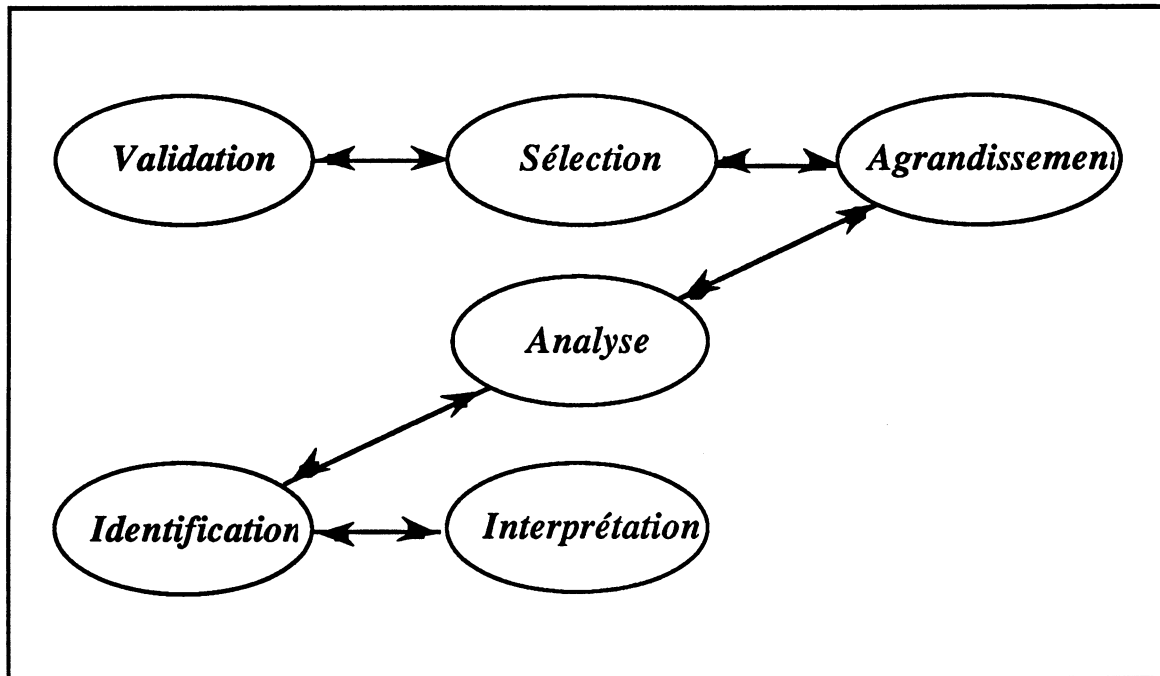
### **1.3. Typologie des raisonnements par niveaux d'abstraction et domaine d'application**

Les raisonnements fondés sur une organisation par niveaux d'abstraction de la connaissance sont de deux types : ceux qui sont propres à un niveau d'abstraction et ceux qui traversent entre 2 ou plusieurs niveaux d'abstraction. Le rôle de ces derniers consiste à articuler correctement des tâches agissant à des niveaux d'abstraction différents. En vision par exemple, il s'agit d'assurer la coopération entre les tâches des niveaux sensoriels et perceptuels ainsi qu'entre les niveaux iconiques et sémantiques.

Des raisonnements peuvent être exclusifs à un niveau d'abstraction : des raisonnements opératoires manipulant des connaissances opératoires telles que des procédures de traitement d'images s'appliquent exclusivement à des connaissances qui appartiennent à ce niveau précis d'abstraction.

Les raisonnements profonds et de surface s'appuieront respectivement sur des connaissances profondes et de surface. Les premiers ont un caractère plus générique et tentent de s'appliquer à de nouvelles situations, ils utilisent ainsi les connaissances exprimées sous diverses formes, c'est-à-dire structurées sous les divers axes d'organisations de la connaissance.

Les raisonnements de surface ont un caractère plus empirique et utilisent des connaissances plus spécifiques tels qu'opératives ou routinières pour la solution des problèmes souvent ponctuels.



**Figure 9 :** Illustration des raisonnements opératoires à divers niveaux d'abstraction décrivant l'enchaînement des tâches principales du raisonnement impliquées dans la formulation diagnostique, en cytologie.

Dans l'exemple de la figure 9, on remarque que les raisonnements mis en œuvre au plus haut niveau sont de nature plus générale, alors que ceux au bas niveau sont de nature plus spécifique.

## 2. Raisonnements hybrides :

En vue de surmonter les limitations rencontrées par les systèmes à base de connaissances de première génération, les systèmes à base de connaissances de seconde génération éprouvent la nécessité d'intégrer divers types de représentations de connaissance ainsi que des raisonnements multiples pour la modélisation des systèmes complexes. Cette nécessité d'intégration est d'autant plus importante que les outils de représentation de connaissances issus de l'intelligence artificielle et les techniques de raisonnement conventionnels ne sont pas toujours adaptés à tous les domaines d'application et souvent s'adressent à des aspects particuliers.

Nous avons deux grandes classes de raisonnements hybrides : raisonnements hybrides simples et raisonnements hybrides complexes, selon qu'ils articulent l'intégration des deux raisonnements primaires ou l'intégration des plusieurs raisonnements.

### 2.1. Raisonnements hybrides simples

Divers types de combinaison des raisonnements sont possibles, les raisonnements hybrides suivants en sont quelques-unes.

#### *formes hypothétique et incertaine*

Le raisonnement hypothétique conduit généralement à poser les questions de l'incertitude. C'est le cas notamment en interprétation d'images ou les hypothèses sont entachées d'incertitudes : la présence d'une forme primitive n'est jamais certaine ni suffisante pour garantir la vérification des hypothèses, car les données sont bruitées et les connaissances souvent incertaines. Les techniques présentées dans la section précédente se rapportant au raisonnement incertain ou imprécis peuvent être utilisées pour mener un tel raisonnement (Haton 87).

#### *forme hybride figurative et opératoire*

Une autre catégorisation des objets peut-être effectuée, qui distingue les objets-données des objets-buts : deux grandes classes de raisonnement se distinguent alors, le raisonnement guidé par les données et le raisonnement guidé par les buts. Ces deux formes de raisonnement sont des formes hybrides dans la mesure où des actions sont exécutées en chaîne avant ou arrière en fonction des types d'objets sélectionnés ; une coordination entre la sélection d'action et la sélection d'objet doit ainsi être effectuée.

### *formes causale et temporelle*

Dans le cadre du diagnostic de défaillances pour des systèmes physiques, une des principales limitations des systèmes à base de connaissances de première génération a été de faire l'abstraction des contraintes temporelles. Ces systèmes sont ainsi supposés opérer en environnement statique. De telles suppositions entraînent des difficultés pour introduire des formes structurées des connaissances temporelles notamment dans les règles heuristiques. Une plate-forme pour l'intégration et la coopération des raisonnements causale et temporel est proposé par (Console 89) afin d'établir des diagnostics. Une séparation entre règles de propagation et de vérification de la cohérence permet d'utiliser cette plate-forme pour la formulation de prédictions (c'est-à-dire pour prédire des événements futurs ou l'évolution future du système) et pour la vérification de la cohérence temporelle du système.

### *forme temporelle et non monotone*

Le raisonnement temporel nécessite bien souvent un raisonnement non monotone (Euzenat 90) pour exprimer la persistance. C'est par exemple le cas dans les assertions suivantes : «Ce livre est sur le bureau au temps  $t_0$ » «tant qu'aucune information ne dit qu'il a été déplacé entre  $t_0$  et  $t_i$ , supposer qu'il y est toujours à  $t_i$ ».

## **2.2. Raisonnements hybrides complexes**

Les raisonnements hybrides complexes peuvent être définis comme des raisonnements qui articulent l'intégration de plusieurs formes de raisonnement, ainsi par exemple l'articulation des raisonnements profonds de nature plus général à différents niveaux d'abstraction et utilisant des critères de sélection d'objet ou d'action de nature diverse (intrinsèque, contextuel, taxinomique, ...).

Dans la modélisation du raisonnement médical, par exemple, les diverses tâches (composées d'un ensemble d'actions) à divers niveaux d'abstraction nécessitent des raisonnements locaux de nature diverse (figurative, opératoire ou réflexive) en même temps que d'autres raisonnements font les liens entre tâches.

La notion de tâche de raisonnement générique a été introduite par (Chandrasekaran 87), comme une structure encapsulant des connaissances de nature diverse ainsi qu'une structure de contrôle et des stratégies de raisonnement spécifiques. Ces tâches sont alors décrites par les caractéristiques suivantes :

- domaine de fonctionnalité de la tâche (connaissances exploitées en entrée et générées en sortie) ;
- représentation et organisation des connaissances manipulées au sein de la tâche ;
- structure de contrôle et modes de raisonnement nécessaires à sa mise en oeuvre.

### Récapitulatif

Le tableau suivant est un essai de récapituler les raisonnements possibles fondés sur les 4 axes d'organisation de la connaissance qui ont été présentés en détail dans le chapitre précédent.

Raisonnements fondés sur les 4 axes d'organisation de la connaissance			
Axe des niveaux de complexité	Niveau de raisonnements primaires	Axe fonctionnel	raisonnements figuratifs, opératoires & réflexifs
		Axe structurel	raisonnements intrinsèques, contextuelles, compositionnels, taxinomiques, causales,
		Axe domaines d'application	raisonnements généraux, spécifiques : opératifs & routiniers
	Niveau de raisonnements hybrides	combinaison de raisonnements primaires	

## Conclusion

Des catégories différentes de raisonnement se distinguent selon les types de connaissances manipulées à un instant donné : la typologie des connaissances s'est avérée un bon guide pour l'identification des divers raisonnements, et l'élaboration d'une typologie spécifique au raisonnement.

Une conception progressive du système peut ainsi être envisagée, dans le sens que des raisonnements simples mais de natures diverses lorsqu'ils sont assemblés et intégrés, donnent naissance à des raisonnements hybrides. Les notions des constructions "simples" et des constructions "complexes" ont été également distinguées. La conception du système peut ainsi être abordée sous un angle "constructiviste" guidant la structuration des raisonnements. Seule une approche logicielle cohérente, souple et modulaire pourra supporter une telle perspective.

Les points faibles propres à la typologie formelle de connaissances se retrouvent ici : une sensation d'éparpillement peut être éprouvée du fait du caractère très varié de la typologie formelle des raisonnements ; beaucoup de liens existent entre les diverses catégories de raisonnements qui ont été identifiées.

Bien que les typologies formelles que nous avons introduites pour la classification des connaissances et du raisonnement permettent une structuration nécessaire à leur modélisation et peuvent ainsi s'avérer un outil d'assistance à cette modélisation, ces typologies restent assez générales, difficiles parfois à cerner et peuvent être encore loin d'une implantation informatique. Il est nécessaire à ce stade de disposer d'une typologie à caractère plus technologique qui nous rapproche d'avantage des outils informatiques, notamment de la technologie multi-agent, qui s'est révélée intéressante dans la partie A. On cherchera également à se doter d'un outil de réflexion pour comprendre de façon approfondie, si possible, les difficultés et les enjeux de cette technologie.





## Conclusion partie B

---

Les typologies formelles s'avèrent très utiles pour la structuration des connaissances et des raisonnements en vue d'une modélisation formelle de l'expertise humaine. En effet, divers avantages ressortent de ces typologies :

- facilité d'identification et de transcription informatique des diverses classes de connaissances et des raisonnements impliqués dans l'expertise à modéliser ;
- appréhension des aspects intrinsèques du raisonnement à travers les diverses formes de connaissances manipulées ;
- analyse des possibilités d'intégration des raisonnements non seulement à l'intérieur des tâches mais aussi dans le cadre d'une coopération entre tâches ;
- possibilité d'une conception "constructiviste" de systèmes intégrant d'abord des raisonnements simples, puis des combinaisons complexes de raisonnements.

Rappelons néanmoins que cette typologie ne permet pas une implantation directe. L'élaboration d'une typologie technologique s'avère nécessaire, pour une meilleure maîtrise de l'outil que nous envisageons d'employer mais aussi pour l'obtention des spécifications techniques indispensables à l'implantation.



## Références bibliographiques :

### *Sigles*

ACM	Association for Computers Machinery
AFIA	Association Française pour l'Intelligence Artificielle
C(V)GIP	Computer (Vision), Graphics & Image Processing
CVPR	Computer Vision & Pattern Recognition
EMBS	Engineering in Medicine & Biology Society
ICAP	International Conference on Image Analysis and Processing
ICPR	International Conference on Pattern Recognition
IJCAI	International Joint Conference on Artificial Intelligence
IPMI	International Conference on Information Processing & Medical Imaging
PAMI	Pattern Analysis & Machine Intelligence
PRC -	Programme de Recherche Coordonnée -
GRECO	Groupe de REcherche COordonnée
RFIA	Congrès Reconnaissances de Formes et Intelligence Artificielle
SMC	Systems, Man and Cybernetics

(Aguirre 89)

Aguirre, J.L.  
**Construction Automatique de taxonomies à partir d'exemples dans un modèle de connaissances par objets.**  
 Thèse de Doctorat. Spécialité Informatique.  
 Institut National Polytechnique de Grenoble, ENSIMAG, 1989.

(Alengry 88)

Alengry, P.  
**Connaissances profondes et connaissances de surface dans la modélisation du raisonnement.**  
 Psychologie Française, 33-3: 171-176, 1988.

(Alpay 89)

Alpay L.  
**Developmental User Models.**  
 Interactive Learning International, 1989.

(Alty 89)

Alty, J.  
**EXPERTS SYSTEMS Techniques & Applications.**  
 Video 10 : Validation & Modelling in Advanced VIDEO LEARNING.  
 The Turing Institute, Glasgow, 1989.

(Aussenac 89)

Aussenac, N.  
**Conception d'une méthodologie et d'un outil d'acquisition de connaissances expertes.**  
 Thèse de docteur en Informatique, Spécialité : Intelligence Artificielle.  
 Université Paul Sabatier de Toulouse, soutenue le 6 octobre 1989.

(Bajcsy 87)

Bajcsy, R. & Solina, F.  
**Three Dimensional Shape Representation Revisited.**

- (Barthès 90) In "Proc of the 1st ICCV", pp 231-240., 1987.  
Barthès, J.P., Ferber, J. , Gloess, P.Y., Nicolle, A. & Volle, P.  
**Objets & Intelligence Artificielle.**  
Actes des 3ième journées nationales PRC-GRD "Intelligence Artificielle",  
Hermes, pp. 272-325, CNIT, Paris-la-Défense, 1990.
- (Barnard 87) Barnard, S.T. and Fischler, M.A.  
**Stereo vision.**  
Encyclopedia of Artificial Intelligence, pp. 1083-1090, Shapiro, S.C. (ed),  
Wiley Interscience., 1987.
- (Baujard 90) Baujard, O. & Garbay, C.  
**A programming environment for distributed expert system  
design.**  
Expert System Applications, ExpertSys., pp. 27-32, 1990.
- (Besl 88) Besl, P.J.  
**Geometric modelling and Computer Vision.**  
Proc. of the IEEE, 76(8):936-958., 1988.
- (Bhatnagar 86) Bhatnagar, B.K. & Kanal, L.N.  
**Handling Uncertain Information: A Review of Numeric and  
Non-numeric Methods.**  
Uncertainty in Artificial Intelligence, pp. 3-26, Elsevier Science Publisher  
B.V. North-Holland., 1986.
- (Boy 88) Boy, G., Faller, B. & Sallantin, J.  
**Acquisition et ratification de connaissances.**  
Actes des journées nationales PRC-GRECO "Intelligence Artificielle",  
Teknea, pp. 321-356, 1988.
- (Brajnik 90) Brajnik G., Chitarro L., Tasso C. & Toppano E.  
**Epistemology, organization & use of functional knowledge for  
reasoning about physical systems.**  
10ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs  
Applications.  
Conférence Générale Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon,  
1990.
- (Brooks 81) Brooks RA.  
**Raisonnement symbolique sur des modèles 3D et d'images 2D.**  
Artificial Intelligence 17 : 285-348, 1981.
- (Chandrasekaran 85) Chandrasekaran B.  
**Special section on reasoning about structure, behaviour &  
function.**
- (Chandrasekaran 87) Chandrasekaran  
**Towards a functional architecture for intelligence based on  
generic information processing tasks.**  
Proc. of the 10th IJCAI, pp. 1183-1192. IEEE Computer Society Press,  
1987.

- (Charlet 89)  
Charlet J.  
**Acquisition des connaissances & raisonnement dans un système expert de seconde génération.**  
9ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications. Conférence Spécialisée Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1989.
- (Cheeseman 85)  
Cheeseman, P.  
**"In defense of Probability"**  
Proceeding of 9th IJCAI, pp. 1002-1009., 1985.
- (Chien 86)  
Chien, C.H. & Aggarwal, J.K.  
**Identification of 3D objects from multiple silhouettes using quadtrees/octrees.**  
CVGIP, 36(2/3):208-228., 1986.
- (Console 89)  
Console L., Rivolin A.J., Dupre D.T., & Torasso P.  
**Integration of causal & temporal reasoning in diagnostic problem solving.**  
9ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications. Conférence Spécialisée Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1989.
- (Dellepiane 87)  
Dellepiane S., Regazzoni C., Serpico S.B., Sturaro F. & Vernazza G.  
**Développement et résultats progressifs du système IBIS.**  
Intelligence Artificielle et Imagerie Médicale, Auguste Wackenheim (Rédacteur).  
Springer-Verlag, Paris, 1987.
- (Dutta 90)  
Dutta S. & Bonissone P.P.  
**An approach to integrating diverse reasoning techniques.**  
10ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications. Conférence Générale Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1990.
- (Erceau 91)  
Erceau J. & Ferber J.  
**L'Intelligence Artificielle Distribuée.**  
Revue "La Recherche".  
Num 233, Vol 22, pp. 750, juin 1991.
- (Euzenat 90)  
Euzenat, J.  
**Un système de maintenance de la vérité à propagation de contextes.**  
Thèse de docteur es sciences, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 1990.
- (Ferber 88)  
Ferber, J. & Ghallab, M.  
**Problématique des univers multi-agents intelligents.**  
Actes des Journées nationales du PRC-GRECO "Intelligence Artificielle", pp 295-320. Teknea., 1988.
- (Froger 90)  
Froger E.

- Diagnostic de systèmes complexes : modélisations de raisonnements, architecture multi-experts et validation.**  
Thèse de Doctorat (nouveau régime), Spécialité : Informatique.  
Université de Nantes, soutenue le 15 novembre 1990.
- (Genesereth 89)  
Genesereth M.R. & Nilsson N.J.  
**Book Review on "Logical Foundations of Artificial Intelligence".**  
Artificial Intelligence, an International Journal.  
Vol 38(1) : pp. 125 - 131, 1989.
- (Gilibert 90)  
Gilibert R.P., Hugonnard E., Ovalle A. & Garbay C.  
**Knowledge Engineering in Biomedicine.**  
12th. Annual Inter. Conf. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 1285-1286, Philadelphia, USA, nov. 1990.
- (Haton 87)  
Haton J.P.  
**Reconnaissance de formes et intelligence artificielle en traitement d'images médicales.**  
Intelligence Artificielle et Imagerie Médicale, Auguste Wackenheim (Rédacteur).  
Springer-Verlag, Paris, 1987.
- (Heckerman 86)  
Heckerman, D.  
**Probabilistic Interpretations for MYCIN's Certainty Factors.**  
Uncertainty in Artificial Intelligence, pp. 167-196. Elsevier Science Publisher B.V. North-Holland., 1986.
- (Hell 82)  
Hell, E.L., Tio, J.B.K., McPherson, G.A. & Sadjadi, F.A.  
**Measuring curved surfaces for robot vision.**  
Computer, 15(12):42-54., 1982.
- (Joubel 90)  
Joubel C. & Raiman O.  
**How time changes assumptions.**  
10ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications.  
Conférence Générale Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1990.
- (Kassel 89)  
Kassel G.  
**Systèmes expert de seconde génération & explication du raisonnement.**  
9ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications.  
Conférence Spécialisée Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1989.
- (Laurent 84)  
Laurent, J.P.  
**La structure de contrôle dans les systèmes experts.**  
TSI (3):161-177, 1984.
- (Lesmo 89)  
Lesmo et al.  
**Dealing with uncertain knowledge in medical decision-making: A case study in hepatology.**  
Artificial Intelligence in Medicine, 1: 105-116, 1989.

- (Levesque 79)  
Levesque, H. & Mylopoulos, J.  
**A procedural semantics for semantic networks.**  
Associative networks, (Findler, eds), NY, Academic Press., 1979.
- (Lux 85)  
Lux, A.  
**Algorithmique et Contrôle en Vision par Ordinateur.**  
Thèse de docteur d'état es sciences, ENSIMAG, 1985.  
Université Scientifique et Médicale de Grenoble - Institut National Polytechnique de Grenoble, ENSIMAG, 1985.
- (Maître 89)  
Maître B., Lâasri H., Mondot T., Charpillet F. & Haton J.P.  
**Coordination des sources de connaissances opérant dans un univers incomplet & évolutif : études & réalisations dans ATOME.**  
9ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications. Conférence Spécialisée Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1989.
- (Martin 78)  
Martin, W.N. & Aggarwal, J.K.  
**Survey dynamic scene analysis.**  
CGIP, 7:356-374., 1978.
- (Marzouki 89)  
Marzouki, M., Laurent, J. & Courtois, B.  
**A unified use of deep and shallow knowledge in an expert system for prototype validation of integrated circuits.**  
Proc. of the 9th International Workshop Expert Systems and their Applications, Specialized Conference Second Generation Expert Systems", pp. 55-69, EC2., 1989.
- (Michalski 83)  
Michalski, R.S & Stepp, R.E.  
**Learning from observation : conceptual clustering.**  
In Machine Learning : An Artificial Intelligence Approach (Michalski, Carbonell & Mitchell, eds.), pp. 331-363, Tioga, Palo Alto, Calif., 1983.
- (Masini 89)  
Masini, G., Napoli, A., Colnet, D., Léonard, D, et Tombre, K.  
**Les langages à objets.**  
InterEditions, Paris, 1989.
- (Negotia 85)  
Negotia, C.V.  
**Expert Systems and Fuzzy Systems.**  
Benjamin Cummings., 1985.
- (Nevatia 85)  
Nevatia, R. & Binford, T.O.  
**Perceptual organization and the representation of natural form.**  
Artificial Intelligence, 28:293-331, 1986.
- (Ovalle 89)  
Ovalle A., Pesty S., Seigneurin D. & Garbay C.  
**Développement de Systèmes à Base de Connaissance pour l'Interpretation d'Images Biomédicales.**  
Tutorial : RFIA. Demi-journée de synthèse: Nouvelles perspectives de l'imagerie médicale; microscopie et macroscopie, de l'analyse à l'interprétation. AFCET-INRIA, 1989.



- (Ovalle 91b) Ovalle, A. & Garbay, C.  
**KIDS : A Distributed Expert System for Biomedical Image Interpretation.**  
12th International Conference on IPMI, pp. 419-433, Colchester & Hawkes (Eds), Springer-Verlag, Kent, juillet 1991.
- (Ovalle 91c) Ovalle, A. & Garbay, C.  
**Raisonnement et Contrôle en Univers Multi-Agent : Une Application à l'Interprétation d'Images Biomédicales.**  
AFCET-RFIA, pp. 625-633, Lyon, novembre 1991.
- (Page 90) Ovalle, A. & Garbay, C.  
**Reasoning among Visual cues : an approach in Biomedicine.**  
13th. Annual Inter. Conf. IEEE on Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 1319-1320, Orlando, USA, nov. 1991.
- (Piaget 76) Page, M.  
**Systèmes experts à base de connaissances profondes : application à un poste de travail "intelligent" pour le comptable.**  
Thèse de Doctorat. Spécialité Informatique.  
Institut National Polytechnique de Grenoble, ENSIMAG, 1990.
- (Paillet 90) **The Psychology of Intelligence.**  
Tolowa Little Adams & Co., 1976.
- (Pierret-Golbreich 90) Paillet O. & Fargier H.  
**Heuristics and models for reactive planning : the MARS experiment.**  
10ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications.  
Conférence Générale Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1990.
- (Pycock 89) Pierret-Golbreich C. & Delouis I.  
**TASK : task architecture for the structuration of knowledge.**  
10ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications.  
Conférence Générale Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1990.
- (Shafer 76) Pycock, D. & Taylor, C.J.  
**Chromosome classification in a general-pupose frame-based interpretation system.**  
Proceedings of the 5th Alvey Vision Conference, Reading, september 1989.
- (Shen 90) Shafer, G.  
**"A Mathematical Theory of Evidence".**  
Princeton University Press, 1976
- Shen Q. & Leitch R.  
**A semi-quantitative extension to qualitative simulation.**  
10ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications.

- (Skinner 89) Conférence Générale Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1990.  
Skinner J.M. & Brown F.M.  
**BDS : A Diagnostic Expert System blending Deep & Shallow Reasoning.**  
9ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications. Conférence Spécialisée Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1989.
- (Stiehl 87) Stiehl, H.S.  
**On spatial image sequence understanding. Habilitation monograph.**  
Technische Universität, Berlin., 1987.
- (Tong 90) Tong X. & Tueni M.  
**CARMEN : a plattform for building second generation expert systems.**  
10ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts & Leurs Applications. Conférence Générale Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1990.
- (Tsotsos 80) Tsotsos, J.K., Mylopoulos, J., Corvey, H.D. & Zucker, S.W.  
**A framework for visual motion understanding.**  
IEEE Trans. on PAMI, 2(6):563-573., 1980.
- (Tsang 90) Tsang & Paillet  
**Compte rendu des AAAI'90, Boston, 29 juillet - 3 août.**  
Laboratoires de Marcoussis, Division Informatique, 1990.
- (Waterman 86) Waterman, D.A.  
**A Guide to Expert Systems,** Addison-Wesley Pub. Cons., 1986.
- (Yonezawa 89) Yonezawa, A. & Tokoro, M. (eds).  
**Object-Oriented Concurrent Programming,** MIT Press., 1989
- (Zadeh 78) Zadeh, L.A.  
**"Fuzzy Sets as A Basis for A Theory of Possibility"**  
Fuzzy Sets and Systems 1(1):2-28., 1978.
- (Ziébelin 90) Ziébelin, D.  
**Raisonnement sur les contraintes : application en ordonnancement.**  
Thèse de Doctorat. Spécialité Informatique.  
Institut National Polytechnique de Grenoble, ENSIMAG, 1990.



## Introduction partie C

---

Dans la partie B deux typologies formelles pour l'analyse de la connaissance et du raisonnement ont été proposées. L'objectif que nous nous sommes fixé, à savoir rapprocher l'utilisateur du système informatique, a été en partie atteint dans le sens que les typologies développées dans la partie B peuvent s'avérer une étape préliminaire pour la modélisation formelle des connaissances et du raisonnement. Cependant ces typologies restent encore à l'écart des considérations technologiques. En effet, le besoin d'associer à ces typologies une typologie technologique a été soulevé, dans le but de nous rapprocher de la technologie multi-agent, approche s'avérant intéressante pour la résolution coopérative et de haut niveau des problèmes complexes.

Le but de cette partie est donc tout d'abord de proposer une typologie technologique s'adressant particulièrement aux approches multi-agents. Cette typologie est proposée pour diverses raisons, citons les suivantes :

- elle peut servir d'outil de réflexion pour l'étude du raisonnement en univers multi-agent ; dans ce but, les paramètres d'analyse qui la composent possèdent un caractère assez général ;
- elle peut faciliter l'emploi de la technologie et alléger les tâches de conception. En effet, des risques existent pour les concepteurs de tels systèmes de se trouver rapidement "perdus", confrontés à la manipulation des paramètres très divers caractérisant cette technologie. Ils peuvent aussi se trouver confrontés à un logiciel ingérable et lourd du fait des possibilités multiples d'implantation, de choix techniques qui exigent d'ailleurs beaucoup d'investissement de conception.
- cette typologie nous a servi pour étudier le générateur des systèmes multi-agents MAPS selon une optique nouvelle.

Le premier chapitre de cette partie propose ainsi une typologie technologique pour l'étude du raisonnement en univers multi-agent. Cette typologie technologique est examinée selon deux points de vue : le point de vue de l'agent et le point de vue du groupe d'agents (société d'agents). Des paramètres régissant le raisonnement tant au niveau individuel qu'au niveau du groupe seront distingués ici, permettant ainsi de définir différents types de comportement.

Enfin, le rapprochement des typologies formelle et technologique est concrétisé par la présentation dans les deux derniers chapitres de la partie C des systèmes MAPS (Multi-Agent Problem Solver), générateur des systèmes multi-agents et KIDS (Knowledge based Image Diagnosis System), système multi-agent dédié à l'interprétation d'images biomédicales.

L'environnement de programmation MAPS est ainsi présenté dans le deuxième chapitre. Il s'agit ici d'aborder le système MAPS selon les deux perspectives, agent et groupe d'agents, telles qu'elles ont été présentées dans le chapitre précédent. L'architecture interne des agents sera présentée en premier lieu ainsi que les raisonnements pouvant être développés dans chacune des couches composant cette architecture. Les différents paramètres définissant le raisonnement au niveau du groupe seront ensuite étudiés un par un.

Enfin, le troisième chapitre est consacré à la présentation du système multi-agent KIDS , dédié à l'interprétation d'images biomédicales. Trois phases d'analyse, qui définissent trois groupes d'agents différents, sont ici distinguées. Les différents types de raisonnement sont ainsi étudiés tout d'abord au niveau individuel, puis au niveau du groupe, et enfin au niveau du système dans son ensemble.

# Partie C

## La réalisation

**Chapitre I** : Le raisonnement en univers multi-agent

**Chapitre II** : L'environnement de programmation MAPS  
(Multi-Agent Problem Solver)

**Chapitre III** : Le système KIDS  
(Knowledge Based Image Diagnosis System)



# *Le raisonnement en univers multi-agent*

---

<b>Introduction</b> .....	143
<b>1. L'agent</b> .....	144
1.1. L'agent et sa structure.....	145
1.1.1. Raisonnements liés aux communications .....	146
<i>moyen de communication</i> .....	146
<i>contenu des communications</i> .....	147
<i>protocole de communication</i> .....	148
1.1.2. Raisonnements liés à la gestion de la base de connaissances.....	148
1.1.3. Raisonnements liés à l'exploitation de ses propres ressources...	149
1.1.4. Raisonnements intentionnels.....	150
1.2. Le contrôle.....	150
1.3. Relations entre typologie formelle et typologie technologique.....	152
<b>2. Le groupe d'agents</b> .....	153
<b>3. Exemple : approches à base du tableau noir</b> .....	155
3.1. L'agent.....	155
<i>les communications</i> .....	155
<i>la gestion de la base</i> .....	155
<i>compétences</i> .....	155
<i>couche intentionnelle</i> .....	155
3.2. Le groupe d'agents.....	156



<i>distribution des tâches et des compétences</i> .....	156
<i>modes et protocoles de communication</i> .....	156
<i>modes d'organisation et de coopération</i> .....	156
<i>quelques avantages de cette approche</i> .....	157
<i>quelques inconvénients de cette approche</i> .....	157

<b>4. Quelques considérations sur l'explication du raisonnement</b> .....	158
---	-----

<b>Conclusion</b> .....	161
-------------------------	-----

## *Le raisonnement en univers multi-agent*

---

### **Introduction**

Dans le chapitre précédent nous avons étudié le raisonnement dans sa perspective formelle, au travers de sa nature intrinsèque, et donc indépendamment de toute considération technologique. Dans ce chapitre, l'approche multi-agent se présente en effet comme une solution de type technologique à la résolution de problèmes complexes. Il s'agit donc ici, d'envisager l'étude du raisonnement en univers multi-agent : de nouveaux paramètres sont introduits qui permettront d'évaluer et de mesurer le raisonnement selon la technologie multi-agent.

Les raisons pragmatiques et/ou fondamentales justifiant la technologie multi-agent ont déjà été présentées dans l'état de l'art des systèmes de seconde génération (chapitre III de la partie A). Dans la figure 10, nous proposons un schéma résumant certains des aspects significatifs de ces approches qui les différencient des approches objets, mettant en évidence une distribution des tâches et des compétences entre entités intelligentes. Ces entités coopèrent, mettant en commun leurs connaissances et leurs savoir-faire pour résoudre un problème complexe. Divers schémas de raisonnements en découlent qui définissent non seulement des comportements individuels mais aussi des comportements au sein du groupe d'agents.

Le raisonnement dans un univers multi-agent peut en effet être examiné selon deux points de vue : le point de vue de l'agent et le point de vue du groupe d'agents (ou société d'agents). Le raisonnement mis en œuvre dans une société multi-agent dépend en effet des choix faits aux niveaux individuel (dans la structuration interne des agents) et au niveau du groupe (modes de distribution des tâches et des compétences, modes et protocoles de communication ou modes de coopération et d'organisation).

Nous présentons tout d'abord les paramètres régissant le raisonnement au niveau individuel, puis ceux développés au sein du groupe d'agents. Les approches à base de tableau noir sont

ensuite présentées plus en détail. Quelques considérations sur l'explication du raisonnement seront enfin abordées.

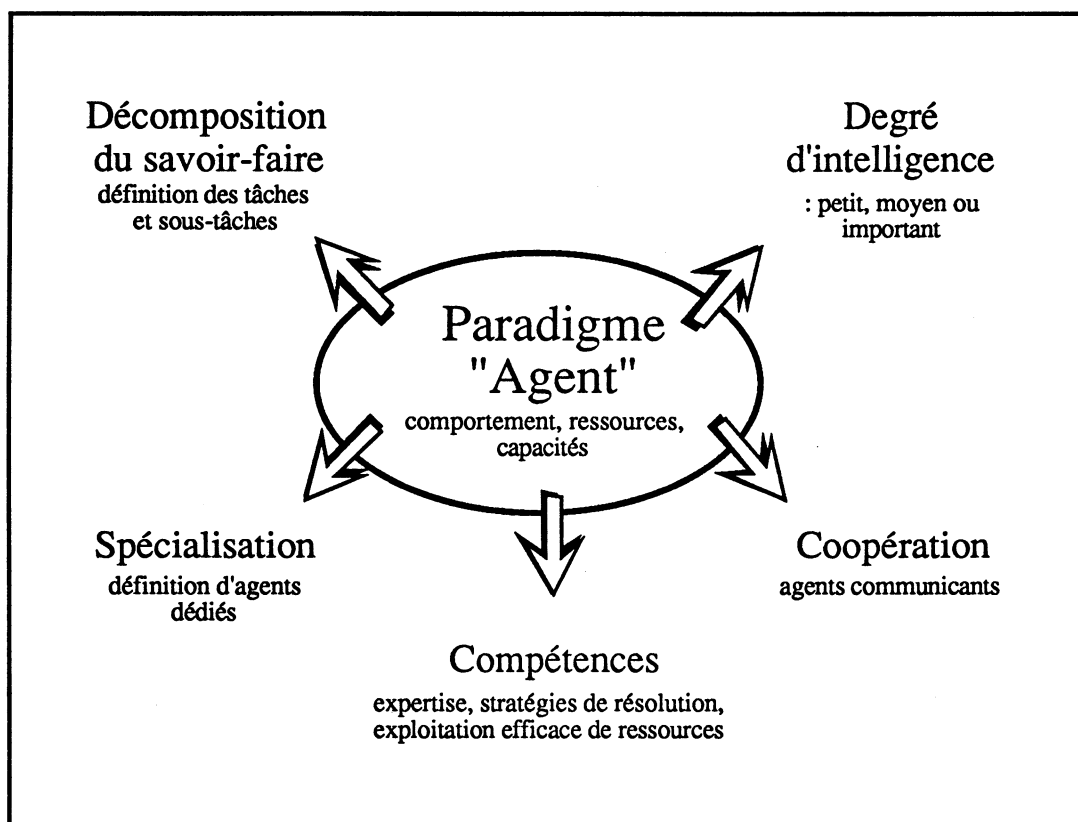


Figure 10 : le paradigme agent : ...au delà des objets.

## 1. L'agent

En ce qui concerne le point de vue de l'agent, l'étude de la structure interne de l'agent sera prise en compte pour analyser les divers types de raisonnement développés par l'agent. Le raisonnement selon le point de vue de l'agent doit en effet prendre en considération divers paramètres concernant le degré de sophistication de l'agent : ses possibilités de communication et de réaction vis-à-vis de l'extérieur, sa manière de gérer sa base de connaissances, ses compétences et son savoir-faire pour la résolution de problèmes, son degré d'autonomie dans la prise de décisions, enfin ses connaissances sur lui-même et sur autrui.

Une section est ensuite consacrée à la question du contrôle. En effet les moyens de contrôle conférés à l'agent contraignent de façon déterminante les formes de raisonnement qu'il sera capable de développer.

Enfin, nous étudions les relations entre cette approche technologique du raisonnement et l'approche formelle précédente.

### 1.1. L'agent et sa structure

La structure interne d'un agent cognitif, telle qu'elle est présentée dans cette section, est établie selon une présentation progressive, des aspects concernant les possibilités de communication et de réaction de l'agent vis-à-vis de l'extérieur vers les capacités plus internes de raisonnement sur lui-même et les autres.

La structure de l'agent est ainsi composée de quatre parties essentielles (Ferber 91) : la première partie décrit l'agent comme une entité "communiquante" et "réactive", elle est responsable des interactions avec les autres agents et l'environnement ; la deuxième partie décrit l'agent comme une entité "rationnelle", elle décrit les moyens de contrôle conférés à l'agent : les possibilités de planification et de suivi des tâches internes (demande d'une information, mise à jour de sa base de connaissances) et des tâches externes (demande d'une information à un autre agent, déplacement dans l'environnement, ...) ; la troisième partie décrit l'agent comme un "spécialiste" et dépend étroitement, bien entendu, du domaine d'application ; elle concerne ainsi l'expertise de l'agent, son domaine de compétence, son savoir-faire. Enfin, la quatrième partie décrit l'agent comme une entité "intentionnelle", elle contient de la connaissance sur lui-même et sur les autres. Cet aspect exprime la capacité que possède l'agent de raisonner sur les autres, c'est-à-dire la capacité de modéliser la connaissance (croyances) des autres agents, leurs capacités et leurs objectifs ainsi que la capacité d'anticiper leur comportement et leurs plans d'actions (leurs intentions).

Un graphe de causalité est présenté dans la figure 11. Il présente une vue partielle des degrés possibles de sophistication d'un agent, d'un degré d'intelligence minimale (agent réactif) vers un degré d'intelligence maximale (agent cognitif intentionnel) (Erceau 91). Il convient de préciser ici que les agents cognitifs "communiquants" possèdent toutes les caractéristiques des agents "réactifs", telle que la capacité de perception, mais qu'ils sont dotés de facultés supplémentaires de représentation, de raisonnement et de communication. De cette façon, chaque degré de sophistication bénéficie des capacités données aux degrés de sophistication précédents.

Ces quatre niveaux de structuration et de sophistication d'un agent sont considérés comme des paramètres permettant de définir une nouvelle typologie du raisonnement :

- raisonnements liés aux communications ;
- raisonnements liés à la gestion de la base de connaissances ;
- raisonnements liés à l'exploitation de ses propres ressources ;
- raisonnements intentionnels.

### 1.1.1. Raisonnements liés aux communications

Une étude des raisonnements liés aux communications entre agents a été effectuée par (Chaib-Draa 90). Les considérations suivantes sont inspirées de cette étude. Selon cet auteur, l'échange d'informations entre les agents participant à la coopération est vitale, non seulement pour résoudre les tâches locales, mais aussi pour améliorer la cohérence et la coordination au niveau du groupe d'agents. Dans le but d'optimiser ces échanges, il convient de les analyser de manière approfondie. Sept règles ont été identifiées par (Shimanoff 84) et formulées de la façon suivante :

- par quel moyen le message est-il transmis ?
- quel est le contenu du message ?
- qui est l'expéditeur du message ?
- à qui le message est-il envoyé ou quel est le destinataire ?
- quelle est la durée et la fréquence d'émission du message ?
- quel est le contenu du message ?
- selon quelle procédure de décision le message a-t-il été envoyé ?

Nous retiendrons de ces règles trois composantes essentielles de la problématique des communications : le moyen utilisé pour l'échange d'informations, le contenu des messages échangés et enfin le protocole utilisé.

#### *moyen de communication*

Nous avons présenté dans l'état de l'art les deux moyens de communication les plus utilisés en univers multi-agent pour l'échange d'information entre agents : la communication par partage d'informations (à base du tableau noir) et la communication par envoi de messages.

Le concept de tableau noir permet à chaque expert (source de connaissance) participant à la résolution de contribuer à la solution en affirmant, en acceptant, en critiquant ou en remplaçant les hypothèses déjà inscrites sur le tableau noir. La solution globale se construit donc par

combinaisons d'interprétations partielles dérivées de connaissances et de compétences diverses. Autrement dit, la solution globale est obtenue de manière itérative.

Cependant, il convient de rappeler que l'un des inconvénients des approches de tableau noir, en ce qui concerne l'échange d'informations, est que le tableau noir, lorsqu'il est unique, devient un goulot d'étranglement dès que l'échange devient important ; s'il en existe plusieurs, on en vient à des communications par envoi de messages entre tableaux noirs.

### *contenu des communications*

La coopération entre plusieurs agents implique qu'ils doivent être capables de faire progresser la résolution même s'ils ne transmettent que des informations incomplètes, incertaines et imprécises, voire même des tentatives de solutions partielles. Cette contrainte résulte des trois raisons :

- La première est liée à la bande passante limitée des moyens de communication, qui impose un contenu des messages aussi condensé que possible. Aussi, les agents doivent-ils pouvoir utiliser des informations incomplètes de haut niveau, sans avoir à s'échanger des données détaillées de bas niveau.
- La deuxième raison est que, dans bien des problèmes, la solution globale doit être obtenue par raffinements successifs. Ceci nécessite alors, de la part des participants, un échange de tentatives de solutions partielles plutôt que des solutions complètement élaborées.
- La troisième raison enfin, est que le contenu des messages est généralement affecté par l'incertitude et l'imprécision causées par les canaux de transmission. Ceci oblige alors les agents à raisonner à partir d'informations au contenu incertain et imprécis.

Le contenu des messages échangés a une incidence directe sur la cohérence du groupe d'agents. **Durfee, Lessser et Corkill (1985)** suggèrent de dégager certaines caractéristiques majeures du contenu des messages, pour montrer cette incidence. A cet effet, les auteurs proposent les trois caractéristiques suivantes : la pertinence, l'étendue et l'apport du message. La pertinence mesure la quantité d'information consistante avec la solution actuelle, l'étendue quantifie l'influence du message sur le destinataire, et l'apport définit la contribution du message à la solution globale.

***protocole de communication***

Un protocole de communication est un ensemble de règles qui spécifient la manière de mettre en œuvre des communications correctes et effectives entre agents. Divers critères existent déterminant le choix d'échange d'informations entre agents (Mc Arthur 83), ainsi :

- communications sélectives ou communications transmises à tous : les agents savent ou non avec qui ils communiquent ;
- communications non sollicités ou à la demande : les agents doivent déduire le besoin informationnel d'autres agents pour communiquer avec eux ou au contraire ne communiquent que sur leur demande ;
- communications avec ou sans accusé de réception : ce critère détermine si l'agent destinataire doit ou non avertir l'émetteur qu'il a reçu l'information ;
- communications répétées ou envoyées une seule fois.

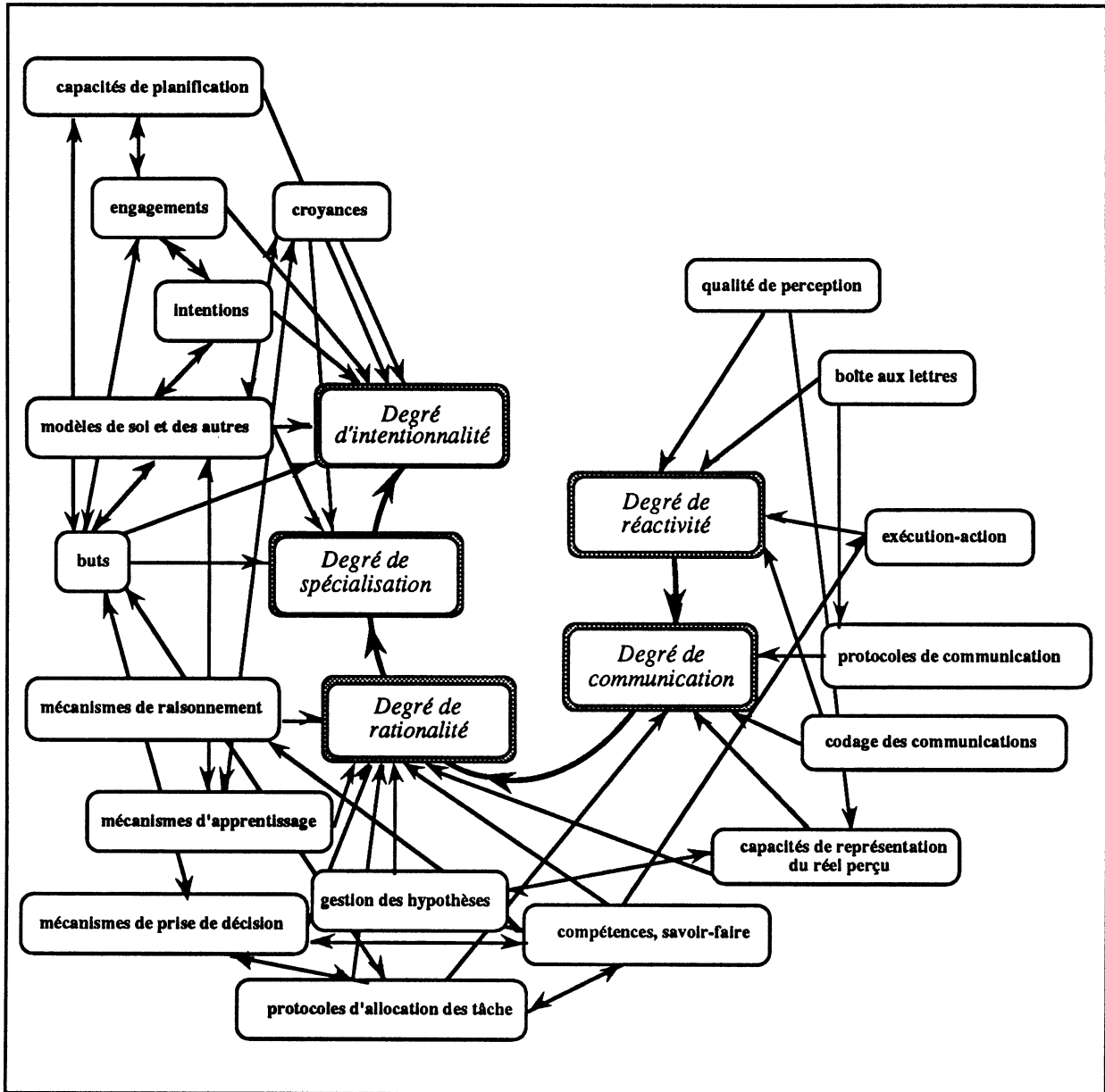
Les décisions à entreprendre pour établir une communication avec un agent sont les suivantes :

- décider de communiquer ;
- contenu de la communication ;
- choix du destinataire ;

De plus, il est crucial de respecter son protocole de communication. En ce qui concerne la réception de messages, il convient de définir les comportements à adopter face à une requête donnée. Ces comportements de haut niveau relèvent des raisonnements complexes qui se développent au niveau intentionnel.

**1.1.2. Raisonnements liés à la gestion de la base de connaissances**

Les raisonnements liés à la gestion de la base de connaissances impliquent le contrôle des opérations d'accès à la base de connaissances, et de mise en œuvre des tâches ainsi que les décisions de demande d'information et de délégation de tâches (demande explicite d'exécuter une action). Une recherche d'information, effectuée sur requête externe, ou du fait d'un besoin interne, peut en effet échouer si la base de connaissances de l'agent est incomplète : la demande de recherche doit alors être transmise au sein du réseau. Il en va de même pour l'exécution des tâches que l'agent ne peut assurer : la tâche est dans ce cas déléguée à d'autres agents.



**Figure 11 :** Graphe de causalité présentant une vue partielle des degrés possibles de sophistication d'un agent, d'un degré d'intelligence minimale (agent réactif) vers un degré d'intelligence maximale ("agent cognitif intentionnel").

### 1.1.3. Raisonnements liés à l'exploitation de ses propres ressources

Les raisonnements liés à l'exploitation de ses propres ressources concernent les compétences de l'agent vues à deux niveaux différents selon le degré de dépendance au domaine d'application. Les compétences "dédiées", dépendantes du domaine d'application, sont exprimées par l'expertise de l'agent, son savoir-faire dans un domaine spécifique ou plus



précisément les critères de sélection des objets et des actions les plus pertinents à un moment donné de la résolution. Les compétences “générales”, d’autre part, regroupent les facultés données à l’agent dans l’exploitation de ses ressources (vérification de cohérence, capacité de sélection, capacité d’exécution, ...) ainsi que les comportements par lesquels ces facultés sont mises en œuvre (enchaînement de décisions d’exploitation).

#### 1.1.4. Raisonnements intentionnels

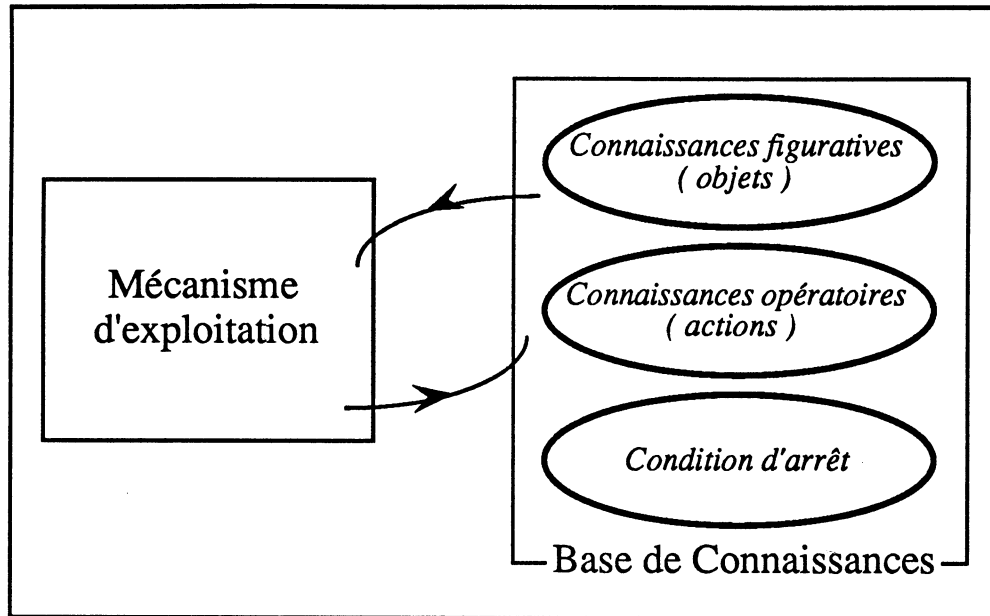
Ces formes de raisonnements sont développées au sein des agents pourvus d’“intentionnalité”. Ces raisonnements permettent aux agents d’analyser leurs propres capacités à résoudre un problème, et de décider de la meilleure façon d’exploiter ces capacités. Ils leur permettent également de raisonner en fonction des connaissances dont ils disposent sur les autres agents, et d’adapter de cette façon leur comportement vis-à-vis de l’extérieur.

### 1.2. Le contrôle

Un raisonnement a été défini, dans le chapitre précédent, comme un enchaînement de jugements visant à décider des actions à entreprendre et des éléments auxquels appliquer ces actions (ou vice-versa) ; dans le cas d’un agent, tout raisonnement développé au sein de cet agent est contraint par la structure de contrôle choisie préalablement. Celle-ci détermine en effet les modes élémentaires d’exploitation de la connaissance.

Nous optons ici pour une définition classique de la notion de structure de contrôle, empruntée aux systèmes experts. Cette définition, du fait de ses liens avec certains aspects de l’approche formelle proposée précédemment, sera reprise pour étudier le raisonnement aux différents niveaux d’un système multi-agent.

Une réflexion approfondie sur le thème du contrôle dans les systèmes experts a été menée par (Laurent 84). Selon cet auteur, le contrôle est introduit comme un mécanisme d’exploitation d’une base de connaissances (figure 12) : il est ici considéré qu’une base de connaissances est constituée d’objets ou faits (connaissances figuratives), d’actions (connaissances opératoires) et d’une condition d’arrêt. Exploiter une telle base signifie donc appliquer certaines actions à certains faits pour obtenir de nouveaux faits. L’opération sera répétée jusqu’à vérification de la condition d’arrêt.



**Figure 12 :** Mécanisme d' exploitation d'une Base de Connaissances.

Le contenu de la base de connaissances est ainsi modifié à chaque étape, et son état à un instant donné peut être décrit par un ensemble d'objets, d'actions et une condition d'arrêt à vérifier. A chaque exploitation correspond donc une transition d'état, et le contrôle est alors décrit comme le mécanisme permettant d'opérer une telle transition. Ce mécanisme doit en outre gérer le développement de l'espace de recherche, c'est-à-dire exploiter plutôt les états susceptibles de conduire rapidement à l'état solution. Il convient également de déterminer les transitions les mieux adaptées, dans ce but, et donc finalement de sélectionner à chaque étape les objets et actions de la base de connaissances dont l'exploitation paraît convenir.

Si le choix des critères présidant à de telles sélections ne relève pas du rôle imparti au contrôle, leur application en est au contraire partie intégrante. Trois structures de contrôle différentes peuvent ainsi être définies, selon que la sélection d'objets précède, suit, ou se combine à la sélection d'actions (d'après **Laurent 84**) :

- OA : recherche et sélection des objets susceptibles de transition  
recherche et sélection des actions applicables  
exécution
- AO : recherche et sélection des actions possibles  
recherche et sélection des objets associés  
exécution
- C : recherche et sélection d'un couple (action,objet) susceptible de transition  
exécution

### 1.3. Relations entre typologie formelle et typologie technologique

Des deux études précédentes sur la notion de raisonnement chez un agent, et la notion de cycle de contrôle chez un système expert, il ressort les notions importantes suivantes :

- distinction entre information, action ou tâche, et agent responsable d'une tâche particulière ;
- notion d'information au contenu incertain et imprécis, raisonnement en univers incomplet ;
- capacité à sélectionner de manière adaptée une information à transmettre ou à exploiter, une tâche à exécuter ou à déléguer ;
- capacité à communiquer avec d'autres agents, plus précisément à choisir le ou les agents avec lesquels il est pertinent de communiquer ;
- distinction entre compétence dédiée et compétence générale ;
- existence d'un niveau intentionnel de raisonnement, correspondant à une capacité (compétence) générale de raisonnement sur soi-même et sur les autres.

La typologie formelle des raisonnements établie au chapitre III ("Le raisonnement") de la partie B, se révèle ainsi utile ici pour distinguer et analyser les divers raisonnements développés par un agent. En effet, un agent peut développer des raisonnements primaires fonctionnels lorsqu'il s'agit de sélectionner des connaissances de type figuratif (objet) ou opératoire (action), des raisonnements structurels lorsqu'il utilise des critères intrinsèques, contextuels ou compositionnels pour effectuer une telle sélection. Des raisonnements hybrides, concernent ici l'interaction effectuée par un agent entre deux des raisonnements primaires donnés précédemment.

La sélection d'agents, quant à elle, peut être fondée sur des critères intrinsèques, permettant de choisir un agent selon les ressources effectives dont il dispose. Par ailleurs, la décision même d'envoyer une information ou de déléguer une tâche à un agent implique divers critères, par exemple de type réflexif (état de ressources de l'émetteur), intrinsèques (propriétés de l'information ou de la tâche) ou contextuels (état de la résolution).

## 2. Le groupe d'agents

La présentation précédente met en évidence l'existence de plusieurs niveaux de décision, et donc de raisonnements, au sein d'un agent. On définit ensuite le raisonnement au niveau du groupe comme un enchaînement de décisions de délégation de tâches et de sélection d'agents, de décisions de transmissions et de traitements d'information.

Le raisonnement au niveau du groupe d'agents (société d'agents) dépend essentiellement des choix effectués au niveau du groupe d'agents sur les trois paramètres suivants, qui régissent l'organisation et le fonctionnement du groupe :

- la distribution des tâches et des compétences ;
- les modes et protocoles de communications ;
- les modes d'organisation et de coopération.

La **distribution des tâches et des compétences** peut être effectuée de façon modulaire ; l'expertise peut également être décomposée selon des points de vue multiples ou concurrents. Il est nécessaire dans ce dernier cas de conférer au réseau de nouvelles capacités de raisonnement lui permettant de gérer les conflits issus des résolutions effectuées en concurrence.

Les **modes et protocoles de communication** établissent les moyen puis les modes de communication entre agents. Deux types de systèmes multi-agents se distinguent selon que l'échange d'informations est effectué à travers une mémoire commune ou tableau noir (mécanisme implicite de communication) ou par envoi de message (mécanisme explicite de communication). Dans le cas du tableau noir, le raisonnement sur les communications devient plus simple dans le sens que les agents ne communiquent pas directement avec les autres agents. Le problème de la sélection du destinataire ne se pose pas dans ce cas.

Les **modes d'organisation et de coopération** décrivent la manière dont un groupe d'agents coopère pour la résolution d'un problème. Cette coopération dépend de nombreux facteurs tels que les rôles impartis aux agents, l'étendue et l'apport des informations échangées entre agents.

Le fait de choisir un mode de coopération fondé sur le formalisme de la "négociation", par exemple, implique des capacités importantes de raisonnements pour l'établissement des contrats et la synchronisation des tâches entre agents appartenant à un même groupe. Dans les approches fondées sur l'"échange de résultats intermédiaires" une forme de raisonnement est particulièrement traitée, qui est focalisée sur le maintien de la cohérence des différentes bases de connaissances des agents.

Une autre forme de raisonnement, liée à la génération de plans, apparaît comme problématique essentielle dans les approches fondées sur la “planification locale”. Il s’agit ici de créer plusieurs types de plans, dans le but de planifier les tâches non seulement au niveau individuel mais aussi de façon coordonnée au niveau du groupe. Dans les approches “organisationnelles” l’allocation des rôles ainsi que l’établissement des relations entre agents sont effectuées a priori, par création d’une organisation adaptée au problème à résoudre.

En résumé, on voit apparaître au niveau du groupe de nouvelles problématiques concernant :

- le développement de stratégies de résolution et la planification des tâches ;
- la synchronisation et le suivi des activités ;
- la résolution des conflits et le maintien de la cohérence ;
- l’allocation des rôles et des tâches.

Pour implanter ces formes nécessaires de raisonnement divers choix se présentent :

- créer des agents spécialistes dans certaines formes de raisonnement (c’est le cas des systèmes à base du tableau noir, où des sources de connaissances peuvent être dédiées exclusivement aux tâches de contrôle, par exemple) ;
- alterner les rôles entre agents (c’est le cas dans les approches par négociation, où les agents alternent les rôles, d’“employeur” à “employé”, par exemple) ;
- simplifier et encapsuler divers types de comportements de haut niveau dans les agents (c’est le cas des systèmes à envoi des messages).

Il est clair qu’un compromis doit être trouvé entre les choix effectués dans l’architecture interne des agents, qui contraignent les formes de raisonnement développées au niveau local, et les choix effectués dans l’organisation du groupe d’agents, qui contraignent, quant à eux, le raisonnement à un niveau plus global. On observe de plus une interdépendance entre les choix adoptés sur l’architecture interne des agents et les choix concernant l’organisation du groupe.

### 3. Exemple : approches à base du tableau noir

Une brève revue est tout d'abord présentée sur le raisonnement, tel qu'il se déroule dans les systèmes à base du tableau noir. Cette revue ne prétend pas être exhaustive mais elle essaie de soulever quelques aspects importants de cette approche au niveau individuel et du groupe d'agents.

#### 3.1. L'agent

##### *les communications*

L'aspect primordial du modèle du tableau noir est la notion de communication par partage de l'information (Maître 88a). Un système à base de connaissances conçu sous ce type d'architecture est composé par un ensemble de sources de connaissances modulaires et indépendantes qui communiquent au travers d'une zone d'information partagée appelée tableau noir (figure 1).

La structure du tableau noir représente ainsi le seul moyen pour une source de connaissances de communiquer avec d'autres sources de connaissances, lesquelles sont entièrement inconnues pour elle.

##### *la gestion de la base*

Le tableau noir est une base de données partageable contenant des informations en entrée, des résultats intermédiaires et des solutions. Il est divisé en plusieurs niveaux hiérarchiques qui contiennent l'ensemble des hypothèses de même niveau générées par les sources de connaissances correspondantes. Pour la reconnaissance de la parole, par exemple, les niveaux typiques représentent une séquence de phonèmes, de syllabes, de mots ou des phrases. Les éléments d'un niveau sont des abstractions des niveaux inférieurs.

##### *compétences*

Les sources de connaissances contiennent le savoir-faire du domaine, sous forme de règles de production (condition, action). Lorsque la condition est satisfaite par une hypothèse inscrite sur le tableau noir, la source de connaissances associée à cette condition devient activable. La partie action consiste à accéder au niveau d'hypothèse concerné du tableau noir et assigner à chaque hypothèse déduite un coefficient de crédibilité. Les sources de connaissances sont ainsi appliquées de façon opportuniste (en fonction de l'état du problème et de l'objectif visé) pour changer l'état du système et ainsi contribuer à la génération d'une solution.

##### *couche intentionnelle*

L'intentionnalité dans les systèmes à base de tableau noir se réduit au contrôle appliqué sur la source de connaissances et permettant son activation. Le contrôle sur la source à appliquer à un

moment donné est mis en place au travers d'un des mécanismes suivants : par un agenda (approche supervisée), par les sources elles-mêmes (dans ce cas, elles sont capables de s'activer de façon autonome), par des mécanismes d'activation se trouvant à l'intérieur du tableau noir lui-même (démons implantés au sein des objets), ou par combinaison des ces trois mécanismes.

### 3.2. Le groupe d'agents

#### *distribution des tâches et des compétences*

La caractéristique la plus significative du système du tableau noir est de permettre de décomposer un problème en sous-tâches faiblement couplées. Ces sous-tâches correspondent à des zones de spécialisation au sein de la tâche. L'espace de solution est décomposé en régions contenant des solutions partielles ou intermédiaires. La connaissance est à son tour décomposée en sources de connaissances spécialisées (sources de connaissances) lesquelles exécutent la sous-tâche. L'information de chaque région est globalement accessible sur le tableau noir, devenant ainsi le moyen d'interaction parmi les sources de connaissances.

#### *modes et protocoles de communication*

Puisque toute communication entre sources de connaissances se fait au travers de la zone d'information partagée ou tableau noir les protocoles de communication sont ici assez simples. Bien entendu, le tableau noir en tant que moyen de communications impose un certain protocole quant à la forme et au contenu des informations échangées.

Comme nous l'avons énoncé précédemment, l'un des inconvénients des approches de tableau noir, en ce qui concerne l'échange d'information, est que si un système est muni d'un seul tableau noir pour la résolution, il devient un goulot d'étranglement dès que l'échange entre sources de connaissances devient important. S'il en existe plusieurs, on en vient à des communications par envoi de messages entre tableaux noirs. De cette façon, les tableaux noirs serviraient ici à l'échange local entre experts (sources de connaissances) d'un même système, et l'échange de messages serait utilisé pour le partage d'informations entre systèmes munis chacun de son tableau noir.

#### *modes d'organisation et de coopération*

Les axes d'organisation définis pour le tableau noir définissent eux même des modes d'organisation des agents par niveau d'abstraction, chaque niveau d'abstraction étant lié à une hiérarchie d'agents, ou sources de connaissances associées à divers niveaux d'analyses, ceux-ci donnés par la décomposition dans la résolution du problème.

*quelques avantages de cette approche*

La décomposition particulière du problème et le mode d'activation des sources de connaissances exhibe divers avantages:

- Modularité: du fait de son architecture modulaire, la conception, la validation et la maintenance du système sont facilitées ;
- Contrôle dynamique: l'architecture du système permet un contrôle ample sur la stratégie de solution du problème ;
- Efficience ;
- Concurrence: la modularité et la structure de contrôle flexible du système facilitent la concurrence de processus.

Ces propriétés font du tableau noir un système particulièrement adapté pour des types de problèmes qui présentent les caractéristiques suivantes:

- utilisation de divers types de connaissances différentes et spécialisées ;
- intégration d'informations disparates ;
- domaine exhibant une hiérarchie intrinsèque ;
- données continues ;
- applications présentant des connaissances/données éparses (Engelmore 88).

*quelques inconvénients de cette approche*

Le principal inconvénient caractérisant le système du tableau noir par rapport à d'autres systèmes multi-agents est le fait que chacune des sources de connaissances opère en mode guidé par les données, effectuant ainsi des lectures et des écritures assez fréquentes sur le tableau noir ; ces opérations conduisent ainsi vers un nouvel état de la résolution. De ce fait, le temps de calcul augmente et le système diminue en efficacité. L'architecture complexe du tableau noir fait de lui un système inapte pour des problèmes de simple complexité, qui requièrent une quantité limitée de connaissances (Lesser 77), (Nii 83).

Dans tous les cas, un compromis doit être atteint entre la puissance de raisonnement fournie aux agents individuellement et la complexité des modalités d'interactions et coopérations introduites au niveau du groupe. La manière la plus courante de concevoir un système à base de connaissances multi-expert implique l'affectation de schémas de raisonnement simples aux agents alors que la puissance de raisonnement est déléguée au groupe d'agents : la façon de distribuer les connaissances et les tâches au sein du système devient ainsi un aspect primordial. Il s'agit donc de concevoir une population d'agents où son comportement (raisonnement émergent) amène le système entier vers la solution du problème.



#### 4. Quelques considérations sur l'explication du raisonnement

Un grand nombre des systèmes à base de connaissances possèdent ce qui est connu sous le terme de "capacités d'explication". Il s'agit des connaissances sur la manière selon laquelle le système atteint ses conclusions. Beaucoup de ces explications impliquent l'affichage des chaînes d'inférence et l'explication des raisons justifiant la présence de chaque règle au sein de la chaîne. La capacité d'examiner leurs modes de raisonnement et d'expliquer leur manière d'opérer est une des qualités les plus importantes et les plus innovatrices des systèmes experts.

La connaissance qu'un système possède sur sa façon de raisonner est ce que nous avons appelé une connaissance réflexive. Il convient ici de souligner l'importance que représente pour les systèmes à base de connaissance le fait de pouvoir disposer de capacités d'explication ; quelques-unes des raisons sont les suivantes :

- Les utilisateurs ont plus de confiance dans les résultats obtenus, et donc ils auraient plus de confiance dans le système lui-même ;
- Le développement des applications devient plus rapide du fait des facilités de débogage du système ;
- Les suppositions sous-tendant les opérations du système sont codées de façon plus explicite qu'implicite ;
- Il est plus facile de prédire et vérifier les effets d'un changement d'une opération système.

Le mécanisme d'explication le plus couramment utilisé est le "raisonnement rétrospectif", qui explique comment le système a atteint un état donné. Les mécanismes d'explication peuvent aussi manipuler du "raisonnement hypothétique" : dans ce cas le système anticipe ce qui serait arrivé si un fait particulier ou une règle avait été codé différemment. Enfin, un système développe un "raisonnement par réfutation" quand il doit expliquer pourquoi des conclusions espérées non pas été atteintes.

La contribution des systèmes à base de connaissances de seconde génération, en particulier les systèmes multi-agents, à l'explication du raisonnement comporte deux aspects. D'une part, la nouvelle architecture de ces logiciels leur confère une compréhension plus profonde de leur raisonnements, laquelle peut être exploitée pour l'explication. Dans les systèmes multi-agents en effet la décomposition de l'expertise et du savoir-faire permet de localiser plus précisément les contextes au sein desquels se déroulent les divers types de raisonnement, tant au niveau individuel de l'agent qu'au niveau du groupe.

D'autre part le raisonnement explicatif peut s'analyser avec profit en termes de raisonnement de surface et de raisonnement profond. En effet, les explications qui peuvent être associées aux connaissances de surface ne sont que la trace de leur exécution. Cette trace montre parfois l'utilisation d'arguments abscons et le raisonnement ainsi décrit est souvent un raccourci peu compréhensible par le non-expert (Charlet 89). Les connaissances profondes au contraire expliquent, justifient, et donnent des indications sur le raisonnement suivi par l'expert pour traiter un problème et sur la stratégie qu'il adopte (Aussenac 89).

On peut ainsi se questionner sur les relations entre la distinction connaissances de surface / connaissances profondes et la distinction agent / groupe d'agents telle qu'elle est envisagée dans les systèmes multi-agents.

La notion de raisonnement profond peut être associée à la notion d'organisation architecturale d'un groupe d'agents travaillant ensemble à la résolution d'un problème. Cette organisation définit en effet la démarche générale de résolution de ce problème. La notion de raisonnement de surface, quant à elle, peut être associée aux raisonnements spécifiques d'un domaine d'application. De tels raisonnements sont effectués individuellement par un agent et illustrent son savoir-faire.



## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une typologie technologique comme outil de réflexion pour l'étude du raisonnement en univers multi-agent. Cette typologie technologique a été examinée selon les deux points de vue suivants : le point de vue de l'agent et le point de vue du groupe d'agents (société d'agents). L'apport des différents paramètres composant la typologie technologique est tout d'abord de clarifier les choix possibles pour cette technologie et de les organiser adéquatement. Il est ensuite possible en fonction de ces paramètres de spécifier et de définir différents types de comportements tant au niveau individuel de l'agent qu'au sein du groupe d'agents. Ces comportements doivent pouvoir s'intégrer et s'articuler pour constituer des comportements plus complexes. Ces comportements de haut niveau possèdent ainsi la caractéristique d'être bien adaptés pour la résolution des démarches générales de résolution ou pour traiter des situations dans un contexte précis.

Une rapprochement intéressant a été proposé, qui consiste à associer la notion de raisonnement profond à la notion d'organisation architecturale d'un groupe d'agents travaillant ensemble à la résolution d'un problème. Cette organisation définit en effet la démarche générale de résolution de ce problème. Les agents individuellement font, quant à eux, des raisonnements de surface, c'est-à-dire spécifiques d'un domaine d'application. C'est ainsi qu'une même organisation peut être utilisée pour résoudre des problèmes analogues dans des domaines différents. Il suffit dans ces cas, de changer l'expertise et le savoir-faire des agents individuellement, ce qui correspond aux raisonnements de surface, et ainsi obtenir des solveurs spécialisés dans d'autres domaines.



*L'environnement de programmation*  
**MAPS**  
*(Multi Agent Problem Solver)*

---

<b>Introduction</b> .....	165
<b>1. Structure de base des agents</b> .....	165
1.1. L'architecture interne des agents.....	165
1.2. Les communications.....	166
1.3. La gestion des bases de connaissances.....	167
1.3.1. Agents KS.....	167
1.3.2. Agents KP.....	168
1.4. Les compétences.....	168
1.4.1. Agents KS.....	168
<i>capacité de propagation</i> .....	168
<i>capacité de proposition</i> .....	169
<i>capacité d'interrogation</i> .....	169
1.4.2. Agents KP.....	169
1.5. La couche intentionnelle : comportements de haut niveau.....	170
1.5.1. Agents KS.....	170
1.5.2. Agents KP.....	172
<b>2. Groupe d'agents</b> .....	174
2.1. Distribution des tâches et de compétences.....	174
2.2. Modes et protocoles de communication.....	175
2.3. Modes d'organisation et de coopération.....	175
2.4. Enchaînement des cycles de contrôle.....	177

<b>3. Le langage de programmation MAPS.....</b>	<b>178</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>181</b>

# *L'environnement de programmation MAPS (Multi Agent Problem Solver)*

---

### **Introduction**

MAPS (Multi-agent Problem Solver) est un environnement de programmation générique dédié à la conception de systèmes experts multi-agents (Baujard 90). Chaque agent dans MAPS est conçu comme un système expert à part entière qui dispose de ressources, possède des comportements et des capacités locales de raisonnement, enfin peut communiquer avec d'autres agents pour coopérer à la résolution d'un même problème. Les agents communiquent par envoi de messages et réagissent ainsi à des événements extérieurs, selon des comportements spécifiques.

Nous rappelons tout d'abord la structure de base des agents de MAPS. Nous détaillons ensuite les modes d'organisation et de coopération au niveau du groupe d'agents et enfin nous présentons un bref paragraphe sur le langage de programmation MAPS.

### **1. Structure de base des agents**

Nous décrivons en premier lieu l'architecture interne des agents, puis les modes de communication, les modes de gestion de la base de connaissances, les compétences et enfin les comportements des agents MAPS.

#### **1.1. L'architecture interne des agents**

Un agent est mis en œuvre sous la forme d'une hiérarchie d'objets disposant d'attributs et de méthodes. Il est doté de surcroît de méthodes supplémentaires lui permettant d'une part de gérer l'information dont il dispose et d'autre part de définir son comportement vis-à-vis de



l'extérieur. On peut donc considérer un agent comme une extension naturelle de la notion d'objet .

MAPS met en jeu deux types d'agents : les KS (Knowledge Server), dont le rôle est de représenter, stocker et diffuser des connaissances figuratives et les KP (Knowledge Processor) dont le rôle est de représenter et mettre en œuvre des connaissances opératoires.

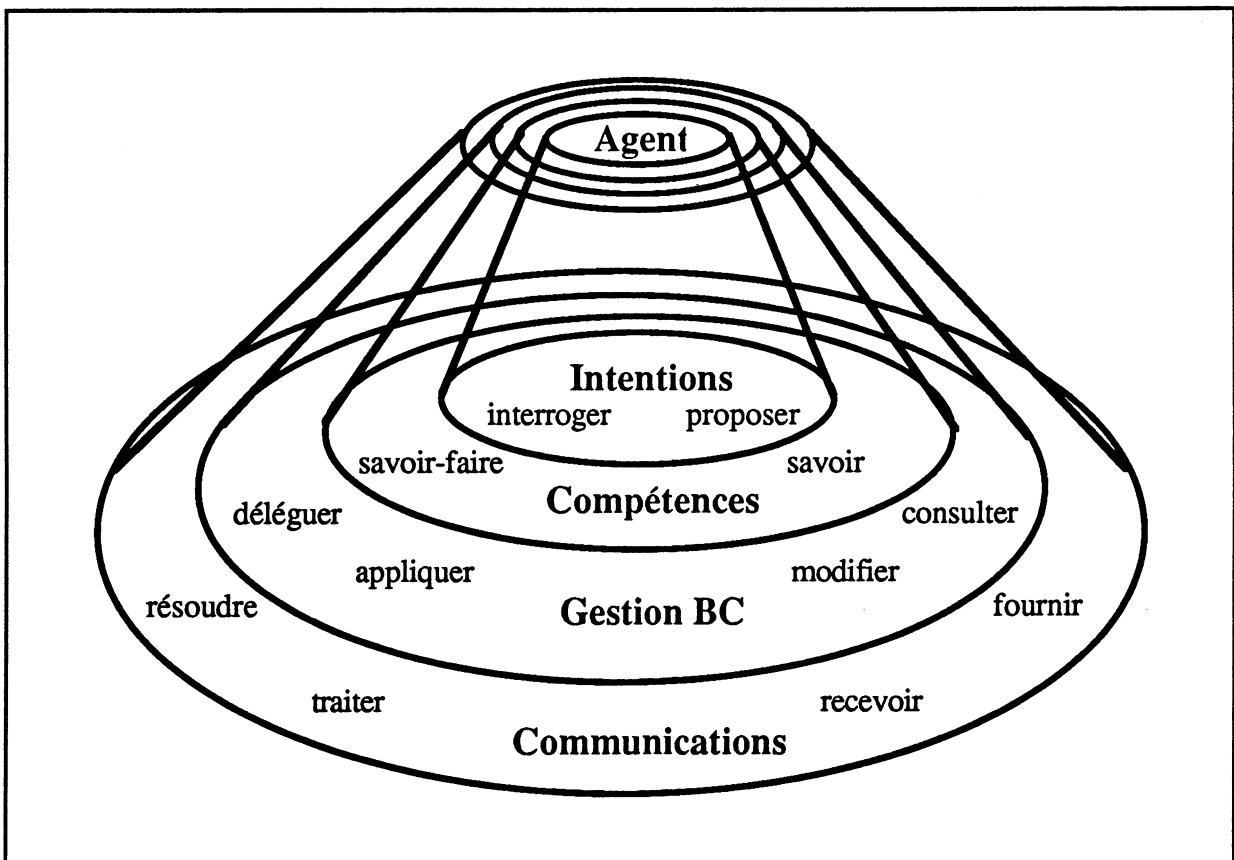


Figure 14 : La structure en anneau des agents

En suivant la terminologie adoptée dans le chapitre précédent, on distingue les quatre couches de structuration interne suivantes : la couche des communications, la couche de gestion de la base de connaissances, la couche des compétences et enfin la couche intentionnelle. Ces couches sont représentées dans la figure 14.

## 1.2. Les communications

La couche extérieure définit le comportement social de l'agent, vu comme une entité autonome qui réagit face aux événements extérieurs. La communication entre les divers agents se fait par

envoi de messages, en mode "commande" (Hautin 86) et non pas par partage de l'information comme dans l'approche de tableau noir. Un message est de la forme (Nom-de-requête, Agent-destinataire, Nom-de-Méthode, Paramètres-d'Envoi).

Quatre types de requêtes sont utilisées pour l'échange d'informations entre agents MAPS : les requêtes "Recevoir et Fournir" sont adressées aux agents KS et les requêtes "Traiter et Résoudre" sont adressées aux agents KP.

A travers la requête "Recevoir", un agent KS reçoit de nouvelles informations provenant des agents KP qui pourront éventuellement actualiser sa base de connaissances. A travers la requête "Fournir" un agent KS reçoit une demande d'information de la part d'un agent KP. Des comportements différents seront développés selon que l'agent KS sollicité dispose ou non de cette information.

A travers la requête "Traiter" un agent KP reçoit la commande explicite de traiter une information donnée. A travers la requête "Résoudre" un agent KP reçoit la demande de résoudre un problème (spécification du but à atteindre). Ces deux requêtes entraînent des sélections parmi le groupe des règles dont dispose l'agent KP. Dans le cas de la requête Résoudre, la réponse est envoyée par retour à l'agent KS demandeur.

### **1.3. La gestion de la base de connaissances**

La couche de gestion de la base de connaissances comprend les opérations classiques d'accès à une base de connaissances telles que consulter des éléments de connaissance, modifier des attributs, appliquer une action mais aussi déléguer des sous-tâches. Il est clair, que toutes les opérations de bas niveau effectués par le moteur d'inférence telles que la restriction et l'application des règles de production sont effectuées ici.

#### **1.3.1. Agents KS**

Les ressources d'un agent KS comprennent les éléments figuratifs du sous-domaine étudié, un jeu de règles dites primaires dont le rôle est de vérifier et de propager de nouvelles données (règles de propagation), ainsi que deux jeux de règles exploratoires dont la fonction consiste à gérer la recherche des informations à transmettre ou à requérir vis-à-vis de l'extérieur (règles de proposition et règles d'interrogation).

Les mécanismes d'accès à la base de connaissances du KS sont répartis en deux jeux de méthodes. Les méthodes "Obtenir" et "Modifier" d'une part, contrôlent les accès en lecture ou

en écriture à une connaissance élémentaire quelconque. Les méthodes "Proposer" et "Compléter" d'autre part, conditionnent la sélection des informations diffusables vers l'extérieur (Proposer) ou bien devant être requises (Compléter). Elles activent le moteur d'inférence en lui fournissant le jeu requis de règles exploratoires.

### 1.3.2. Agents KP

Un agent KP a pour rôle de représenter et de mettre en œuvre un ensemble de connaissances opératoires. Les ressources de sa base de connaissances comprennent les éléments opératoires (règles d'inférence ou procédures d'analyse correspondant à un sous-problème donné) et un jeu de méta-règles permettant de contrôler la sélection des éléments opératoires (règles de stratégie). Leur manipulation est contrôlée par un moteur d'inférence propre, travaillant en marche avant ou en marche arrière.

## 1.4. Les compétences

La couche de compétences comprend tout d'abord les compétences "dédiées", dépendantes du domaine d'application et exprimées par l'expertise de l'agent, son savoir faire dans un domaine spécifique. Il s'agit des règles de sélection des objets et des actions les plus intéressants à utiliser à un moment donné de la résolution. Cette couche comprend également les compétences indépendantes du domaine d'application qui sont les facultés de propager, de proposer ou de requérir des informations, de sélectionner ou d'appliquer des éléments opératoires.

### 1.4.1. Agents KS

Comme nous l'avons établi auparavant le rôle des agent KS consiste à représenter et stocker des éléments figuratifs du sous-domaine étudié. Son expertise et son savoir-faire sont exprimés d'une part par des éléments figuratifs et d'autre part au travers de trois types de règles.

Les compétences d'un agent KS peuvent être mesurées en premier lieu par le contenu "dédié" des règles, contenu qui dépend du domaine d'application. Deuxièmement, les compétences d'un agent KS se reflètent par ses capacités de propagation, de proposition et d'interrogation. Ces capacités sont indépendantes du domaine d'application.

#### *capacité de propagation*

La capacité de propagation permet la mise en œuvre d'activités telles le maintien de la cohérence et la complétion dynamique de la base de connaissances.

***capacité de proposition***

La capacité de proposition permet à l'agent KS de sélectionner des éléments figuratifs à transmettre à des agents KP à des fins de traitements. Une sélection parmi les agents KP est effectuée simultanément qui spécifie l'agent KP auquel la requête est adressée.

Une planification des traitements à appliquer peut être effectuée, par l'écriture de règles de proposition comportant des prémisses complexes.

***capacité d'interrogation***

La capacité d'interrogation permet à l'agent KS de sélectionner une donnée-problème ou donnée-hypothèse à transmettre à un agent KP pour résolution ou vérification. La requête est ici transmise en mode appel d'offres, sur une liste restreinte de partenaires possibles.

Ces trois capacités interagissent de façon coordonnée. Les règles de proposition et d'interrogation procèdent en effet à la sélection explicite d'objets données ou buts : un agent KS peut ainsi décider du basculement entre résolution dirigée par les données et résolution dirigée par les buts. A cette sélection d'objet est couplée la sélection d'un agent particulier (proposition) ou au contraire un envoi en mode appel d'offres (interrogation). Les activités de propagation, quant à elles, sont plutôt des activités de type réflexe.

**1.4.2. Agents KP**

Un agent KP a pour rôle de représenter et de mettre en œuvre un ensemble de connaissances opératoires. De la même façon que pour les agents KS ses capacités peuvent être mesurées par le contenu "dédié" de ses règles, mais aussi par ses capacités de sélection des règles d'action les plus adéquates. De plus, il possède des capacités de bas niveau d'application des règles d'action sélectionnées.

Les agents KP disposent en outre des deux méthodes "Traiter-données" et "Traiter-problème". Leur rôle est de contrôler la mise en œuvre des processus de traitement de l'information ou de résolution de problème en fournissant les méta-règles et les règles au moteur d'inférence. Selon qu'il est nécessaire de requérir ou de transmettre une information, une requête "Recevoir" ou "Fournir" sera transmise à un agent KS.

**1.5. La couche intentionnelle : comportements de haut niveau**

**1.5.1. Agents KS**

Comme nous l'avons présenté dans la couche de communication, tout agent KS peut être activé par deux types de requêtes : Recevoir et Fournir. Des comportements particuliers (ou raisonnements de haut niveau) se développent face à ces requêtes, sous la forme suivante :

<p><b>Recevoir</b>                  (ET Modifier                  Propager                  (OU (ET Proposer info                  SEND KP Traiter info)                  (ET Interroger pb                  SEND KP Résoudre pb)))</p>	<p><b>Fournir</b>                  (OU Obtenir                  SEND KP Résoudre pb                  (ET Proposer info                  SEND KP Traiter info)                  (ET Interroger pb                  SEND KP Résoudre pb)))</p>
---	--

Les agents raisonnent ainsi de façon autonome sur la meilleure façon de répondre à la requête, selon les ressources dont ils disposent, mais également selon les services offerts par les agents KP avec lesquels ils communiquent. Dans le cas de la requête Recevoir, il s'agit de procéder à des modifications locales, puis de sélectionner une information (respectivement problème) susceptible d'être transmise (respectivement soumis) à l'extérieur. Dans le cas de la requête Fournir, il s'agit de chercher l'information demandée au sein de la base de connaissance locale, ou en cas d'échec de demander l'aide des agents KP associés (envoi de type appel d'offres). Un nouvel échec conduira l'agent KS à envisager un comportement de proposition / interrogation similaire au précédent. La requête "Recevoir" est construite sous la forme d'une boucle de façon à ce qu'elle s'achève toujours par un envoi.

Les comportements de haut niveau développés au sein d'un agent KS, en réponse à une requête "Recevoir" provenant d'un agent KP, peuvent être expliqués au moyen des schémas des cycles de résolution tels qu'ils sont présentés dans la figure 15.

Les opérations principales de ce cycle sont les suivantes :

- **actualisation** : si l'agent KS reçoit une requête "Recevoir", il va tout d'abord chercher à modifier sa base de connaissances en fonction de l'information reçue. Un jeu de règles dites primaires dont le rôle est de vérifier et de propager de nouvelles données est destinée à ce propos ;

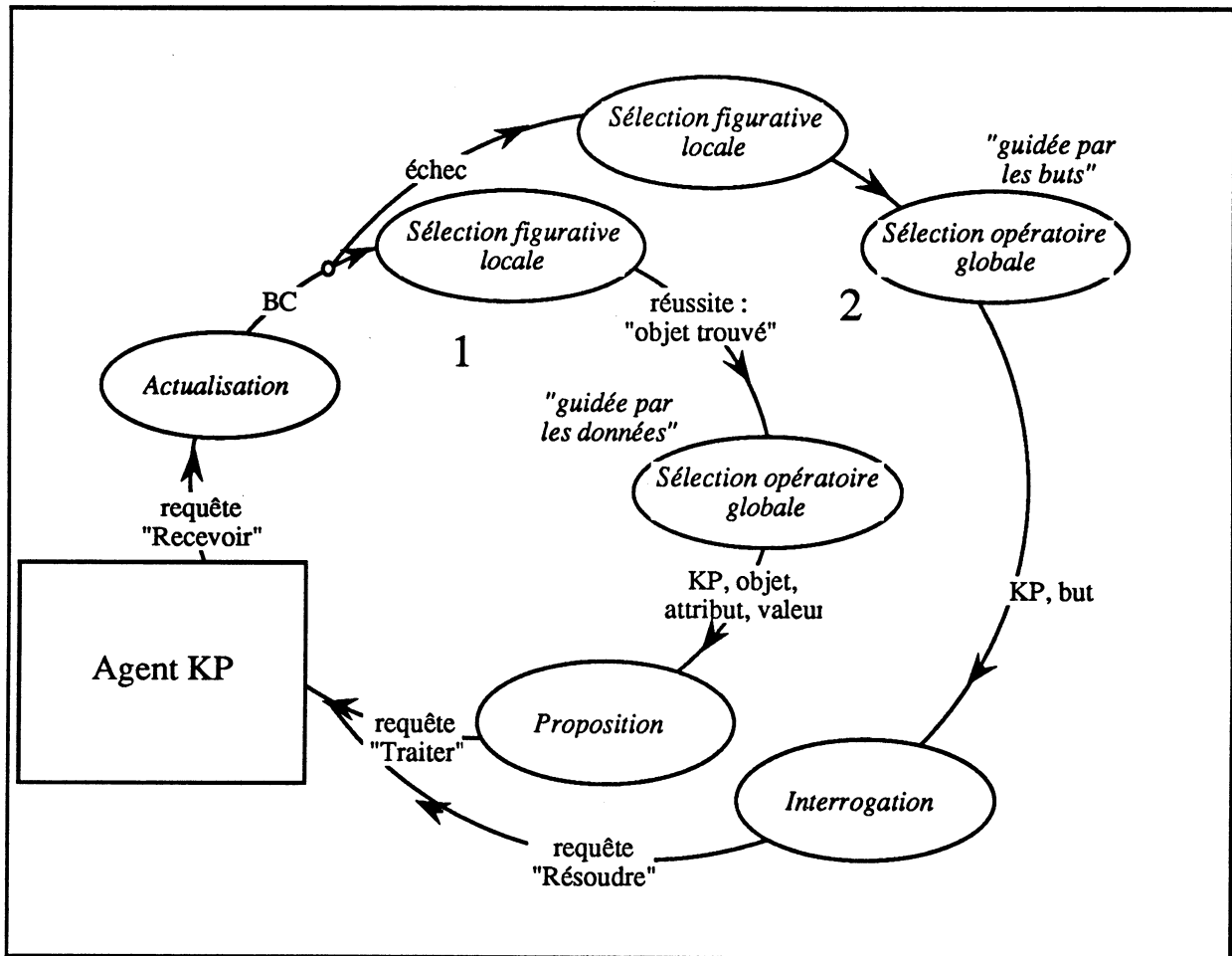


Figure 15 : Cycle de résolution d'un agent KS , déclenché en réponse à une requête "Recevoir", provenant d'un agent KP.

- **proposition** (boucle 1) : dans cette opération l'agent KS essaye de trouver une information valide à proposer (sélection figurative locale), enfin il l'envoie vers un agent KP (sélection opératoire globale) ;
- **interrogation** (boucle 2) : si l'agent KS enregistre un échec dans la proposition, il a alors la possibilité d'interroger d'autres KP afin d'obtenir un complément d'information. A cette fin, une sélection figurative locale est déclenchée, chargée de trouver un objet but, qui est transmise à tous les agents KP, appartenant à la liste d'agents KP de cet agent KS.

La figure 16 illustre ici les cycles de résolution expliquant les comportements de haut niveau développés au sein d'un agent KS, en réponse à une requête "Fournir" provenant d'un agent KP.

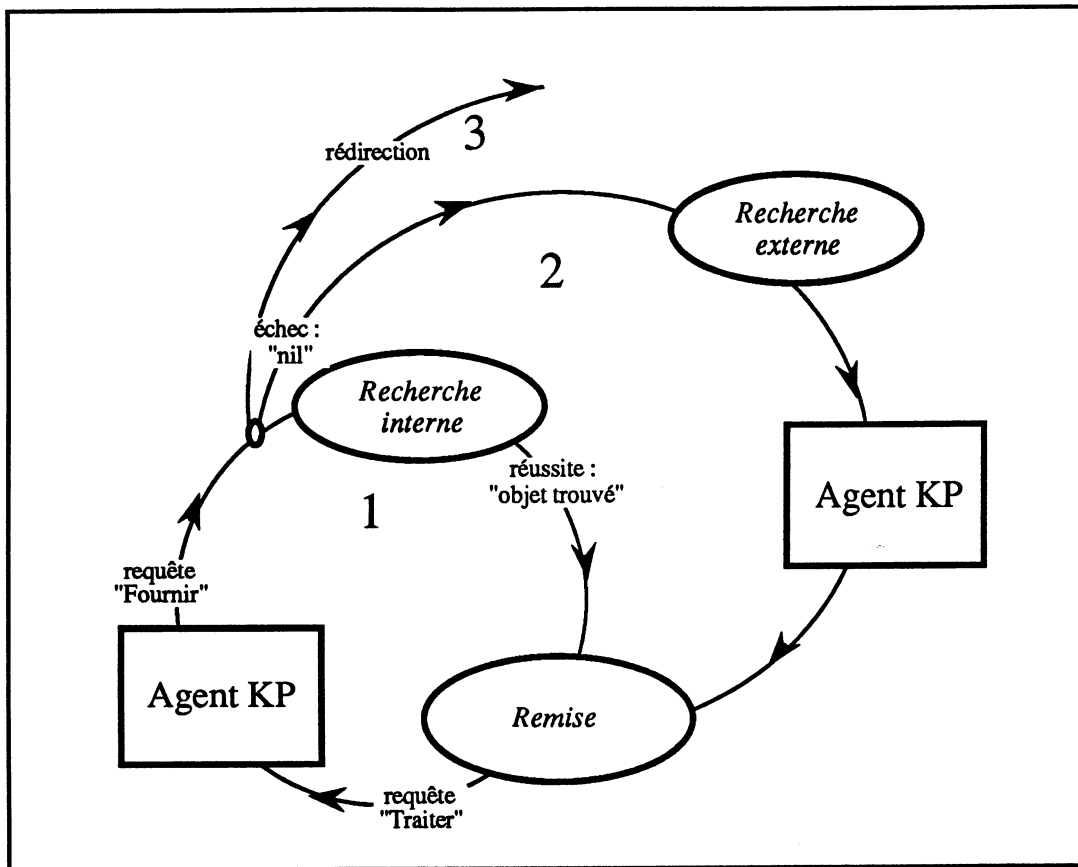


Figure 16 : Cycle de résolution d'un agent KS , déclenché en réponse à une requête "Fournir", provenant d'un agent KP.

Le cycle de résolution associé à la requête "Fournir" (figure 16), se développe de la façon suivante : l'agent KS cherche tout d'abord à satisfaire la requête en regardant s'il n'a pas déjà le renseignement demandé (boucle 1), ou s'il ne peut pas l'obtenir auprès d'un autre agent KP (envoi de la requête Résoudre : boucle 2). Dans ce cas il le retourne au KP. Sinon, il entre dans le cycle Proposer / Interroger afin de fournir soit une des informations dont il dispose, soit d'en chercher de nouvelles en interrogeant un autre KP. Il utilise pour cela ses règles exploratoires : il y a redirection de la stratégie de résolution en cours (boucle 3).

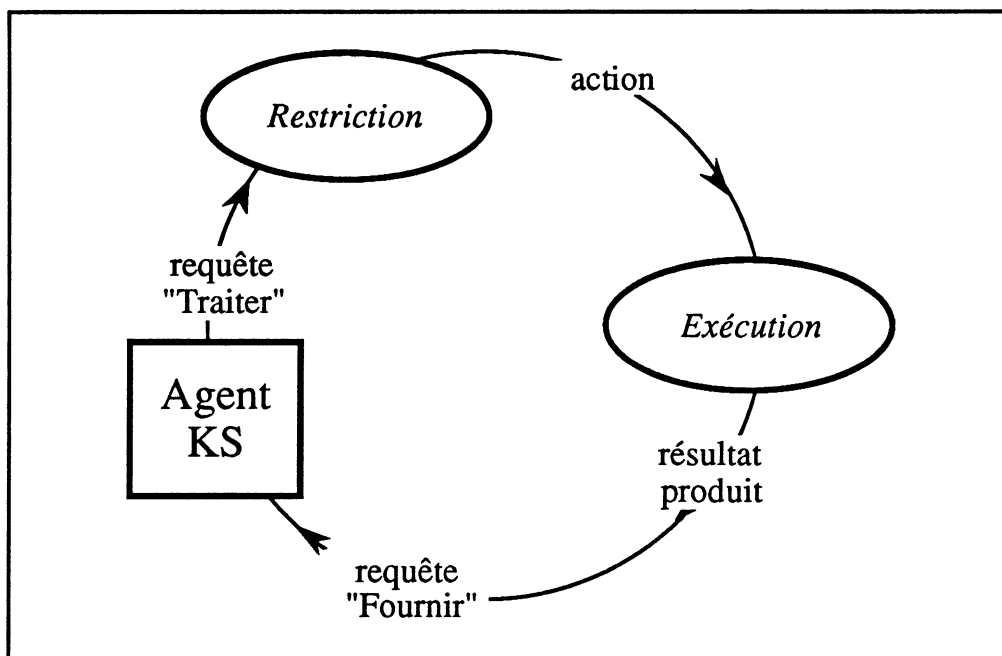
### 1.5.2. Agents KP

Les comportements de haut niveau des agents KP reposent sur les deux méthodes "Traiter" et "Résoudre" dont le rôle est respectivement d'appeler les méthodes "Traiter-données" et "Résoudre-problème". Le comportement d'un agent de type KP obéit donc à un schéma linéaire très simple: il ne peut que conclure au succès ou à l'échec de ses activités. La seule alternative en cas d'échec survient au niveau sélection des règles.

Nous détaillons simplement ici les mécanismes de sélection d'objet et sélection d'action mis en œuvre par les agents KP : ces agents en effet n'ont pas été dotés de capacités de raisonnement sur eux-mêmes. Les KP, activés par une requête externe, procèdent ainsi à l'activation des méta-règles applicables à l'information / problème transmis, puis à l'application des règles d'action sélectionnées. Les agents KP développent, dans le domaine de la vision, deux types d'activités fondamentalement différentes : des activités de perception / description (traitements), et des activités de compréhension (inférences). A ces deux types d'activités correspondent des formes de raisonnement différents.

Dans le premier cas (perception / description), les règles d'action sont directement utilisées pour guider la sélection des procédures à appliquer. Dans le second cas, par contre, les méta-règles permettent une focalisation sur un ensemble d'hypothèses possibles (prédiction), confirmées ou infirmées lors de l'application des règles d'inférence correspondantes (vérification).

Les comportements de haut niveau développés au sein d'un agent KP, en réponse aux requêtes provenant d'un agent KS, peuvent être expliqués au moyen des schémas présentés dans la figure 17 et la figure 18. La figure 17 illustre le cycle de résolution développé dans le cas d'une requête "Résoudre" provenant d'un agent KS.



**Figure 17** : Cycle de résolution d'un agent KP, déclenché en réponse à une requête "Résoudre", provenant d'un agent KS.



La figure 18, quant à elle, illustre le cycle de résolution développé dans le cas d'une requête "Traiter" provenant d'un agent KS.

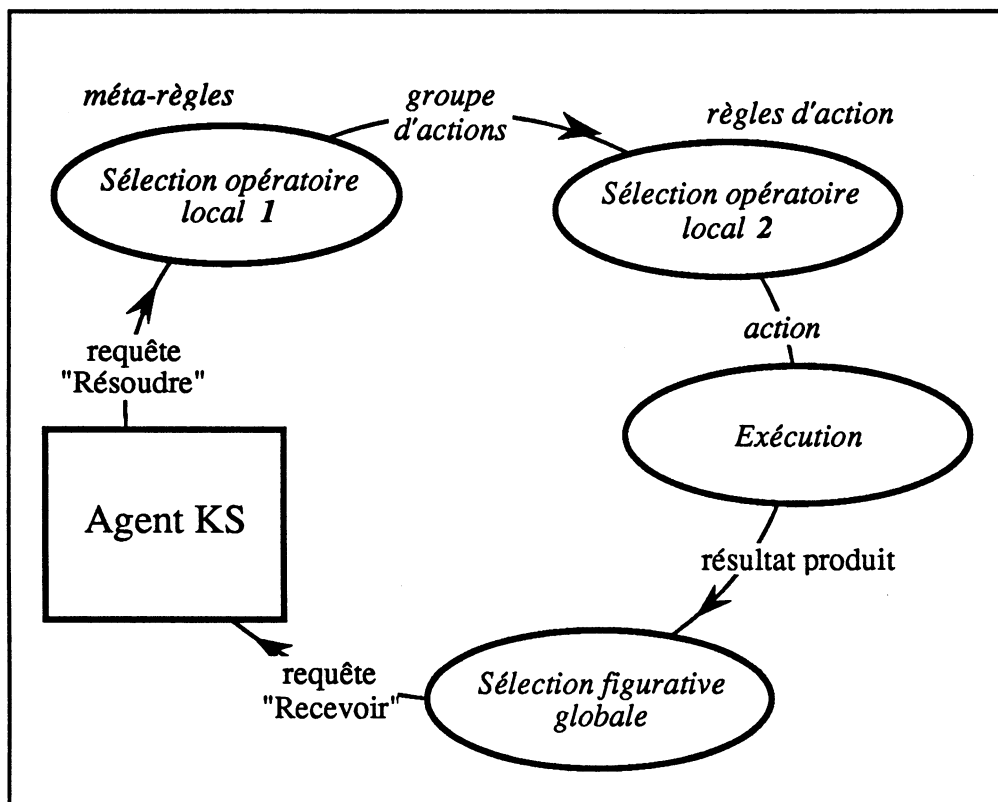


Figure 18 : Cycle de base de résolution au sein d'un agent KP, déclenché en réponse à une requête "Résoudre", provenant du cycle de base figuratif.

## 2. Groupe d'agents

Nous abordons en premier lieu les choix adoptés dans la distribution des tâches et de compétences, puis ensuite les choix concernant les modes et protocoles de communication et enfin les choix adoptés dans les modes d'organisation et de coopération. Une section spéciale étudie l'enchaînement des cycles de contrôle des agents KS et KP.

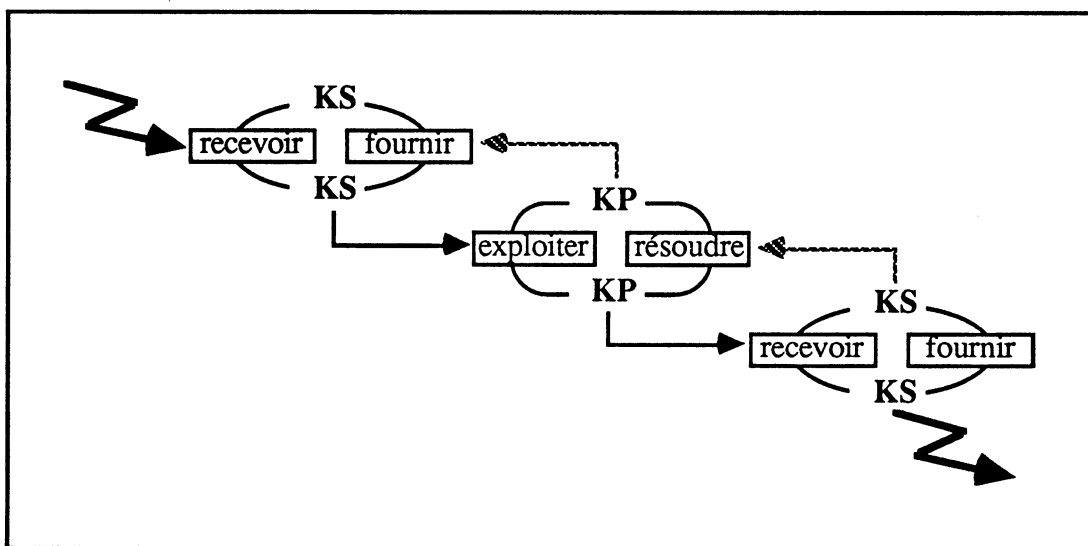
### 2.1. Distribution des tâches et des compétences

La distribution des connaissances et des tâches est effectuée de façon modulaire: la notion de conflit ou de point de vue n'est donc pas abordée ici. Un agent est finalement conçu comme une entité autonome: il est capable de réagir à un nombre fini de requêtes, selon un schéma de

résolution prédéfini. Ce schéma définit un schéma comportemental dépendant du problème en cours, des ressources dont dispose l'agent pour résoudre ce problème, mais aussi de l'aide éventuelle apportée par les autres agents.

## 2.2. Modes et protocoles de communication

La communication entre les divers agents se fait par envoi de messages, en mode "commande" (Hautin 86) et non pas par partage de l'information comme dans l'approche du tableau noir. La figure 19 montre ainsi l'échange d'informations entre agents tel qu'il se déroule pour une architecture "minimale" d'agents KS et KP.



**Figure 19** : Une architecture "minimale", selon les concepts "MAPS": dans cet exemple, une requête de type "Recevoir" (serveur gauche) provoque le développement d'une stratégie guidée par les données; une stratégie guidée par les buts est simultanément développée (pointillés), due à l'envoi éventuel des requêtes de complétion d'informations (i.e. "Fournir" et "Résoudre").

## 2.3. Modes d'organisation et de coopération

Les comportements des KP et KS en "société" sont très simple et permettent la définition d'une architecture générique (figure 19). Elle comprend un KS amont, un KP, un KS aval. Le KS amont fournit des données au KP qui les traite et transmet les résultats au KS aval. Dans cette structure, un KP est vu comme un agent de transformation de la connaissance placé entre deux niveaux figuratifs. Il met en œuvre un savoir-faire qui permet de passer d'un niveau de représentation de connaissances à un autre. On peut aussi le voir comme un "spécialisateur" ou

un "généralisateur" d'informations dans le sens où il permet à l'information de passer d'un niveau d'abstraction à un autre.

Une alternance entre raisonnement guidé par les données et raisonnement guidé par les buts sera susceptible de se développer au sein d'un réseau d'agents KS et KP, selon les "basculements" éventuels opérés au sein des agents KS : de telles stratégies se propagent dès lors de proche en proche, et permettent l'émergence d'un comportement global cohérent. Ce comportement est issu d'une coopération entre décisions locales, et non d'une décision globale imposée au système par un superviseur central.

La dualité KS / KP permet d'envisager plusieurs formes d'implantation de stratégies de haut niveau, telle la prédiction / vérification. Elle peut être traitée en effet comme un raisonnement développé localement, par un agent KP particulier (sélection de règles par des méta-règles), ou comme un basculement entre proposition et interrogation, au sein des KS, l'hypothèse initiale étant ici générée par un KP externe. La stratégie de prédiction / vérification est ainsi modélisée sous une forme plutôt opérative dans le premier cas, et plutôt figurative dans le second.

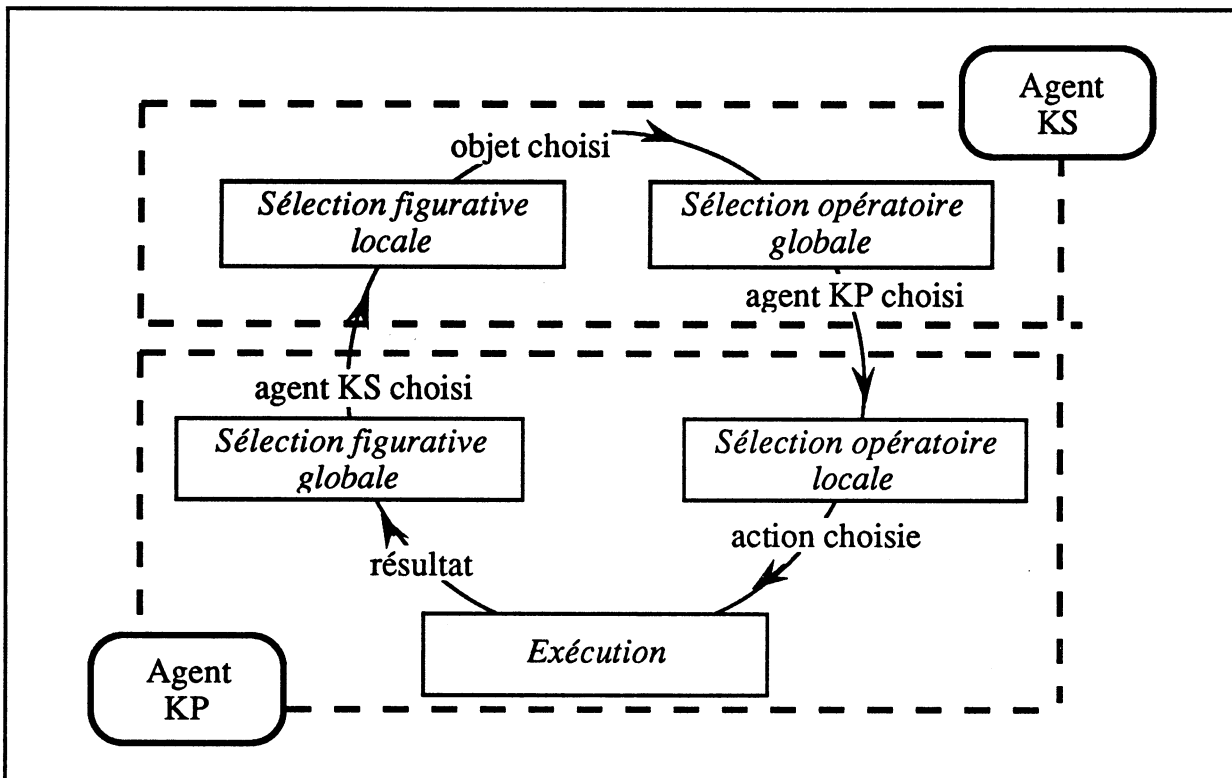


Figure 20 : Enchaînement des cycles de résolution des agents MAPS : niveau du KS : ("sélection figurative locale", "sélection opératoire globale"), niveaux du KP ("sélection opératoire locale", "sélection figurative globale", exécution).

## 2.4. Enchaînement des cycles de contrôle

L'enchaînement des cycles de résolution des agents KS et KP (figure 20) détermine le cycle de résolution du système MAPS, qui comporte une alternance entre cycle de type KS et cycle de type KP.

Le cycle de résolution de l'agent KS comporte essentiellement deux opérations : une recherche et sélection d'objets susceptibles de transition appelée "*sélection figurative locale*" et une recherche et sélection des tâches (agents KP) applicables appelée "*sélection opératoire globale*". Cette dernière assure le passage du contrôle à l'agent KP.

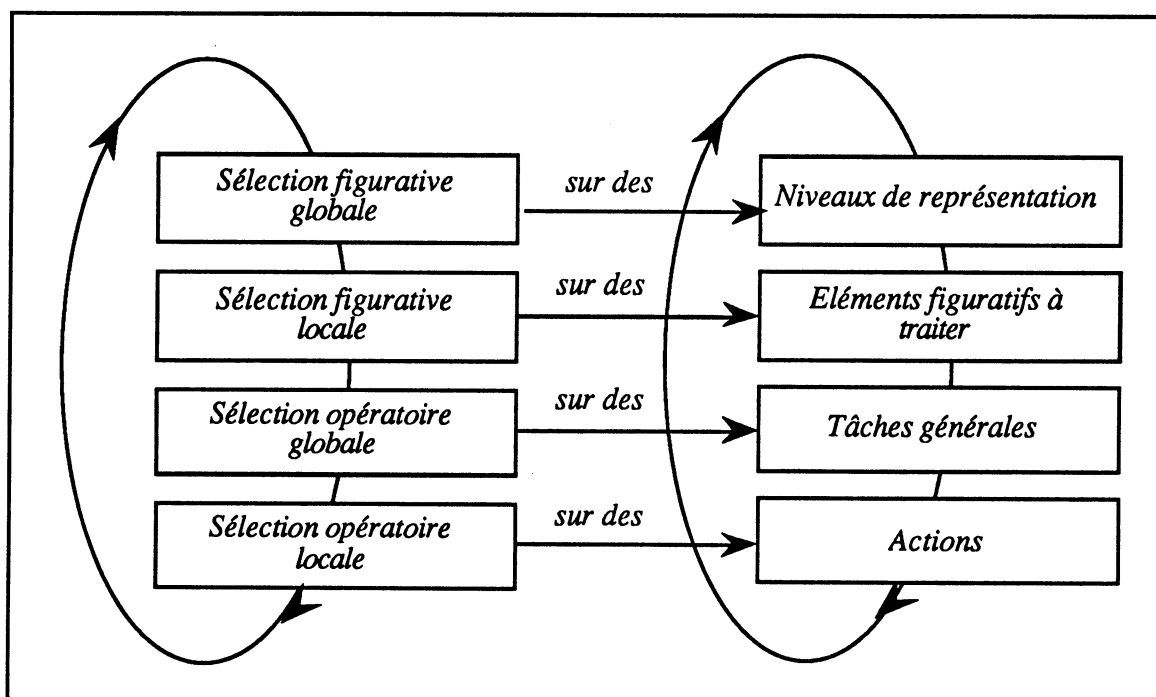


Figure 21 : Éléments sur lesquels portent les sélections figuratives et opératoires.

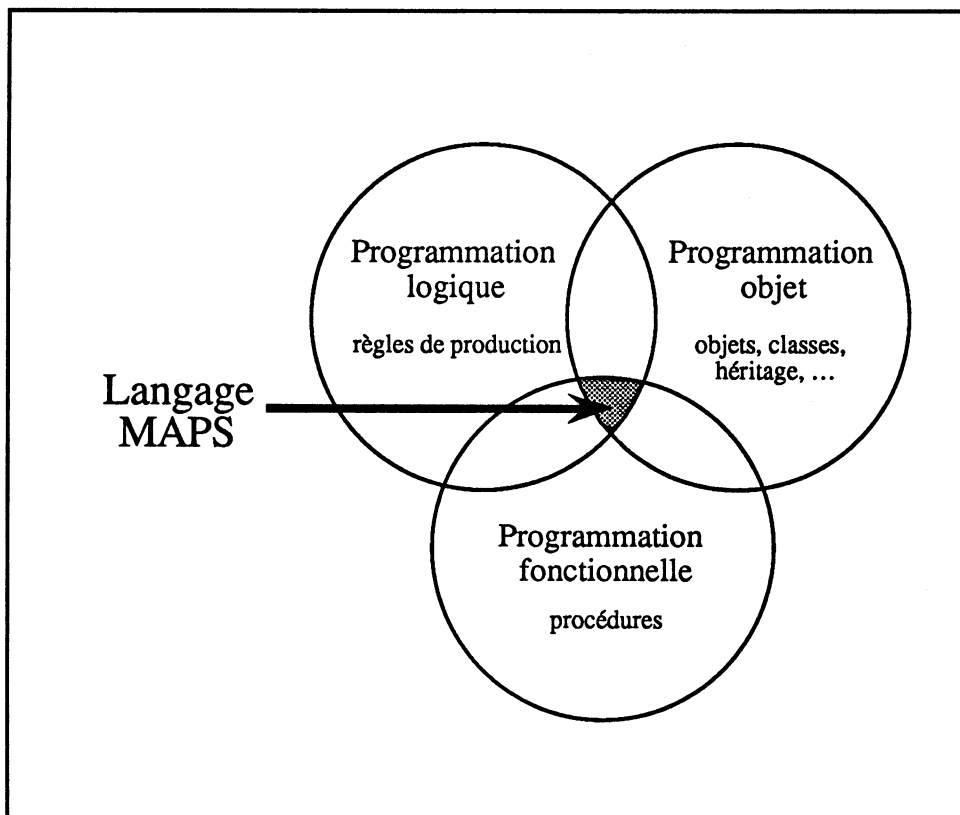
Le cycle de résolution développé par l'agent KP, comporte trois opérations : une recherche et sélection d'actions susceptibles de transition appelée "*sélection opératoire locale*", l'application de l'action ou "*exécution*" avec obtention des résultats et enfin, une recherche et sélection du niveau de représentation (agents KS) concerné appelée "*sélection figurative globale*", qui garantit le basculement vers le cycle de résolution de l'agent KS. Les résultats obtenus lors de l'exécution de l'action serviront éventuellement pour actualiser la base de connaissance d'un agent KS, qui stocke des éléments figuratifs.

La correspondance entre opérations de sélection et élément concerné est résumé dans la figure 21.

### 3. Le langage de programmation MAPS

Le langage de programmation MAPS est un langage à vocation multiple, ou hybride, qui combine l'éventail des formalismes standards de programmation et de représentation de connaissances : procédures, classes et règles de production (figure 22). MAPS en effet développe une représentation centrée objet, construite sur un langage de programmation fonctionnelle étendu aux classes (C++) et enrichie par le formalisme des règles de production.

MAPS est implanté en C++, sous UNIX et X-WINDOWS sur station de travail APOLLO.



**Figure 22** : Situation du langage de programmation MAPS

Le système MAPS bénéficie donc des vocations des trois styles de programmation : programmation fonctionnelle, programmation objet et programmation logique. Il permet ainsi la conception de systèmes à base de connaissances impliquant des connaissances hétérogènes, difficilement représentables sous un formalisme unique.

Le modèle du langage est réflexif et uniforme : les entités de la couche objet et celles de la couche logique (méthodes, attributs, règles,...) sont représentées par des objets. De ce fait,

toutes les entités ont la même structure physique et peuvent être manipulés au moyen des mêmes structures de contrôle.

Le système KIDS, qui sera présenté dans le chapitre suivant, est écrit selon la syntaxe du langage MAPS comme un ensemble d'agents, chacun comprenant des ressources (objets, règles et moteur d'inférence), des capacités et des comportements : un tel programme est compilé et exécuté sous MAPS (Baujard 90). La description suivante est un exemple du fichier des ressources d'un agent KS (en l'occurrence KS-Specimen, qui sera étudié plus en détail dans le chapitre suivant) en syntaxe MAPS :

```

1 | DEFINE_AGENT I-KS-SPECIMEN : SPECIMEN : 4 : 13;
   |
   | DEFINE_CLASS *IMAGE* ;;
   | STRING NAME : VIDE;
   | INTEGER NUMERO : 0;
   | INTEGER DIMENS : 0;
   | INTEGER PTR-IMAGE : 1;
   | STRING LOAD_FLAG : ;
   | INTEGER NB-LAB : ;
2 | INTEGER NUMBER-OF-CLASSES : 4;
   | INTEGER EXPLORED-FIELD : 0;
   | INTEGER PTR-IMAGE : 1;
   | INTEGER PTR-IMAGE-COURANTE : 2;
   | INTEGER PTR-IMAGE-TAMPON : 3;
   | INTEGER PTR-IMAGE-RES : 4;
   | INTEGER TSF : 5;
   | INTEGER SEUIL : 46;
   | INTEGER HIGH-RESOLUTION : VIDE;
   | END_CLASS;
3 | DEFINE_CONNECTION I-KP-VALIDATE;
   | DEFINE_CONNECTION I-KP-EXPLORE;
   |
   | DEFINE_RULE I-SPECIMEN-PROPAG-1 : PROPAGATION;
   | (AND (= (METHOD (LAST_PROPOSITION) (I-KS-SPECIMEN *IMAGE*))
   | (STRING NO))
   | (AND (< (*IMAGE* DIMENS) (INTEGER 0))
   | (AND (< (*IMAGE* NAME) (STRING VIDE))
   | (AND (< (*IMAGE* EXPLORED-FIELD) (INTEGER 0))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (*IMAGE* PTR-IMAGE) (IMAGE))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (*IMAGE* PTR-IMAGE-COURANTE) (IMAGE2))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (*IMAGE* DIMENS) (NDIM))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (*IMAGE* NAME) (NOM))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (STRING LOADED) (ETAT))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (STRING SPECIMEN) (TEXT))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (STRING ZOOM --> 256 X 256) (TEXT2))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (STRING X) (TEXT3))
4 | (AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 90) (POS1X))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 100) (POS2X))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 9) (POS1Y))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 208) (POS2Y))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 142) (POS3Y))
   | (AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 105) (POS3X))

```

```

(AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 235) (POS4X))
(AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 128) (ESPACE))
(AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 256) (M))
(AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 1) (ZOOM1))
(AND (DEFINE_PARAMETER (INTEGER 2) (ZOOM2))
(DEFINE_PARAMETER (*IMAGE* NUMERO) (NUM)))))))))))))))))))));
(OR (PROCEDURE (CHARGER) (NOM IMAGE NDIM NDIM NUM))
(OR (PROCEDURE (TEXT) (IMAGE POS1X POS1Y TEXT))
(OR (PROCEDURE (TEXT) (IMAGE POS2X POS1Y NOM NUM NDIM TEXT3
NDIM))
(OR (PROCEDURE (TEXT) (IMAGE POS1X POS2Y TEXT2))
(OR (PROCEDURE (RECOPIE) (IMAGE IMAGE2 NDIM NDIM))
(OR (PROCEDURE (AFFICHE) (IMAGE NDIM NDIM POSX3 POS1Y ZOOM1))
(OR (PROCEDURE (AFFICHE) (IMAGE NDIM NDIM POSX3 POS3Y ZOOM2))
(OR (PROCEDURE (GRILLE) (POS3Y POS3X POS1Y POS4X M NDIM
ESPACE))
(*IMAGE* LOAD_FLAG ETAT)))))))));
END_RULE;

5 | DEFINE_RULE I-SPECIMEN-PROPOSE-1 : PROPOSITION;
(= (*IMAGE* LOAD_FLAG) (STRING LOADED));
(QUOTE I-KP-EXPLORE *IMAGE*);
END_RULE;

| DEFINE_RULE I-SPECIMEN-WONDER-1 : INTERROGATION;
(= (*IMAGE* NAME) (STRING VIDE));
(QUOTE USER *IMAGE* NAME);
END_RULE;

6 | DEFINE_RULE I-SPECIMEN-WONDER-2 : INTERROGATION;
(AND (<> (*IMAGE* NAME) (STRING VIDE))
(= (*IMAGE* NUMERO) (INTEGER 0)));
(QUOTE USER *IMAGE* NUMERO);
END_RULE;

| DEFINE_RULE I-SPECIMEN-WONDER-3 : INTERROGATION;
(AND (<> (*IMAGE* NUMERO) (INTEGER 0))
(= (*IMAGE* DIMENS) (INTEGER 0)));
(QUOTE USER *IMAGE* DIMENS);
END_RULE;

7 | END_AGENT;

```

Sept constituants principaux, dans cette description d'agent KS, peuvent être identifiés :

- 1 : clause de définition du nom et du positionnement (coordonnées x, y) à l'écran de l'agent ;
- 2 : clause de définition des éléments figuratifs stockés par l'agent KS ;
- 3 : clause de définition des diverses connexions de l'agent vers des agents KP ;
- 4 : clause de définition des règles de propagation ;
- 5 : clause de définition des règles de proposition ;
- 6 : clause de définition des règles d'interrogation ;
- 7 : clause de définition de la fin de la description de l'agent.

## Conclusion

Le système MAPS, présenté dans ce chapitre, concrétise les liens entre les typologies formelle et technologique présentées auparavant. Le système MAPS peut être perçu comme intégrant de façon partielle, mais simultanée, les typologies formelle et technologique présentées précédemment. Il intègre la typologie technologique en tant que système multi-agent, et la typologie formelle en définissant des types d'agents et des rôles qui reprennent certains termes de cette typologie.

En effet, il apparait que les rôles des agents KS et KP sont complémentaires : le rôle des agents KS est de représenter, stocker et diffuser des connaissances figuratives, par opposition aux agents KP dont le rôle est de représenter et mettre en œuvre des connaissances opératoires.

Par ailleurs, il apparait que les agents KS procèdent au choix et au séquençage des tâches (agents KP) de résolution, en les focalisant sur des informations / problèmes précis ; les KP délimitent quant à eux les espaces conceptuels vers lesquels diriger l'analyse.

L'approche proposée, qui définit des réseaux constitués d'agents KS et KP placés en alternance, ne se réduit pas ainsi à un effort de distribution de la connaissance sur des niveaux de représentation et de résolution différents : elle développe en outre, sur le plan fonctionnel, une alternance entre focalisation figurative et focalisation opérative. De tels systèmes offrent ainsi une vue structurelle mais aussi fonctionnelle d'un problème et permettent un rapprochement entre spécification et résolution.

En termes de la dualité "perspective profonde / perspective de surface" donnée par la typologie formelle, le système MAPS, par ses possibilités d'organisation architecturale et les possibilités de l'architecture interne des agents, représente une démarche générale de résolution comprenant des connaissances et des raisonnements profonds, il peut aussi être vu comme une architecture logicielle générale pouvant s'adapter à divers types de problèmes.





***Le système KIDS***  
***(Knowledge based Image Diagnosis System)***

---

<b>Introduction</b> .....	185
<b>1. La connaissance</b> .....	185
1.1. Connaissances Figuratives .....	186
1.2. Connaissances Opératoires.....	186
1.3. Connaissances Réflexives et Heuristiques.....	187
<b>2. Ressources et comportements des agents/groupes d'agents</b> .....	188
2.1. Phase d'exploration.....	189
2.1.1. Problématique .....	189
2.1.2. Distribution des tâches et des compétences .....	189
2.1.3. Choix d'implantation .....	190
2.1.4. Fonctionnement du groupe d'agents.....	194
2.1.5. Etat actuel de l'implantation.....	197
2.2. Phase d'identification cellulaire.....	199
2.2.1. Problématique .....	199
2.2.2. Distribution des tâches et des compétences .....	199
2.2.3. Choix d'implantation .....	201
2.2.4. Fonctionnement du groupe d'agents.....	206
2.2.5. Etat actuel de l'implantation.....	209
2.3. Phase de formulation diagnostique.....	210
2.3.1. Problématique.....	210
2.3.2. Distribution des tâches et des compétences .....	211
2.3.3. Choix d'implantation .....	211
2.3.4. Fonctionnement du groupe d'agents.....	214

2.2.5. Etat actuel de l'implantation.....	214
2.4. Interface graphique.....	215
<b>3. Raisonnements développés par le système KIDS.....</b>	<b>216</b>
3.1. Raisonnements au niveau primaire.....	216
3.1.1. Raisonnements et organisation fonctionnelle de la connaissance	216
<i>Raisonnement figuratif</i> .....	216
<i>Raisonnement opératoire</i> .....	216
<i>Raisonnement réflexif</i> .....	217
3.1.2. Raisonnements et organisation structurale de la connaissance. .	217
3.1.3. Raisonnements et organisation de la connaissance par domaine d'application .....	219
3.2. Raisonnements hybrides .....	219
<b>Conclusion .....</b>	<b>221</b>

# *Le système KIDS* *(Knowledge based Image Diagnosis System)*

---

### **Introduction**

Le système KIDS (Knowledge based Image Diagnosis System) a été conçu à partir de l'environnement de programmation MAPS comme un système multi-agent (Ovalle 91b) capable de manipuler des connaissances hétérogènes telles que celles définies préalablement (figuratives, opératoires, réflexives et heuristiques) dans le domaine de l'investigation de spécimens en cytologie mammaire. Nous décrivons tout d'abord les connaissances manipulées par le système KIDS. Celles-ci découlent de la typologie des connaissances proposée dans la partie B. L'architecture du système KIDS, puis les modes de raisonnement développés par ce système seront par la suite présentés.

Trois phases d'analyse, qui définissent trois groupes d'agents différents, sont ici distinguées. Les différents types de raisonnement sont ainsi étudiés tout d'abord au niveau individuel, puis au niveau du groupe, et enfin au niveau du système dans son ensemble.

### **1. La Connaissance**

Les connaissances figuratives et opératoires traduisant l'expertise médicale ont été distribuées au sein de plusieurs agents KS et KP connectés en réseau (figure 23).

Le réseau d'agents présenté dans la figure 23 fournit une modélisation de haut niveau de l'expertise du pathologue : chaque agent KP peut facilement être interprété en termes des tâches issues de la démarche de l'expert (table 2) ; en ce qui concerne les agents KS, ils encapsulent les connaissances figuratives exploitées ou fournies par ces tâches.

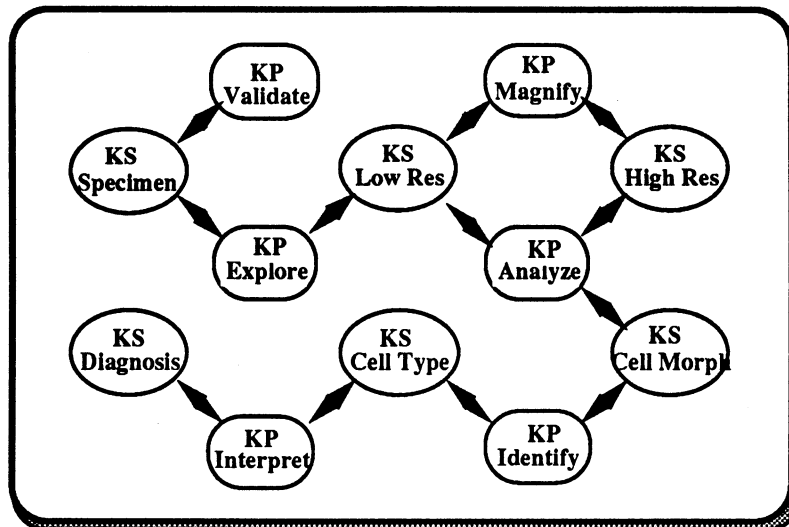


Figure 23 : Architecture du système KIDS.

### 1.1. Connaissances Figuratives

Les connaissances figuratives décrivent l'ensemble des objets manipulés aux différents stades d'analyse des spécimens cytologiques. Ces connaissances ont été réparties au sein d'agents KS différents, selon leur niveau d'abstraction, mais aussi leur relation aux grandes étapes de résolution du problème. On distingue ainsi l'image du spécimen, celle du champ à basse résolution, puis celle du champ à haute résolution, la description des morphologies cellulaires, la représentation des types cellulaires observés, et enfin celle de l'hypothèse diagnostique proposée. Ces connaissances définissent 4 niveaux fondamentaux de représentation : le niveau des images, celui des descripteurs, celui des identifications et enfin celui des compréhensions. Ces niveaux sont les niveaux fondamentaux d'appréhension d'une information visuelle.

### 1.2. Connaissances Opératoires

Six tâches principales ont été modélisées dans le système KIDS et représentées par le biais d'agents KP. Ces tâches sont rappelées ci-dessous, elles adressent des axes différents d'organisation de la connaissance :

- validation du spécimen --> axe intrinsèque (décrire)
- sélection des champs --> axe contextuel (focaliser)
- changement de résolution --> axes intrinsèque
- analyse morphologique --> axes intrinsèque et compositionnel  
(percevoir et décrire)

- identification cellulaire --> axe intrinsèque et taxinomique  
(mettre en correspondance et classer)
- interprétation diagnostique --> axes causal et taxinomique (déduire et propager)

### 1.3. Connaissances Réflexives et Heuristiques

Les connaissances réflexives introduites dans le système KIDS expriment le caractère incertain et évolutif de la connaissance engagée dans le diagnostic médical (Ovalle 91c). C'est ainsi qu'un attribut "présence" qualifiant la vraisemblance des différentes hypothèses diagnostiques a été introduit ; les valeurs possibles de cet attribut sont les suivantes : absente, peu-probable, incertaine, peut-être, sans-doute et vraisemblable. Des règles de propagation sont également introduites, dont le rôle est de maintenir la cohérence des hypothèses diagnostiques en cours.

Les connaissances heuristiques définissent les critères locaux de sélection des informations pertinentes (champs et cellules en particulier) et certaines prises de décision, telle le basculement d'une analyse basse résolution à une analyse haute résolution. Ces prises de décisions sont actuellement menées en mode interactif : elles requièrent l'avis d'un observateur externe. Sur un plan plus global, l'exploration du spécimen est actuellement simulée par la lecture de fichiers d'images préordonnés.

En ce qui concerne le séquençement des tâches, il s'effectue sous une forme explicite par le biais des règles de proposition propres aux agents KS, comme précisé ci-dessous. Quant aux dépendances mutuelles entre tâches, elles seront modélisées ultérieurement sous la forme de règles de sélection impliquant des critères de natures différentes, issus d'agents KS différents.

## 2. Ressources et comportements des agents/groupes d'agents

Trois phases essentielles d'analyse, qui définissent trois groupes d'agents différents, peuvent être distinguées dans le système KIDS (Ovalle 91a) : la phase d'"exploration", ou phase de validation et sélection de champs significatifs, la phase d'"identification cellulaire" comprenant une analyse préalable de descripteurs morphologiques et la phase de "formulation diagnostique", ou phase d'interprétation.

### *Phase d'exploration*

La phase d'exploration comprend les tâches d'exploration et sélection de champs significatifs et d'analyse cellulaire à basse ou haute résolution. Cette phase engage les agents suivants :

- Agent *KS-Specimen*
- Agent *KP-Explore*
- Agent *KS-Low-Resolution*
- Agent *KS-High-Resolution*

### *Phase d'identification cellulaire*

La phase d'identification cellulaire comprend les tâches d'analyse morphologique et d'identification cellulaire et engage les agents suivants :

- Agent *KP-Analyze*
- Agent *KS-Cell-Morphology*
- Agent *KP-Identify*
- Agent *KS-Cell-Type*

### *Phase de formulation diagnostique*

La phase de formulation diagnostique comprend la tâche d'interprétation cellulaire fondée sur l'analyse de la fréquence d'apparition de types cellulaires. Cette phase engage les agents suivants :

- Agent *KP-Interpret*
- Agent *KS-Diagnostic*

## 2.1. Phase d'exploration

### 2.1.1. Problématique

La problématique de la phase d'exploration peut être résumée par les deux tâches suivantes : exploration du spécimen et sélection de champs significatifs.

Le spécimen cytologique est exploré plusieurs fois, de façons différentes, et dans des buts différents: exploration aléatoire pour valider le spécimen, exploration systématique pour sélectionner les champs significatifs (Ovalle 89). Comme nous l'avons étudié dans la typologie formelle du raisonnement cette forme de raisonnement (sélection de déplacements), développée par le cytopathologue, correspond à la forme spatiale des raisonnements opératoires.

En ce qui concerne la sélection des champs significatifs, celle-ci est guidée par un ensemble varié de critères :

- critères intrinsèques : pertinence intrinsèque du champ ;
- critères contextuels : type des cellules déjà observées, hypothèse diagnostique en cours ;
- objectif de l'analyse (screening ou diagnostic)

#### *choix effectués dans KIDS*

Un seul critère est utilisé par le système KIDS pour la sélection des champs significatifs : la pertinence du champ d'exploration ; celle-ci est exprimée par la qualité de la distribution des niveaux de gris dans l'image du champ.

### 2.1.2. Distribution des tâches et des compétences

Les rôles à assumer dans la phase exploratoire sont les suivants :

- Acquisition d'images du spécimen ;
- Exploration du spécimen ;
- Sélection des champs significatifs ;

Ces rôles ont été distribués de la façon suivante :

- le rôle de l'agent KS-Specimen consiste à acquérir et transmettre une vue du spécimen ;
- le rôle de l'agent KP-Explore est de mettre en œuvre l'exploration du spécimen, selon la stratégie d'exploration choisie ; il est également d'assumer l'envoi successif des champs à l'agent KS-Low-Resolution ;
- le rôle de l'agent KS-Low-Resolution est d'évaluer la pertinence des champs d'exploration du spécimen et de transmettre les champs significatifs pour analyse.



### 2.1.3. Choix d'implantation

Nous présentons dans la figure 24 le groupe d'agents impliqués dans la phase exploratoire.

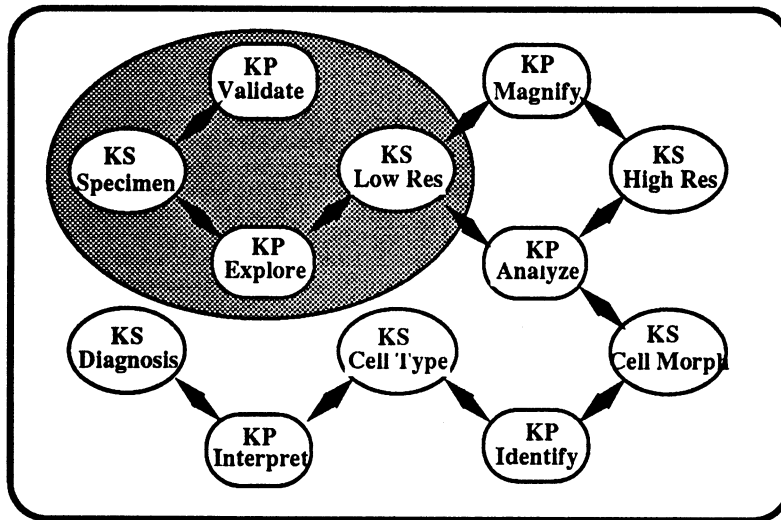


Figure 24 : Groupe d'agents impliqués dans la phase exploratoire.

Nous présentons dans les tables 7, 8 et 9 des exemples des ressources attribuées aux agents KS-Specimen, KP-Explore et KS-Low-Resolution.

Table 7. Ressources de l'agent KS-Specimen

<i>Agent</i>	<b>KS-Specimen</b>
<i>rôle</i>	Acquisition et transmission d'une vue du spécimen
<i>ressources</i>	<p>--&gt; connaissances figuratives :</p> <p>fichier d'images du spécimen, descripteurs des mémoires tampon et drapeaux.</p>
	<p>--&gt; connaissances opératoires :</p> <p>règles de propagation :</p> <p>SI (1) nom du fichier du spécimen et (2) position de l'image du spécimen et (3) taille du spécimen, sont connus</p> <p>ALORS charger et afficher l'image du spécimen</p> <p>--&gt; connaissances heuristiques :</p> <p>règles de proposition :</p> <p>SI (1) l'image du spécimen est chargée et (2) elle n'a pas encore été proposée pour investigation</p> <p>ALORS proposer l'image du spécimen à l'agent KP-Explore</p> <p>règles d'interrogation:</p> <p>SI avis de l'utilisateur sur l'exploration aléatoire du spécimen n'a pas encore été demandé</p> <p>ALORS questionner l'avis de l'utilisateur</p> <p>SI (1) avis de l'utilisateur sur l'exploration aléatoire du champ est défavorable et (2) avis de l'utilisateur sur l'exploration systématique verticale du spécimen n'a pas encore été demandé</p> <p>ALORS questionner l'avis de l'utilisateur</p>

Table 8. Ressources de l'agent KP-Explore

<i>Agent</i>	<b>KP-Explore</b>
<i>rôle</i>	exploration du spécimen par le biais de la stratégie d'exploration choisie et envoi successif des champs, avec attachement des résultats de l'analyse d'histogramme pour chaque champ, à l'agent KS-Low-Resolution
<i>ressources</i>	<p>--&gt; connaissances heuristiques (sélection des stratégies d'exploration) règles de sélection (stratégie systématique verticale d'exploration) :</p> <p>SI (1) les descripteurs de l'image du spécimen et le seuil de niveaux de gris ont été obtenus de l'agent KS-Specimen et (2) l'avis de l'utilisateur est favorable pour entreprendre une exploration du spécimen en sens vertical</p> <p>ALORS répéter de 1 jusqu'au nombre de champs du spécimen : calcul et affichage de l'histogramme du champ, calcul de l'intervalle maximal de niveau de gris et envoi du champ à l'agent KS-Low-Resolution en vue d'une analyse approfondie.</p> <p>(stratégie aléatoire d'exploration):</p> <p>SI (1) les descripteurs de l'image du spécimen et le seuil maximal de niveau de gris ont été obtenus de l'agent KS-Specimen (2) l'avis de l'utilisateur est favorable pour entreprendre une exploration aléatoire du spécimen</p> <p>ALORS (1) générer une liste aléatoire d'éléments (chaque élément étant un numéro de champ à explorer) et (2) répéter de 1 jusqu'au nombre total de champs de la liste générée : - calcul et affichage de l'histogramme du champ, - calcul de l'intervalle maximal de niveau de gris et - envoi du champ à l'agent KS-Low-Resolution en vue d'une analyse approfondie.</p>

Table 9. Ressources de l'agent KS-Low-Resolution

<i>Agent</i>	<b>KS-Low-Resolution</b>
<i>rôle</i>	évaluation de la pertinence des champs d'exploration du spécimen et envoi des champs significatifs pour analyse, à haute résolution si nécessaire, en fonction de l'avis de l'utilisateur
<i>ressources</i>	<p>--&gt; connaissances figuratives :</p> <p>descripteurs de l'image du champ, mémoires tampon et drapeaux</p>
	<p>--&gt; connaissances heuristiques :</p> <p>règles de proposition :</p> <p>SI (1) image du champ à analyser chargée et  (2) intervalle des niveaux de gris est supérieur au seuil établi par l'utilisateur et  (3) avis de l'utilisateur pour traiter le champ et  <i>cc : l'utilisateur pourrait considérer le champ proposé non significatif et ainsi le rejeter ou vice versa</i>  (4) utilisateur n'est pas d'accord pour scruter le champ à haute résolution et  (5) le champ n'a pas encore été proposé</p> <p>ALORS proposer l'image du champ à l'agent KP-Analyze</p>
	<p>règles d'interrogation :</p> <p>SI (1) image du champ à analyser chargée et  (2) avis de l'utilisateur sur l'investigation du champ non encore demandé</p> <p>ALORS questionner l'avis de l'utilisateur</p> <p>SI (1) avis de l'utilisateur sur l'investigation du champ non encore demandé  (2) avis de l'utilisateur sur l'investigation à haute résolution non encore demandé</p> <p>ALORS questionner l'avis de l'utilisateur</p>
<i>remarques</i>	un seuil de surface est demandé à l'utilisateur qui servira ultérieurement à raisonner sur la pertinence des objets cellulaires qui seront repérés dans le champ en cours d'analyse.

#### 2.1.4. Fonctionnement du groupe d'agents

Pour des questions d'expérimentation nous avons choisi de travailler uniquement sur deux spécimens en cytologie mammaire : le premier concerne une pathologie bénigne de type "kyste" (susceptible de dégénérer en une forme maligne) et le second, en opposition, concerne une pathologie maligne de type "cancer". Ces images ont été fournies par le Pr. Seigneurin, chargé du département de cytologie à l'hôpital universitaire de la Tronche. Le nombre maximum de champs d'exploration a été limité à seize pour des raisons de place mémoire pour le stockage d'images, mais le procédé d'exploration implanté permet de l'étendre à volonté.

L'agent KS-Specimen réceptionne tout d'abord un fichier d'images représentant les champs successifs d'un spécimen cytologique qu'il transmet ensuite à l'agent KP-Explore.

L'agent KP-Explore possède trois règles d'action dont le rôle est de simuler des stratégies aléatoire et systématique d'exploration du spécimen (figure 25). La stratégie aléatoire met en œuvre une procédure aléatoire qui génère une liste de numéros de champs à explorer puis au travers d'une boucle de contrôle, envoie ces champs les uns après les autres à l'agent KS-Low-Resolution dans le but d'une analyse approfondie.

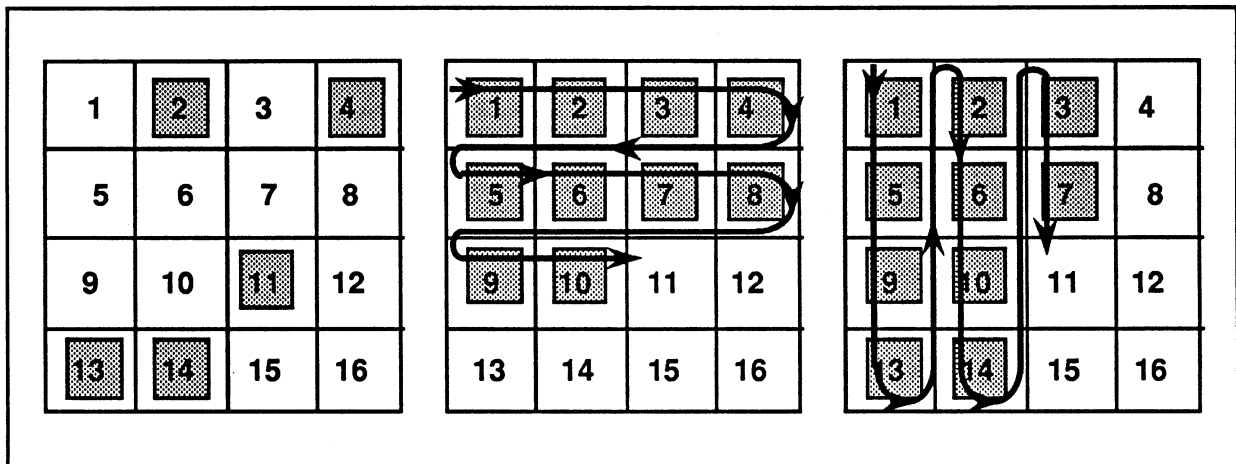
Puisque les images des champs sont numérotées et stockées suivant le sens horizontal, la stratégie systématique horizontale d'exploration utilise tout simplement la boucle d'envoi des champs qui contrôle leur envoi à l'agent KS-Low-Resolution.

A la différence de la précédente, la stratégie systématique verticale doit générer une liste ordonnée des champs suivant le sens vertical d'exploration. Une boucle est ensuite utilisée qui contrôle l'envoi successif des champs à l'agent KS-Low-Resolution.

L'agent KP-Explore interroge l'agent KS-Specimen pour décider de la stratégie à adopter. Celui-ci interroge alors l'utilisateur pour obtenir son avis (mise en œuvre des règles d'interrogation, en l'absence de connaissances plus précises sur le choix à effectuer). Le même scénario est utilisé pour obtenir le seuil de distribution des niveaux de gris déterminant la pertinence du champ.

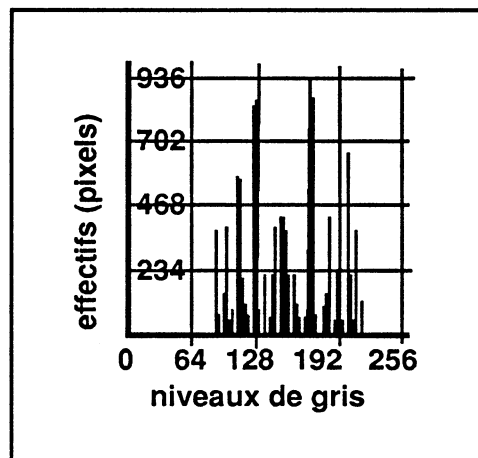
Le système KIDS garde une trace des champs déjà explorés sous la forme visuelle présentée dans la figure 25 (chaque nouveau champ soumis à l'analyse est encadré par une petite fenêtre rouge). Il convient ici de préciser, que bien que le système KIDS n'effectue pas actuellement de retours arrière sur ces champs précédemment explorés, une trace sous forme de liste peut

néanmoins être facilement accédée, qui lui permet de revenir sur des champs déjà analysés et de raffiner ou reprendre son analyse.



**Figure 25 :** Trois stratégies possibles d'exploration du spécimen développées par le système KIDS : une stratégie aléatoire (grille d'exploration à gauche) sélectionne divers champs au hasard qui seront ensuite analysés de façon approfondie. Deux types de stratégies systématiques d'exploration développées selon les sens horizontal ou vertical sont montrées respectivement dans les grilles d'exploration au centre et à droite de la figure.

Outre l'image du champ en cours d'étude un histogramme représentant la distribution des niveaux de gris sur cette image est calculé et affiché par l'agent KP-Explore (figure 26) .



**Figure 26 :** Histogramme des niveaux de gris de l'image du champ en cours d'exploration.

Une analyse d'histogramme est alors effectuée qui permet d'obtenir l'intervalle des niveaux de gris sur image. La valeur de cet intervalle sera également transmise à l'agent KS-Low-Resolution.

Après réception de l'image du champ d'exploration à l'étude ainsi que des résultats de l'analyse d'histogramme, l'agent KS-Low-Resolution utilise cette information pour raisonner sur l'informativité et la pertinence du champ en vue de l'accepter ou le rejeter. La sélection du champ repose donc sur le contraste de l'image : l'intervalle de niveaux de gris est comparé au seuil donné préalablement par l'utilisateur et reçu par l'agent KS-Specimen. Le champ sera en conséquence rejeté ou accepté sauf dans le cas où l'utilisateur ne serait pas d'accord avec ce choix : un champ trouvé "peu" pertinent par le système KIDS pourrait être considéré à par l'utilisateur comme potentiellement significatif.

A ce stade, et puisque l'utilisateur est d'accord pour analyser le champ, un seuil de surface lui est demandé, qui servira ultérieurement à raisonner sur la pertinence des objets cellulaires qui seront repérés dans ce champ.

Enfin, l'avis de l'utilisateur sur la nécessité d'envisager une analyse à haute résolution est demandé. Si l'utilisateur estime qu'une telle analyse n'est pas nécessaire, le champ est transmis directement à l'agent KP-Analyze.

*remarque*

Le paramètre déterminant la pertinence d'un champ est attaché à l'agent KS-Specimen. En effet, ce paramètre exprime une connaissance globale sur l'apparence du spécimen. Au contraire, le seuil de surface est attaché à l'agent KS-Low-Res. Ces critères présidant à la sélection des cellules sont en effet d'essence locale, ils sont ajustés dynamiquement au cours de l'analyse.

La figure 27 illustre le raisonnement effectué par la phase exploratoire en ce qui concerne l'acceptation ou le rejet des champs d'analyse. Le champ numéro 15 est rejeté : en effet, son analyse ne présente aucun intérêt car il ne contient pas d'objets cellulaires. En outre, on peut remarquer que l'exploration des champs d'analyse dans ce cas précis est conduite selon une stratégie aléatoire d'exploration.

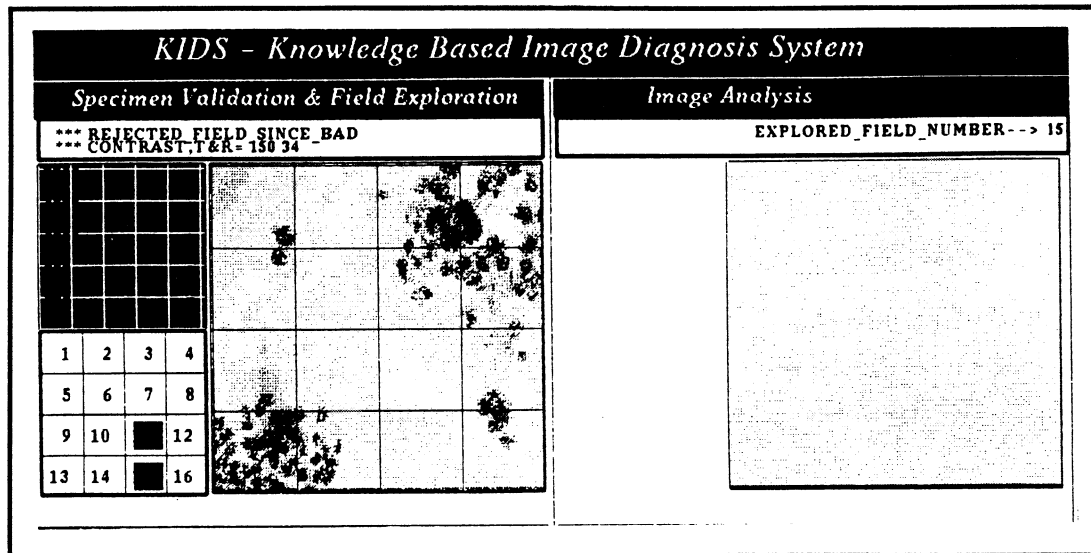


Figure 27 : Le champ d'exploration numéro 15 est rejeté par la phase exploratoire du fait de l'absence d'objets cellulaires d'analyse.

### 2.1.5. Etat actuel de l'implantation

L'état actuel des bases des connaissances pour les trois agents KS-Specimen, KP-Explore et KS-Low-Res (l'agent KP-Validate n'est pas opérationnel actuellement) est le suivant :

- la base de connaissances de l'agent KS-Specimen contient **trois types différents d'objets**. L'objet image permet une description de l'image en terme d'attributs d'acquisition tels que le nom, la dimension ou la position, mais aussi en termes de caractéristiques intrinsèques de l'image telles que le seuil de distribution des niveaux de gris ou la nécessité d'une analyse en haute ou en basse résolution ; l'objet mémoire tampon permet une description des diverses mémoires tampon pour le stockage d'images et l'objet drapeau décrit les divers drapeaux correspondant aux conditions d'arrêt. Les règles spécialisées, quant à elles, sont les suivantes : **une règle de propagation** dédiée essentiellement à l'acquisition et à la visualisation des images des spécimens, **une règle de proposition** permettant la transmission des vues du spécimen et **six règles d'interrogation** dédiées notamment à l'interaction avec l'utilisateur. De nouveaux objets ainsi que de nouvelles règles spécialisées devront prochainement être ajoutés à cet agent pour supporter l'acquisition interactive d'images des spécimens. Cette acquisition sera effectuée par le biais d'une caméra couplée au microscope. Ce microscope sera doté de platines motorisées pilotées directement par le système qui contrôlera alors lui-même l'exploration de la lame. Ceci permettra de développer une version vraiment opérationnelle du système KIDS ;



- la base de connaissances de l'agent KP-Explore contient **trois règles d'action** correspondant aux trois stratégies d'exploration du spécimen qui ont été expliquées précédemment ;
- la base de connaissances de l'agent KS-Low-Res contient également les trois types d'objets distingués dans l'agent KS-Specimen. Les règles spécialisées dans cet agent sont **trois règles de propagation** dédiées à la réception et à la visualisation des champs d'analyse ainsi qu'à l'évaluation de la pertinence de ces champs et **deux règles de proposition** dont le but est d'alterner entre l'analyse à haute résolution et l'analyse à basse résolution. Enfin, cet agent possède **trois règles d'interrogation** chargées de l'interaction avec l'utilisateur.

## 2.2. Phase d'identification cellulaire :

### 2.2.1. Problématique

La problématique de cette phase peut être résumée par les tâches de sélection des cellules significatives qui seront par la suite analysées en détail et identifiées.

La sélection des cellules intéressantes dans chaque champ est guidée, de la même façon que pour la sélection des champs significatifs, par un ensemble varié de critères :

- critères intrinsèques : pertinence intrinsèque de la cellule ;
- critères contextuels : type de cellules déjà observées, hypothèse diagnostic en cours ;
- objectif de l'analyse (screening ou diagnostic)

En ce qui concerne l'identification des types cellulaires, celle-ci implique d'abord l'observation soigneuse de la morphologie cellulaire. Plusieurs autres critères peuvent néanmoins influencer le raisonnement, de façon plus ou moins consciente :

- contexte d'apparition de la cellule : une attention différente sera portée à une cellule isolée ou à une cellule impliquée au sein d'amas de cellules apparemment similaires ;
- cellules observées précédemment : l'accumulation d'observations similaires génère l'"attente prédictive" d'événements identiques ;
- hypothèse diagnostique courante : de façon similaire, l'hypothèse courante est susceptible d'influencer l'observation en générant l'attente de tel ou tel type de cellules;
- connaissances sur le spécimen, le type de prélèvement et la coloration (restriction directe de l'espace de recherche).

### 2.2.2. Distribution des tâches et des compétences

Les rôles à assumer dans la phase exploratoire sont les suivants :

- Analyse de la morphologie cellulaire et calcul de descripteurs significatifs ;
- Identification des types cellulaires selon les caractéristiques morphologiques des cellules ;
- Mémorisation des cellules identifiées et de leur fréquence d'apparition ;

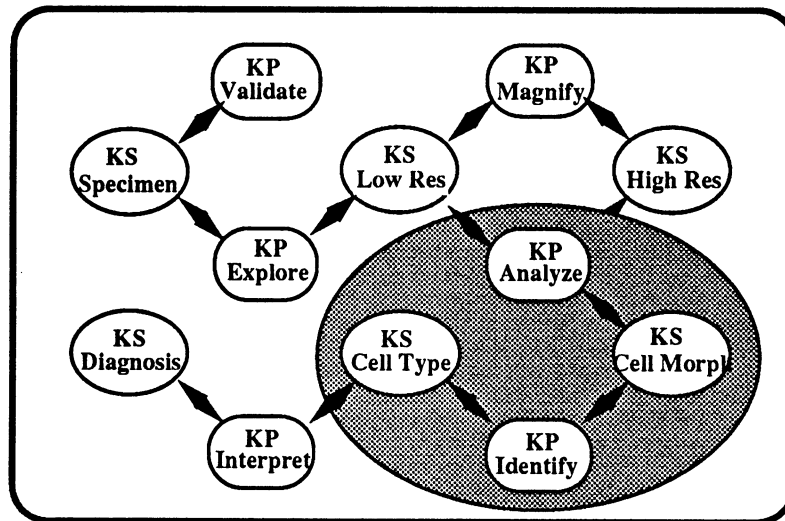
Les rôles ont été distribués de la façon suivante :

- le rôle de l'agent KP-Analyze est la segmentation de l'image du champ et l'envoi successif des cellules, avec leur surface, à l'agent KS-Morphology.

- le rôle de l'agent KS-Morphology est l'évaluation de la pertinence intrinsèque des cellules en fonction du critère de surface et la transmission des cellules sélectionnées. Il est également d'évaluer et de transmettre les caractéristiques morphologiques des cellules sélectionnées.
- le rôle de l'agent KP-Identify est d'identifier les types cellulaires à partir des caractéristiques morphologiques des cellules sélectionnées.
- le rôle de l'agent KS-Cell-Type consiste à stocker et mettre à jour les scores correspondant à la fréquence d'apparition des différents types cellulaires repérés.

### 2.2.3. Choix d'implantation

Nous présentons dans la figure 28 le groupe d'agents impliqués dans la phase d'identification cellulaire.



**Figure 28** : Groupe d'agents impliqués dans la phase d'identification cellulaire.

Nous présentons dans les tables 10, 11, 12 et 13 une synthèse des ressources attribuées aux agents KP-Analyze, KS-Cell-Morph, KP-Identify et KS-Cell-Type.

Table 10. Ressources de l'agent KS-Analyze

<i>Agent</i>	<b>KP-Analyze</b>
<i>rôle</i>	segmentation de l'image du champ et envoi successif des cellules avec leur surface à l'agent KS-Morphology en vue d'une identification cellulaire
<i>ressources</i>	<p>--&gt; règles d'action :</p> <p>SI            descripteurs de l'image du champ ont été obtenus par le biais de l'agent KS-Low-Resolution</p> <p>ALORS (1) segmenter l'image du champ et (2) répéter pour chaque cellule repérée sur l'image du champ :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- mise en évidence du contour cellulaire par le biais d'une procédure graphique</li> <li>- calcul de surface</li> <li>- envoi de la cellule détectée à l'agent KS-Cell-Morph pour une investigation approfondie</li> </ul>
<i>remarques</i>	<p>--&gt; procédure de segmentation d'image :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- calcul de seuils par analyse d'histogramme (classification de Fisher);</li> <li>- seuillage de l'image;</li> <li>- fermeture binaire;</li> <li>- étiquetage de composants connexes;</li> <li>- décomposition géométrique d'agrégats cellulaires.</li> </ul>

<i>Agent</i>	<b>KS-Cell-Morphology</b>
<i>rôle</i>	évaluation de la pertinence des cellules eu égard à leur surface, calcul des descripteurs significatifs de la morphologie cellulaire et attachement de ces descripteurs à l'objet cellule, qui est alors transmis à l'agent KP-Identify pour une identification approfondie
<i>ressources</i>	<p>--&gt; connaissances figuratives :</p> <p>étiquettes des cellules et principaux descripteurs morphologiques, parmi lesquels : cell_arrangement, cell_size, cell_shape, cytoplasm_texture, N/C ratio, number_of_vacuoles et vacuole_size</p>
	<p>--&gt; connaissances heuristiques :</p> <p>règles de propagation :</p> <p>SI la surface de la cellule est inférieure ou égale au seuil de surface établi par l'utilisateur</p> <p>ALORS propager décision de rejeter la cellule en cours d'étude</p> <p>règles de proposition :</p> <p>SI (1) avis de l'utilisateur sur la pertinence de la cellule et  <i>cc : l'utilisateur pourrait considérer la cellule proposée non significative et ainsi la rejeter</i></p> <p>(2) les paramètres cell_arrangement, cell_size, cell_shape, cytoplasm_texture, N/C ratio, number_of_vacuoles et vacuole_size sont connus</p> <p>ALORS proposer cette cellule pour identification</p>
<i>remarques</i>	les descripteurs morphologiques des cellules, à l'exception de la surface cellulaire, sont actuellement obtenus via l'activation de règles d'interrogation questionnant directement l'utilisateur. Afin de pouvoir calculer ces descripteurs automatiquement un nouvel agent KP devra être inséré.

Table 12. Ressources de l'agent KP-Identify

<i>Agent</i>	<b>KP-Identify</b>
<i>rôle</i>	identifie les types cellulaires à partir de règles de correspondance entre caractéristiques morphologiques et types cellulaires
<i>ressources</i>	--> connaissances opératoires : SI (1) cell_arrangement = isolated et (2) cell_size = small or medium et (3) cell_shape = elongated et (4) cytoplasm_texture = homogeneous et (5) N/C ratio = medium ALORS envoyer "cell type = fibroblast" à KS-Cell-Type

Table 13. Ressources de l'agent KS-Cell-Type

<i>Agent</i>	<b>KS-Cell-Type</b>
<i>rôle</i>	stocke et met à jour les scores correspondant à la fréquence d'apparition d'un type cellulaire considéré
<i>ressources</i>	--> connaissances figuratives : score et types cellulaires, parmi lesquels : cancer, adenoma, fibroblast, benign-nude-nucleus, malignant-nude-nucleus, metaplasia, spumous, epithelial, myoepithelial
	--> connaissances opératoires : règles de propagation SI (1) cell type = myoepithelial et (2) avis de l'utilisateur sur le type cellulaire proposé ALORS incrémenter de 1 le score de ce type cellulaire
	règles d'interrogation :  SI avis de l'utilisateur sur le type cellulaire proposé n'a pas encore été demandé ALORS questionner l'avis de l'utilisateur
<i>remarques</i>	les règles de proposition dans cet agent ont pour but de proposer un type cellulaire à l'agent KP-Interpret chaque fois que ce type a été identifié et validé par l'utilisateur.



#### 2.2.4. Fonctionnement du groupe d'agents

Le rôle de l'agent KP-Analyze est en premier lieu de procéder à la segmentation du champ. Un calcul de surface pour chacune des cellules obtenues en résultat de la segmentation est ensuite entrepris et le résultat est attaché à l'objet cellule. Les cellules sont enfin transmises une par une à l'agent KS-Morphology, par le biais d'une seconde boucle de contrôle.

Le rôle de l'agent KS-Morphology est en premier lieu de raisonner sur la pertinence de la cellule réceptionnée en comparant sa surface au seuil fourni par l'utilisateur. La cellule sera donc rejetée ou acceptée sauf avis contraire de l'utilisateur : une cellule trouvée "peu" pertinente par le système KIDS pourrait être considérée par l'utilisateur comme potentiellement significative.

Le calcul des descripteurs de la morphologie cellulaire est ensuite poursuivi. Ces descripteurs sont attachés à l'objet cellule, qui est alors transmis à l'agent KP-Identify. Une règle de proposition est mise en œuvre à cet égard, dont le rôle est tout d'abord de requérir l'avis de l'utilisateur sur le caractère informatif de l'objet cellulaire, puis de s'assurer que certains descripteurs morphologiques essentiels ont effectivement été calculés. La cellule peut alors être transmise à l'agent KP-Identify. Ces descripteurs sont actuellement acquis manuellement par dialogue avec un observateur externe : le contour de la cellule est mis en évidence sur l'écran à cette fin.

L'identification de types cellulaires est effectuée par l'agent KP-Identify par le biais de règles de production conçues à partir d'un tableau mettant en correspondance les caractéristiques morphologiques et les types cellulaires essentiels au diagnostic. Cette identification cellulaire est ensuite transmise à l'agent KS-Cell-Type. L'identification cellulaire est réceptionnée par l'agent KS-Cell-Type, dont les règles de propagation sont alors mises en œuvre : en cas de validation par un observateur externe du type cellulaire proposé, le score correspondant (fréquence d'observation du type cellulaire) est mis à jour. En cas de refus, le contrôle est retourné à l'agent KP-Analyze, et la cellule suivante est proposée à l'analyse morphologique. Dans le cas contraire, la cellule est transmise à l'agent KP-Interpret.



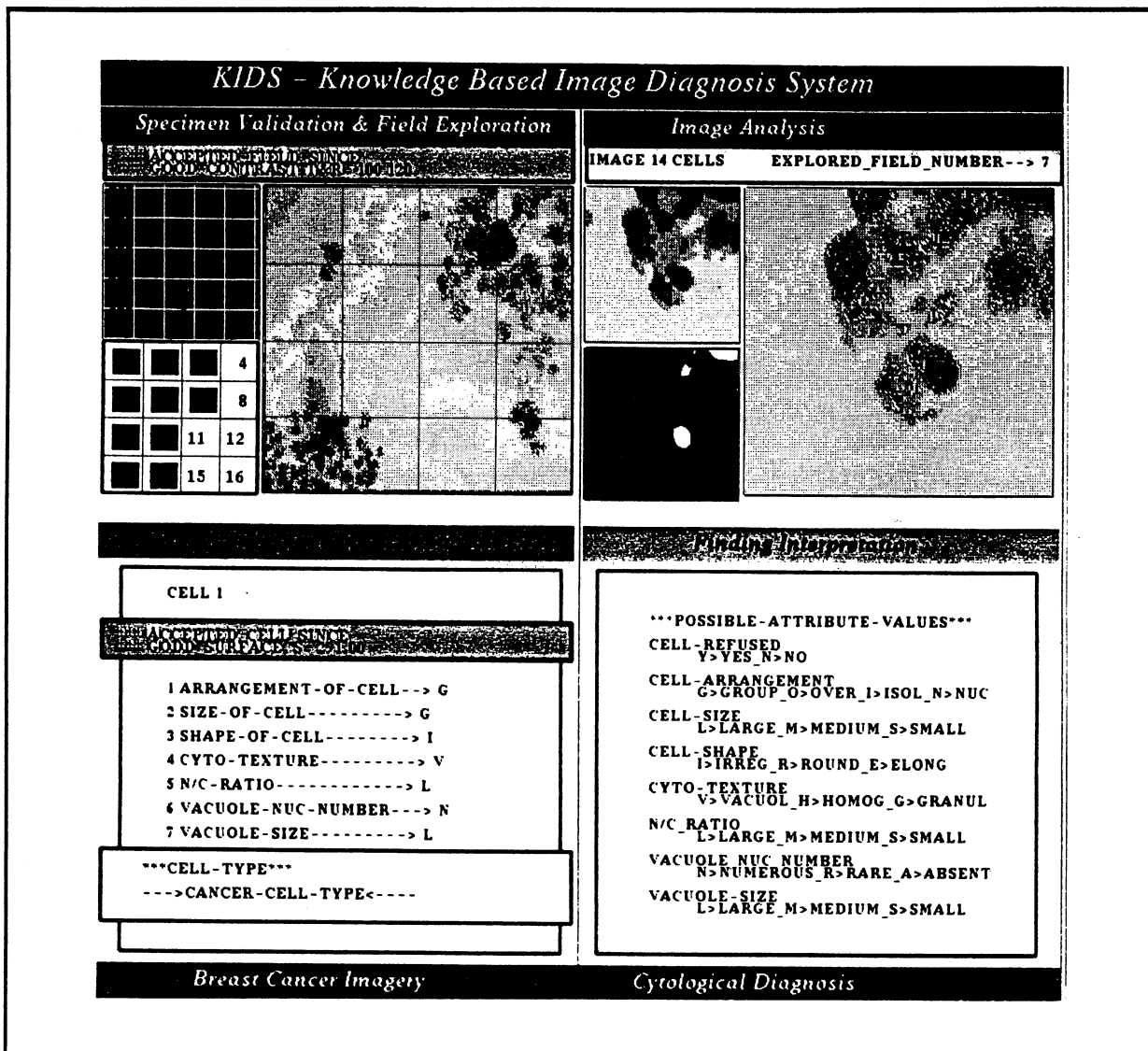


Figure 30 : Illustration du raisonnement effectué par la phase d'identification cellulaire : le type cellulaire "cancer" a été associé à la première cellule du champ d'exploration numéro 7 .

La figure 30 illustre le raisonnement effectué par la phase d'identification cellulaire en ce qui concerne l'identification des types cellulaires. Le type cellulaire "cancer" en effet, a été identifié d'après les valeurs des descripteurs morphologiques obtenues pour la cellule en cours d'étude.

### 2.2.5. Etat actuel de l'implantation

L'état actuel des bases de connaissances pour les quatre agents KP-Analyze, KS-Morphology, KP-Identify et KS-Cell-Type est le suivant :

- la base de connaissances de l'agent KP-Analyze est composée d'**une seule règle d'action** qui est assez complexe. Cette règle articule en effet l'exécution des dix procédures concernant la segmentation de l'image du champ (tableau 10), la visualisation des résultats graphiques, le calcul de la surface des cellules et leur envoi successif ;
- la base de connaissances de l'agent KS-Morphology est composée tout d'abord de **deux objets complexes** : l'un qui décrit les champs d'exploration, l'autre qui contient les descripteurs morphologiques essentiels caractérisant les cellules. Quant aux règles spécialisées composant cet agent, citons les **onze règles de propagation** chargées soit d'évaluer la pertinence intrinsèque des cellules en fonction du critère de surface, soit de propager les valeurs des attributs obtenues pour les divers descripteurs morphologiques des cellules. **Une seule règle de proposition** existe dans la base de connaissances de cet agent, qui est chargée de transmettre les caractéristiques morphologiques des cellules sélectionnées. Enfin, **neuf règles d'interrogation** évaluent les caractéristiques morphologiques des cellules sélectionnées.
- la base de connaissances de l'agent KP-Identify contient **dix règles d'action** capables d'identifier dix types cellulaires distincts à partir de leurs caractéristiques morphologiques.
- la base de connaissances de l'agent KS-Cell-Type contient **deux types d'objets** distincts : l'un utilisé pour décrire les caractéristiques principales de la cellule et l'autre utilisé pour stocker la fréquence d'apparition attachée à un type cellulaire repéré parmi les dix types cellulaires possibles. En ce qui concerne les règles spécialisées **dix règles de propagation** sont dédiées à la mise à jour des scores associés à la fréquence d'apparition des différents types cellulaires repérés. **Une seule règle de proposition** est utilisée pour la transmission des types cellulaires à l'agent KP-Interpret. Enfin, **une seule règle d'interrogation** est présente dans cet agent et chargée de l'interaction avec l'utilisateur.

## 2.3. Phase de formulation diagnostique

### 2.3.1. Problématique

La problématique de la phase de formulation diagnostique est d'analyser la quantité de cellules observées dans chaque type cellulaire, selon les résultats obtenus par la phase précédente.

Selon la quantité de cellules observées dans chaque type cellulaire, des critères de type taxinomique seront en effet utilisées, qui exploitent une arborescence des hypothèses pathologiques concernant le diagnostic en cours d'étude.

Un diagnostic plus fin (classification cytopronostique des cancers, par exemple) est obtenu par l'évaluation de critères morphologiques précis. D'autres critères peuvent également influencer le raisonnement mis en jeu à cet égard :

- aspect global du spécimen ;
- hypothèse de diagnostic en cours : on cherchera plutôt à confirmer une hypothèse déjà élaborée, qu'à la remettre en question de façon permanente ;
- toutes informations a priori sur le patient, le type de prélèvement, les autres lames déjà observées.

Un autre aspect de la problématique concernant la formulation diagnostique est la manipulation des connaissances incertaines. En effet, tel que nous l'avons énoncé dans le chapitre sur les connaissances la valeur "absolument vrai" ou "absolument faux" ne peut pas être attribuée à la présence d'une pathologie.

#### *choix dans le système KIDS*

Dans le cas du système KIDS la présence des pathologies n'est qualifiée qu'avec un certain degré de vraisemblance tel que "absent", "peu-probable", "incertain", "peut-être", "sans-doute" ou "vraisemblable".

#### *remarque*

Une stratégie de prédiction / vérification peut être mise en œuvre tant pour la description morphologique des types cellulaires que pour la formulation diagnostique. En effet, une prédiction effectuée à faible grossissement (scrutation rapide) est suivie d'une vérification à haute résolution (scrutation soigneuse) dans le premier cas. Le nombre des cellules rencontrées orientent vers une hypothèse diagnostique que l'on cherche à alimenter par explorations ultérieures.

### 2.3.2. Distribution des tâches et des compétences

Les rôles à assumer dans la phase de formulation diagnostique sont les suivants :

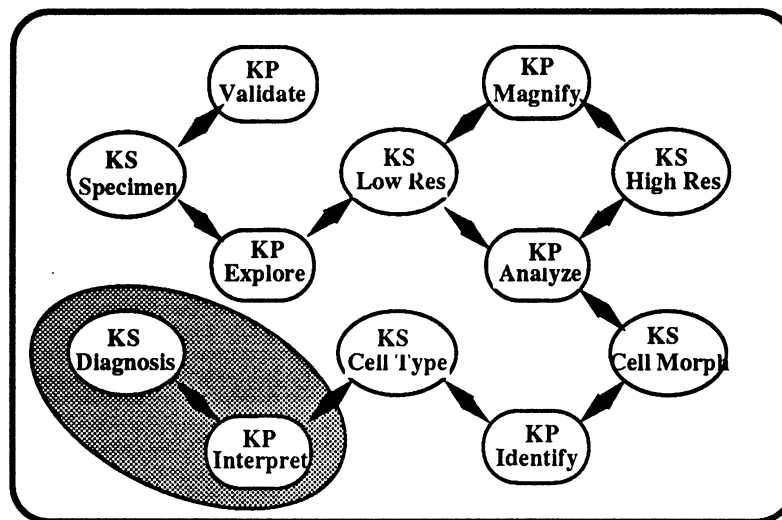
- Formulation diagnostique ;
- Mémorisation des hypothèses probables de diagnostic ;

Les rôles ont été distribués de la façon suivante :

- le rôle de l'agent KP-Interpret consiste à formuler un diagnostic d'après le tableau de correspondance entre types cellulaires et pathologies.
- le rôle de l'agent KS-Diagnosis consiste à stocker et à propager des hypothèses probables de diagnostic.

### 2.3.3. Choix d'implantation

Nous présentons dans la figure 31 le groupe d'agents impliqués dans la phase de formulation diagnostique.



**Figure 31** : Groupe d'agents impliqués dans la phase de formulation diagnostique.

Nous présentons dans les tables 13 et 14 une synthèse des ressources attribuées aux agents KP-Interpret et KS-Diagnosis.

Table 13. Ressources de l'agent KP-Interpret

<i>Agent</i>	<b>KP-Interpret</b>
<i>rôle</i>	formule un diagnostic d'après le tableau de correspondance entre types cellulaires et pathologies
<i>ressources</i>	<p>--&gt; connaissances opératoires</p> <p>règles d'action :</p> <p>SI (1) score de cellules fibroblast &gt; N et (2) score de cellules epithelial &lt; M</p> <p>ALORS envoyer "diagnosis = fibroadenoma" à l'agent KS-Diagnosis</p> <p>--&gt; connaissances heuristiques</p> <p>méta-règles :</p> <p>SI (1) score de cellules spumeuses &gt; O et (2) score de cellules métaplasie apocrine &gt; P</p> <p>ALORS sélectionner les règles d'action concluant sur "mastose" ou "kyste"</p>

Table 14. Ressources de l'agent KS-Diagnosis

<i>Agent</i>	<b>KS-Diagnosis</b>
<i>rôle</i>	stocke et propage des hypothèses probables de diagnostic
<i>ressources</i>	<p>--&gt; connaissances figuratives :</p> <p>description des hypothèses diagnostiques parmi lesquelles : Epithelial Hyperplasia, Adenoma, Fibroadenoma, Mastose, Cyst, Lipoma, Cancer</p>
	<p>--&gt; connaissances heuristiques :</p> <p>règles de propagation</p> <p>SI (1) "diagnosis = mastose" ou (2) "diagnosis = kyste"</p> <p>ALORS affecter l'attribut "présence" des pathologies hyperplasie-épithéliale à "peu-probable"</p>
	<p>règles d'interrogation :</p> <p>SI l'utilisateur n'a pas encore été questionné sur le diagnostic formulé</p> <p>ALORS demander l'accord de l'utilisateur sur le diagnostic formulé</p>



#### 2.3.4. Fonctionnement du groupe d'agents

L'agent KP-Interpret est chargé de la formulation diagnostique : il met en œuvre à cette fin une stratégie de prédiction / vérification fondée sur la mise en œuvre de règles de stratégies et de règles d'actions particulières exploitant les scores précédemment calculés. Cette stratégie, fondée sur l'analyse de la hiérarchie des hypothèses diagnostiques possibles, consiste à chercher le "meilleur" chemin conduisant à l'hypothèse diagnostique la plus plausible. Cette stratégie reflète d'ailleurs la démarche du médecin, démarche selon laquelle une focalisation diagnostique progressivement plus précise est effectuée, alors que des zones nouvelles de la lame sont observées.

L'agent KS-Diagnosis réceptionne enfin les hypothèses diagnostiques proposées par l'agent KP-Interpret et au travers de ses règles de propagation questionne l'utilisateur sur la validité du diagnostic précédemment formulé. Ces règles assurent également le maintien de la cohérence des informations diagnostiques disponibles. Lorsqu'une hypothèse est émise, ou modifiée, il convient en effet de tenir compte des compatibilités ou incompatibilités éventuelles entre hypothèses, et donc de modifier en conséquence l'attribut "présence" qui leur est attaché.

Le contrôle est envoyé en retour à l'agent KP-Analyse, ce qui provoque l'analyse de la cellule suivante. Lorsque toutes les cellules au sein d'un même champ ont été analysées, le contrôle est retourné à l'agent KP-Explore, ce qui provoque l'analyse du champ suivant.

#### 2.3.5. Etat actuel de l'implantation

L'état actuel des bases des connaissances pour agents KP-Interpret, KS-Diagnosis est le suivant :

- la base de connaissances de l'agent KP-Interpret contient **sept règles d'action** capables de conclure sur une hypothèse diagnostique en fonction d'une combinaison des bilans des fréquences d'apparition des divers types cellulaires repérés, et **sept règles de stratégie** qui focalisent la formulation diagnostique sur des pathologies individuelles ou sur des groupes des pathologies présentant des caractéristiques communes. Les règles d'action sont rangées en arborescence (figure 33) selon une classification fondée sur le degré de malignité des pathologies impliquées ;
- la base de connaissances de l'agent KS-Diagnosis contient **un seul type d'objet** qui est utilisé pour décrire les hypothèses diagnostiques (sept instances de cet objet sont ainsi possibles : une instance par hypothèse diagnostique) ainsi que le bilan des

fréquences d'apparition des divers types cellulaires repérés. En ce qui concerne les règles spécialisées dans cet agent, **douze règles de propagation** assurent le maintien de la cohérence des informations diagnostiques disponibles. C'est ainsi par exemple que l'introduction d'une nouvelle hypothèse diagnostique dont la présence est évaluée à "sans-doute" pourra modifier d'autres hypothèses diagnostiques, en qualifiant leur présence à "peu-probable" ou "incertaine", voire "improbable". **Sept règles de proposition** sont utilisées pour proposer et afficher les résultats des formulations diagnostiques obtenues. Enfin, **une seule règle d'interrogation** est présente dans cet agent, et chargée de l'interaction avec l'utilisateur. Cette interaction concerne la validation diagnostique. D'autres types d'objets ainsi que d'autres règles spécialisées devront être ajoutées dans cet agent dans le but d'une validation du diagnostic considérant le dossier médical des patients auxquels se rapportent les analyses des spécimens.

#### 2.4. Interface graphique

Une interface graphique générale, fonctionnant par menus déroulants, est intégrée dans le générateur MAPS pour la visualisation des diverses bases de connaissances des agents KIDS. Cette interface s'exécute sous UNIX et X-Windows sur station de travail APOLLO DN3550. Les divers objets composant les agents KS peuvent ainsi être consultés et modifiés. Ainsi, après un arrêt dans l'exécution du système suivi d'une modification ultérieure des bases de connaissances, l'exécution du système peut être reprise avec des nouvelles valeurs pour les attributs des objets. Les règles spécialisées des agents KS aussi bien que des agents KP peuvent elles aussi être visualisées.

Cependant, une interface graphique spécialisée a été conçue dans le système KIDS pour le suivi des résultats et analyses issus des différents agents. Cette interface, dans la phase d'exploration, permet la visualisation des histogrammes associés aux images des champs, des grilles d'exploration avec leurs traces et des résultats des raisonnements obtenus (figure 27). Dans la phase d'identification cellulaire, elle permet la visualisation des descripteurs morphologiques attachés aux cellules, et de leurs surfaces(figure 30). Enfin, elle permet également la visualisation des attributs des hypothèses diagnostiques et des bilans des fréquences d'apparition des divers types cellulaires correspondants.

Cette interface graphique a été écrite entièrement en Pascal et met en œuvre des appels aux routines graphiques disponibles dans les environnements graphiques des stations de travail APOLLO DN3XXX.

### 3. Raisonnements développés par le système KIDS

#### 3.1. Raisonnements au niveau primaire

##### 3.1.1. Raisonnements et organisation fonctionnelle de la connaissance

###### *Raisonnement figuratif*

Le raisonnement figuratif du système KIDS dans son état actuel est exprimé essentiellement par la sélection des champs d'exploration du spécimen et par la sélection des cellules significatives qui seront par la suite analysées en détail.

Un seul critère est essentiellement utilisé ici pour la sélection des champs significatifs : la pertinence du champ d'exploration ; celle-ci est exprimée par la qualité de la distribution des niveaux de gris sur l'image du champ. Ce critère calculé à partir de l'histogramme indique si l'image est bien contrastée ou non. Une image bien contrastée reflète l'existence d'objets qui seront facilement segmentés et interprétés par la suite.

En ce qui concerne la sélection des cellules significatives le seul critère utilisé pour l'instant par le système KIDS est la surface de la cellule qui est calculée et comparée au seuil de surface donné par l'utilisateur pour juger si la cellule est significative ou non. Outre la surface de la cellule d'autres critères peuvent être utilisés tels que la pertinence intrinsèque de la cellule et son contexte d'apparition. La pertinence intrinsèque de la cellule est exprimée par son aspect global : une cellule présentant des caractéristiques morphologiques particulières non encore observées précédemment peut induire la présence d'anomalies dans le spécimen. Le contexte d'apparition d'une cellule est exprimé par le fait que la cellule est isolée ou impliquée au sein d'amas de cellules.

###### *Raisonnement opératoire*

Le raisonnement opératoire du système KIDS dans son état actuel est exprimé essentiellement par les choix de stratégies d'exploration du spécimen, présentées précédemment dans le fonctionnement du groupe d'agents de la phase exploratoire.

Il est également important d'envisager la mise en œuvre d'un raisonnement opératoire dans le cas de la segmentation. Dans le système KIDS un seul type de segmentation par régions est disponible actuellement : "la classification de Fisher". Comme son nom l'indique ce type de segmentation est fondé sur un critère de classification qui procède au calcul de seuils de segmentation par analyse de l'histogramme des niveaux de gris de l'image. La segmentation par classification de Fisher a été choisie dans notre cas car elle s'adapte bien à l'image des cellules cancéreuses où les composants se détachent bien du fond de l'image. En conséquence,

l'histogramme associé à l'image conduit à une discrimination claire des cellules. A long terme le système KIDS permettra d'analyser plusieurs types de spécimens : d'autres modes de segmentation par régions ou par contour devront donc être introduits, dont la sélection devra se fonder sur des critères adaptés aux caractéristiques des images traitées.

Un test sur la convexité des régions obtenues après avoir appliqué le procédé de segmentation est utilisé qui conduit à la séparation par ligne médiane des objets composites (c'est-à-dire cellules superposées ou accolées).

### *Raisonnement réflexif*

Le raisonnement réflexif du système KIDS dans son état actuel est exprimé essentiellement par la manipulation de l'attribut "présence" des pathologies, qualifiant leur degré de vraisemblance ("absent", "peu-probable", "incertain", "peut-être", "sans-doute" ou "vraisemblable"). Des règles de propagation implantées dans l'agent KS-Diagnosis effectuent le maintien de la cohérence de cet attribut pour chacune des pathologies, en fonction des pathologies envoyées par l'agent KP-Interpret.

#### **3.1.2. Raisonnements et organisation structurelle de la connaissance**

Divers raisonnements du système KIDS sont fondés sur une organisation structurelle de la connaissance, c'est le cas en particulier dans la phase de formulation diagnostique où il s'agit de chercher à vérifier des pathologies malignes ou bénignes impliquées dans le diagnostic du cancer du sein. En effet, les règles de production modélisant la démarche de l'expert ont été émises et rangées d'après la taxinomie des pathologies montrée dans la figure 33. Un "ordonnancement" par malignité décroissante est mis en évidence entre pathologies qui suit la démarche de l'expert. Selon celle-ci il s'avère indispensable, tout d'abord, de chercher la présence des pathologies à tendance maligne, c'est-à-dire susceptibles d'entraîner une dégénérescence maligne : à cette fin, les règles de diagnostic associées aux pathologies telles que "cancer", "kyste" ou "mastose" sont considérées en premier lieu et activées si les types cellulaires rencontrés le permettent. Les règles de production associées aux pathologies bénignes sont en suite analysées.

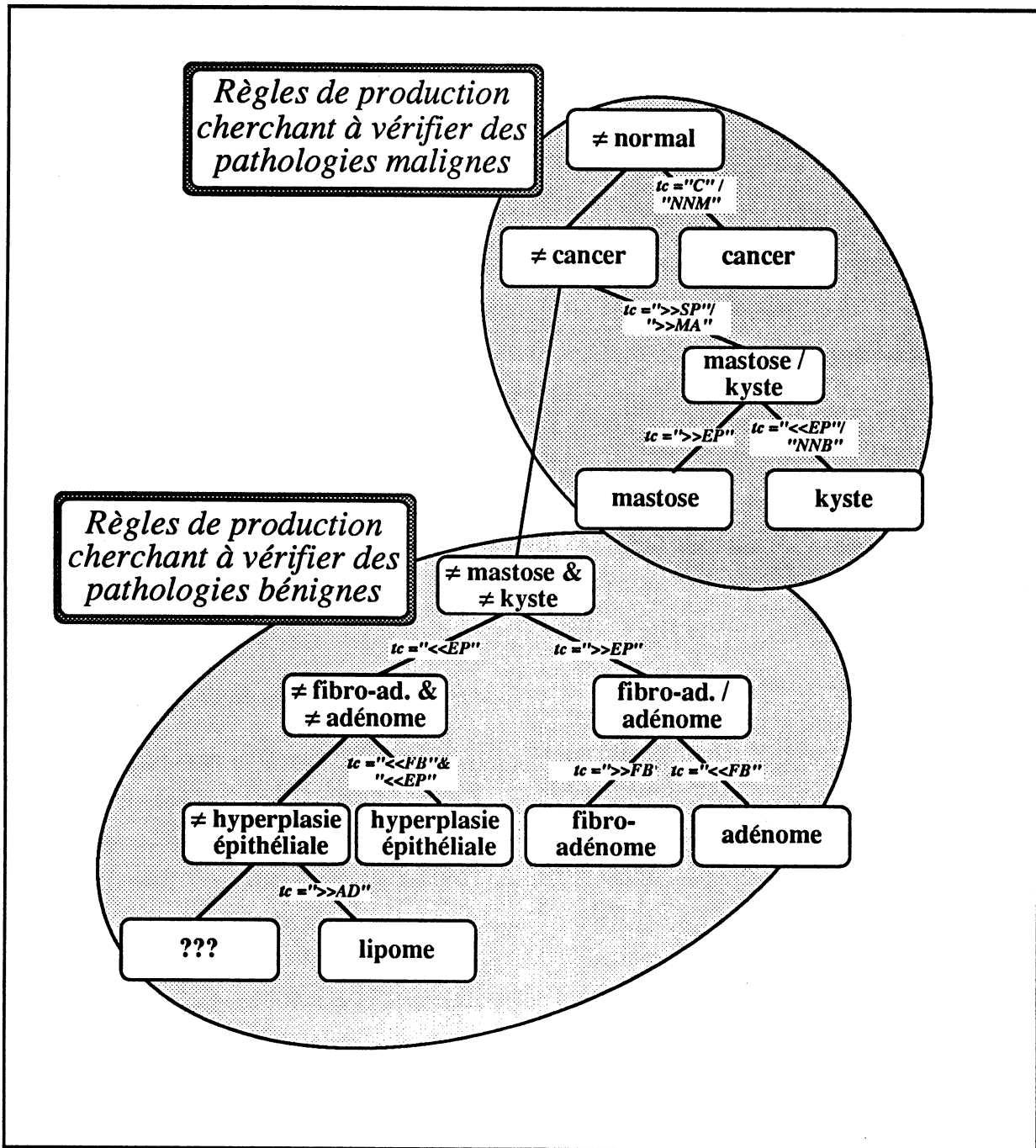


Figure 33 : Taxinomie des règles de production mettant en évidence un "ordonnancement" par malignité décroissante des pathologies impliquées dans le diagnostic du cancer du sein. Les règles les plus adaptées seront activées selon le score du type cellulaire (tc) rencontré.

### **3.1.3. Raisonnements et organisation de la connaissance par domaine d'application**

L'organisation de la connaissance par domaine d'application détermine une catégorisation des raisonnements en raisonnements généraux et raisonnements particuliers selon qu'ils développent un caractère de dépendance ou d'indépendance vis-à-vis du domaine spécifique de l'application. Des raisonnements généraux dans notre cas sont liés essentiellement aux comportements conférés par MAPS aux agents KS et KP face aux événements externes. D'autre part, des raisonnements particuliers sont codés par les règles des agents du système KIDS en vue de l'exploration, de l'identification et de la formulation diagnostique.

### **3.2. Raisonnements hybrides**

Les raisonnements hybrides dans le système KIDS s'expriment essentiellement par l'alternance entre focalisation figurative et focalisation opérative. La figure 34 montre cette alternance fonctionnelle sur l'architecture du système KIDS. En effet, les agents KS procèdent au choix et au séquençement des tâches (agents KP) de résolution, en les focalisant sur des informations / problèmes précis (validation d'un spécimen, analyse d'un champ d'exploration, par exemple). Les agents KP, quant à eux, délimitent les espaces conceptuels vers lesquels diriger l'analyse.

Le système KIDS offre ainsi une vue structurelle mais aussi fonctionnelle du problème du raisonnement médical en pathologie mammaire et permet un rapprochement entre sa spécification et sa résolution.

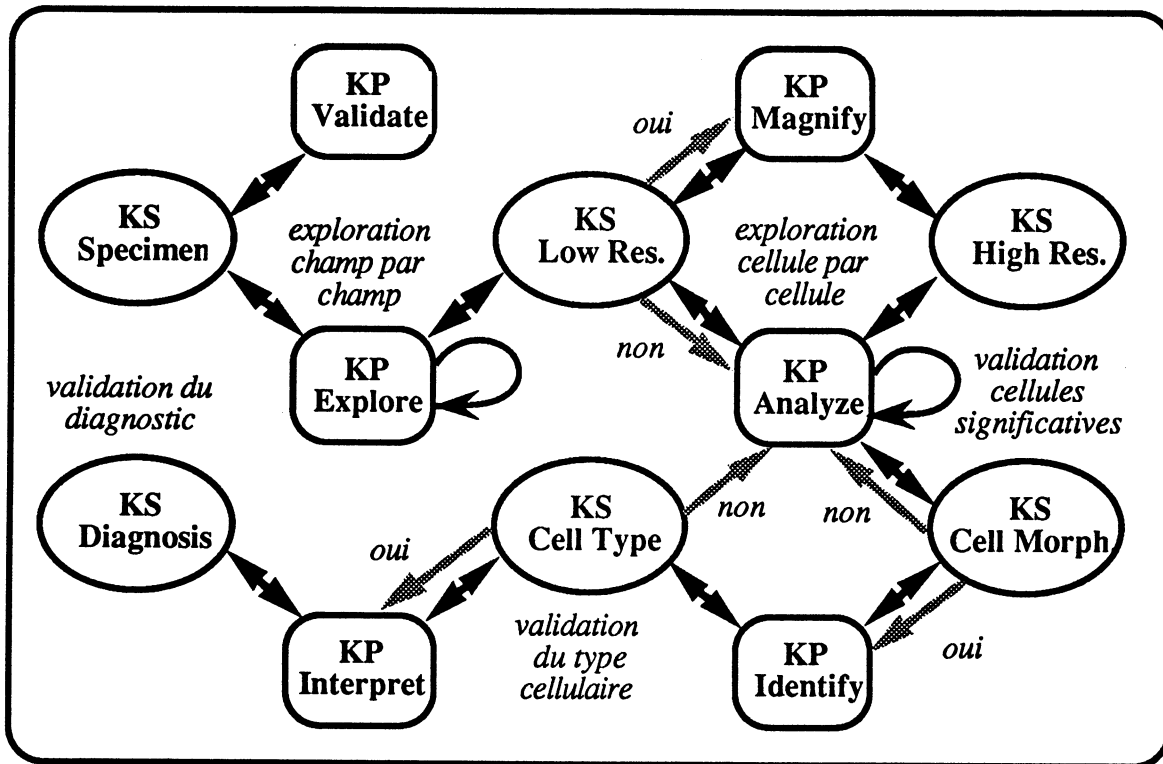


Figure 34 : Architecture et comportement fonctionnel du système KIDS. Deux boucles d'analyse (flèches circulaires) peuvent être observées, décrivant les stratégies d'analyse "champ par champ" et "cellule par cellule". Les flèches noires reflètent le flot d'information entre agents tandis que les flèches grises représentent l'influence des décisions prises par le système et supportées par l'utilisateur.

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le système KIDS, système multi-agent d'aide au diagnostic pour l'imagerie biomédicale. En premier lieu nous avons abordé la problématique des connaissances puis la manière dont elles sont modélisées, distribuées et manipulées au sein des agents KS et KP. A cette fin nous avons gardé le même ordre de présentation et de structuration des connaissances que celui qui a été utilisé dans le chapitre I de la partie B de cette thèse. Il convient de souligner ici les avantages offerts par l'approche multi-agent dans le but de la modélisation de l'expertise médicale, de la distribution des connaissances sous divers axes d'abstraction et de la structuration des connaissances selon leur nature.

Les agents composant le réseau multi-agent du système KIDS ont ensuite été présentés un par un ; les agents ont été regroupés selon les trois phases principales de résolution : la phase d'exploration du spécimen, la phase d'identification cellulaire et la phase de formulation diagnostique. Chaque agent est décrit en termes de : rôle, ressources (connaissances figuratives, opératoires, réflexives et heuristiques) et raisonnement, sous forme de tableaux synthétiques. Des exemples des diverses règles traduisant les connaissances manipulées par l'agent sont notamment explicitées.

Il convient de souligner que l'implantation des agents reste assez rudimentaire : notre souci principal était de fournir aux agents les connaissances suffisantes et les raisonnements simples et nécessaires, de façon à ce que le système puisse exhiber un comportement cohérent. Notre objectif consiste à enrichir leurs connaissances puis à intégrer des raisonnements complexes supplémentaires.

Les raisonnements mis en œuvre dans chaque phase, qui implique le fonctionnement d'un groupe d'agents, ont été également présentés. Nous avons abordé enfin l'analyse du raisonnement mis en œuvre globalement dans le système KIDS. Nous avons gardé ainsi que pour les connaissances, l'organisation issue de la typologie formelle de raisonnements donnée dans la partie B. Une description explicite des raisonnements développés aux deux niveaux, primaire (raisonnements figuratif, opératoire et réflexif) et hybride (combinaison des raisonnements figuratifs et opératoires) est fournie.

Ce système a été conçu à partir de MAPS, environnement de programmation générique pour la conception de systèmes multi-agents. MAPS est implanté en C++, sous UNIX et X-WINDOWS sur station de travail APOLLO DN3550, configurée avec 8Mbytes de RAM et 9' de temps de CPU. Cependant, l'environnement MAPS est actuellement transcrit sur station travail RISC (Sun SPARC GX) ce qui permettra d'améliorer les performances des applications conçues à partir de MAPS.



Le générateur MAPS permet l'intégration des routines de traitement d'images provenant de la bibliothèque des routines IPS (Image Processing Software) disponible dans notre laboratoire (Chassery 86) ou des simples procédures de calcul, écrites sous divers langages de programmation (Fortran, Pascal, C ou C++). Diverses procédures ont été ainsi conçues et intégrées pour appuyer les divers raisonnements développés dans cette phase. Citons par exemple la procédure de génération de nombres aléatoires écrite en C supportant la stratégie aléatoire d'exploration et la procédure de calcul d'histogramme écrite aussi en C fondée sur la distribution des niveaux des gris de l'image. Une librairie de procédures diverses utilisées par le système KIDS a été rangée sur un fichier de type c++ et contient actuellement 27 appels de procédures externes distincts concernant la tâche de segmentation (seuillage, étiquetage, fermeture ou décomposition, par exemple), la gestion des images (chargement ou stockage, par exemple), la visualisation des images et des grilles (zoom ou grille, par exemple) ou la gestion des fichiers (fichiers des fontes de caractères).

KIDS est écrit sous la syntaxe du langage MAPS comme un ensemble d'agents, chacun comprenant des ressources (objets, règles et moteur d'inférence), des capacités et des comportements : un tel programme est compilé et exécuté sous MAPS. De plus, le système KIDS est doté d'une interface multi-fenêtre permettant d'afficher les résultats obtenus, pour chacune des phases, au fur et à mesure de leur exécution.

L'apport de l'approche multi-agent est ici de permettre le développement de raisonnements à plusieurs niveaux différents : non seulement celui des objets et des actions, mais aussi celui des agents. Le raisonnement à ce niveau peut-être de nature réflexive (raisonnement sur les ressources de l'agent, celles de ses partenaires, sur son rôle au sein du système). Il peut également être de nature heuristique, et supporter des mécanismes de focalisation figurative et opératoire de haut niveau (sélection d'agents KS et KP). Des stratégies de raisonnement de même nature peuvent en outre être implantées sous des formes différents (prédiction / vérification par exemple). Il permet enfin l'émergence d'un comportement global cohérent, issu d'une coopération entre décisions locales, et non d'une décision globale imposée au système par un superviseur central.

KIDS enfin est capable de manipuler des connaissances et des raisonnements de nature hétérogènes. Il démontre un comportement globalement cohérent, issu de modes de raisonnement simples, actuellement en cours d'amélioration. La mise au point de ces raisonnements s'avère facilitée par l'approche multi-agent : elle permet en effet d'isoler les contextes propices à ces raisonnements, mais aussi de les envisager comme issus de la combinaison entre des chaînes de raisonnements plus simples.

Une modélisation “centrée-utilisateur” des connaissances et des raisonnements est facilitée par les typologies formelle et technologique proposées ici. L’architecture du système KIDS reflète en effet la démarche de résolution utilisée par le cytopathologue pour la scrutation de spécimens en cytologie mammaire.

En outre, toutes les connaissances et les raisonnements composant le savoir-faire et les compétences "dédiées" des divers agents de KIDS peuvent être identifiés au moyen des catégories établies dans les typologies formelles des connaissances et des raisonnements. Le transfert d’expertise a été facilité par l’alternance entre modélisation formelle et transcription informatique des diverses formes des connaissances et des raisonnements. Les autres éléments composant l’architecture interne des agents relèvent plutôt, quant à eux, de la typologie technologique.



## Conclusion partie C

---

Dans cette partie une typologie technologique a été proposée, dont l'objectif principal est de servir d'outil de réflexion pour l'étude du raisonnement d'un univers multi-agent. Divers avantages surgissent de cette typologie tels que :

- la définition de paramètres assez généraux régissant les raisonnements tant au niveau individuel de l'agent qu'au niveau du groupe d'agents ;
- l'allègement des tâches de conception par le biais d'une compréhension plus poussée de la technologie multi-agent ;
- la spécification de comportements de haut niveau permettant la modélisation de démarches générales de résolution ;
- l'étude du générateur de systèmes multi-agent MAPS selon une optique nouvelle.

L'environnement de programmation MAPS a été ainsi présenté selon une optique nouvelle permettant de rapprocher les typologies formelle et technologique proposées auparavant. La dualité "perspective profonde / perspective de surface", caractérisant les systèmes à base de connaissances de seconde génération a été soulignée, accordant un caractère profond à l'architecture organisationnelle des réseaux d'agents conçus à partir de MAPS. De plus, un raffinement des comportements de haut niveau développés dans la couche intentionnelle de l'architecture interne des agents permettra d'améliorer le processus de sélection d'agents permettant aussi d'implanter des approches de coopération plus sophistiquées.

Enfin, le système MAPS s'avère une approche logicielle solide et ouvert permettant l'intégration des outils informatiques de base et en l'occurrence des outils de vision, indispensables et nécessaires pour concevoir des systèmes pour l'interprétation d'images biomédicales.

Le système KIDS, dédié à l'interprétation d'images biomédicales, a été enfin présenté, la couche des compétences des agents contient, quant à elle, les connaissances et les raisonnements de surface capables de résoudre des problèmes spécifiques. Les groupes d'agents qui définissent trois phases d'analyse, développent un comportement global de groupe cohérent issu d'une coopération entre décisions locales.



## **Conclusion THESE**

---

Lorsque la conception d'un système implique une approche pluridisciplinaire, ce qui constitue le cadre privilégié de nos recherches, il est nécessaire de tendre à une recherche coopérative et de fournir des efforts visant à trouver le meilleur compromis entre les diverses disciplines qui interviennent. Dans ce but, une analyse approfondie a été menée dans la partie A de cette thèse, des technologies disponibles dans les trois domaines suivants : systèmes à base de connaissances, systèmes de vision et systèmes d'aide à la décision médicale.

Divers besoins à caractère technologique ont ainsi été soulevés, parmi lesquels :

- le besoin de disposer d'un outil technologique de conception robuste et de haut niveau qui respecte les besoins effectifs de l'utilisateur et les contraintes spécifiques d'une application ;
- le besoin de disposer d'une approche logicielle solide qui permette l'intégration d'outils informatiques de natures très diverses (opérateurs à vocations multiples, méthodes de traitement très variées, entre autres), mais aussi permettant l'intégration de stratégies de résolution et de mécanismes de contrôle.

Parmi les différentes approches, l'approche multi-agent s'avère offrir un outil technologique de haut niveau bien adapté à la résolution des applications complexes car permet une représentation de la connaissance multi-modale, une manipulation de schémas de raisonnement multi-formes, ainsi qu'une résolution coopérative des problèmes. Cependant, une des difficultés majeures des approches multi-agent est le risque pour le concepteur de tels systèmes, de se trouver rapidement "perdu", confronté à la manipulation des paramètres très divers caractérisant cette technologie. En effet, la technologie multi-agent offre des possibilités d'implantations et de choix techniques variés, ce qui exige un investissement de conception important, et conduit au risque pour le concepteur de se trouver confronté à un logiciel ingérable et lourd.

Pour éviter ces situations d'impasse, il s'avère nécessaire de disposer d'une typologie formelle robuste provenant d'une étude approfondie des connaissances et des raisonnements, qui aide à cerner les besoins réels de l'application. C'est ainsi que deux typologies formelles ont été proposées dans la partie B s'avérant en effet très utiles pour la structuration des connaissances

et des raisonnements. Les intérêts principaux dans l'utilisation de ces typologies formelles sont les suivants :

- facilité d'identification et de transcription informatique des diverses classes de connaissances et des raisonnements impliqués dans l'expertise à modéliser ;
- appréhension des aspects intrinsèques du raisonnement à travers les diverses formes de connaissances manipulées ;
- analyse des possibilités d'intégration des raisonnements non seulement à l'intérieur des tâches mais aussi dans le cadre d'une coopération entre tâches ;
- possibilité d'une conception "constructiviste" de systèmes intégrant d'abord des raisonnements simples, puis des combinaisons complexes de raisonnements.

Bien que ces typologies formelles permettent une structuration nécessaire à la modélisation des connaissances et du raisonnement et peuvent ainsi s'avérer un outil d'assistance à cette modélisation, ces typologies restent assez générales, difficiles parfois à cerner et peuvent être encore loin d'une implantation informatique. En effet, ces typologies ne permettent pas une implantation directe.

L'élaboration d'une typologie technologique s'est ainsi avérée nécessaire, pour une meilleure maîtrise de l'outil informatique mais aussi pour l'obtention des spécifications techniques indispensables à cette implantation. On a cherché également à se doter d'un outil de réflexion pour comprendre de façon approfondie, si possible, les difficultés et les enjeux de la technologie multi-agent.

Divers avantages surgissent de la typologie technologique qui a été proposée dans la partie C tels que :

- la définition de paramètres assez généraux régissant les raisonnements tant au niveau individuel de l'agent qu'au niveau du groupe d'agents ;
- l'allègement des tâches de conception par le biais d'une compréhension plus poussée de la technologie multi-agent ;
- la spécification de comportements de haut niveau permettant la modélisation de démarches générales de résolution ;

- l'étude du générateur de systèmes multi-agent MAPS selon une optique nouvelle.

L'environnement de programmation MAPS a été ainsi présenté selon une optique nouvelle permettant de rapprocher les typologies formelle et technologique proposées auparavant. De plus, un raffinement des comportements de haut niveau développés dans la couche intentionnelle de l'architecture interne des agents devrait permettre d'implanter des approches de coopération plus sophistiquées.

MAPS apparaît ainsi être comme un outil technologique de conception robuste et de haut niveau qui respecte les besoins effectifs de l'utilisateur et les contraintes spécifiques de l'application. De plus, il correspond à une approche logicielle solide permettant l'intégration d'outils informatiques de natures très diverses (opérateurs à vocation multiples, méthodes de traitement très variées, entre autres), mais aussi il permet l'intégration de stratégies de résolution et de mécanismes de contrôle.

L'objectif que nous nous étions fixé de permettre une conception plutôt "centrée-utilisateur" et moins "centrée-système" a été atteint : si l'on regarde l'architecture du système KIDS, elle reflète en effet, la démarche de résolution utilisée par le cytopathologue pour la scrutation de spécimens en cytologie mammaire. La décomposition et l'expression à un haut niveau de ce problème puis l'intégration des divers schémas de représentation des connaissances et des raisonnements, ont été largement supportées par l'architecture logicielle robuste qu'offre le générateur MAPS.

En ce qui concerne la question de concilier les deux typologies proposées dans cette thèse, une bonne complémentarité entre typologies formelle et technologique se développe lors de la conception d'un système multi-agent, tel que KIDS. En effet, en ce qui concerne la modélisation des connaissances et des raisonnements, elle s'avère facilitée par la typologie formelle qui permet un rapprochement entre la transcription informatique et l'expertise humaine. Le transfert d'expertise d'ailleurs, est facilité par l'alternance entre l'identification et la transcription informatique des diverses formes des connaissances et des raisonnements. Si l'on regarde les connaissances et les raisonnements composant le savoir-faire et les compétences "dédiées" des divers agents KIDS, ils peuvent être identifiés au moyen des catégories établies dans les typologies formelles des connaissances et des raisonnements.

La typologie technologique, quant à elle, rapproche le concepteur des aspects intrinsèques de la technologie des univers multi-agent. Cette typologie permet en effet au concepteur une meilleure maîtrise du générateur multi-agent MAPS tout en allégant les tâches de conception.



Il convient de souligner qu'un système conçu comme un réseau d'agents MAPS dédiés à un problème donné, peut être réutilisé et appliqué à un autre problème, de nature similaire. Il suffit pour cela de modifier les ressources des agents ou "connaissances et raisonnements de surface" du système, illustrées par les compétences "dédiées" des agents et exprimées par leur expertise dans un domaine spécifique d'application.

Malheureusement, le système KIDS est encore loin de l'objectif fixé en ce qui concerne la mise en œuvre en routine médicale. Beaucoup de travail reste encore à faire d'une part dans le domaine de la communication homme-machine et d'autre part dans le domaine de la validation médicale de ce système. En effet, bien que le système KIDS possède une interface multi-fenêtre lui permettant de déployer et afficher les résultats des raisonnements des divers groupes d'agents, le dialogue avec l'utilisateur reste assez précaire et limité. En ce qui concerne la validation du système, un effort de complétion des connaissances manipulées ainsi que d'intégration d'autres types de raisonnements devrait être fourni. De plus, un effort sera prochainement consacré à l'acquisition interactive d'images des spécimens par le biais d'une caméra couplée au microscope. Ce microscope sera doté de platines motorisées pilotées directement par le système qui contrôlera alors lui-même l'exploration de la lame. Ceci permettra de développer une version vraiment opérationnelle du système KIDS.

Enfin, l'introduction du parallélisme dans le système MAPS, grâce aux recherches menées actuellement dans notre laboratoire sur les approches réparties, permettra d'enrichir les typologies proposées dans cette thèse en introduisant de nouveaux paramètres pour l'étude du raisonnement en univers multi-agent en mode d'exécution parallèle.

## Références bibliographiques :

### *Sigles*

<b>CVPR</b>	Computer Vision et Pattern Recognition
<b>EMBS</b>	Engineering in Medicine et Biology Society
<b>ICAP</b>	International Conference on Image Analysis and Processing
<b>ICPR</b>	International Conference on Pattern Recognition
<b>IJCAI</b>	International Joint Conference on Artificial Intelligence
<b>IPMI</b>	International Conference on Information Processing et Medical Imaging
<b>PAMI</b>	Pattern Analysis et Machine Intelligence
<b>PRC-</b>	Programme de Recherche Coordonnée -
<b>GRECO</b>	Groupe de REcherche COordonnée
<b>RFIA</b>	Congrès Reconnaissances de Formes et Intelligence Artificielle

(Aguirre 89)

Aguirre, J.L.  
**Construction Automatique de taxonomies à partir d'exemples dans un modèle de connaissances par objets.**  
 Thèse de docteur es sciences, ENSIMAG, 1989.

(Aussenac 89)

Aussenac, N.  
**Conception d'une méthodologie et d'un outil d'acquisition de connaissances expertes.**  
 Thèse de docteur en Informatique, Spécialité : Intelligence Artificielle.  
 Université Paul Sabatier de Toulouse, soutenue le 6 octobre 1989.

(Baujard 90)

Baujard, O. et Garbay, C.  
**A programming environment for distributed expert system design.**  
 Expert System Applications, ExpertSys., pp. 27-32.

(Carré 87)

Carré, B. et Comyn, G.  
**Etude et spécification d'un Noyau Orienté Objet pour la réalisation d'un outil de développement de Systèmes Experts.**  
 Rapport Technique n° 9 - LIFL - Université de Lille (USTL-Flandres-Artois), 1987.

(Chaib-Draa 90)

Chaib-Draa B.  
**Contribution à la résolution distribuée de problème : une approche basée sur les états intentionnels.**  
 Thèse de docteur es sciences, spécialité Automatique Industrielle et Humaine.  
 Université de Valenciennes et du Hainaut-Chambresis, 1990.

(Chandrasekaran 87)

Chandrasekaran  
**Towards a functional architecture for intelligence based on generic information processing tasks.**  
 Proc. of the 10th IJCAI, pp. 1183-1192. IEEE Computer Society Press, 1987.

- (Charlet 89)  
Charlet J.  
**Acquisition des connaissances et raisonnement dans un système expert de seconde génération.**  
9ièmes Journées Internationales Les Systèmes Experts et Leurs Applications. Conférence Spécialisée Systèmes Experts de Seconde Génération, Avignon, 1989.
- (Chassery 86)  
Chassery J. M. et Bourrel G.  
**An Image Package Software : IPS-design and abilities.**  
8th Int. Conf. Pattern Recog, vol. 2, pp. 913-915, 1986.
- (Durfee 85)  
Durfee E.H., Lesser V.R. et Corkill D.D.  
**Coherent Cooperation Among Communicating Problem Solving.**  
Proc. of the Distributed Artificial Intelligent Workshop, pp. 231-276, dec., 1985.
- (Engelmore 88)  
Engelmore, R. et Morgan, T.  
**Blackboard System.**  
Addison Wesley, 1988.
- (Ferber 88)  
Ferber, J. et Ghallab, M.  
**Problématique des univers multi-agents intelligents.**  
Actes des Journées nationales du PRC-GRECO "Intelligence Artificielle", pp 295-320. Teknea., 1988.
- (Ferber 91)  
Ferber J.  
**Introduction à l'Intelligence Artificielle Distribuée.**  
Dossier : Intelligence Artificielle Distribuée.  
Bulletin de l'AFIA, n°6, pp. 16-19, juillet, 1991.
- (Hautin 86)  
Hautin, F. et Vailly, A.  
**La coopération entre systèmes experts.**  
Actes des Journées nationales du PRC-GRECO "Intelligence Artificielle", Cepadues Editions, 1986.
- (Hayes-Roth 85)  
Hayes-Roth, B.  
**A blackboard model of control.**  
Artificial Intelligence, vol 26, pp. 251-321, 1985.
- (Laurent 84)  
Laurent, J.P.  
**La structure de contrôle dans les systèmes experts.**  
TSI (3):161-177, 1984.
- (Lesser 77)  
Lesser, V.R. et Erman, L.D.  
**A retrospective view of the Hearsay-II architecture.**  
In "Proc of IJCAI-77", pp. 790-800., 1977.
- (Lux 85)  
Lux, A.  
**Algorithmique et Contrôle en Vision par Ordinateur.**  
Thèse de docteur d'état es sciences, ENSIMAG, 1985.
- (Mc Arthur 83)  
Mc Arthur D., Steeb R. et Cammarata S.  
**A framework for Distributed Problem Solving.**

- (Maître 88a) Proc. of the 2nd Nat. Conf. on Artificial Intelligent, Pittesburgh, PA, août, 1982.
- (Maître 88b) Maître B., Lâasri H., Mondot T., Charpillet F. et Haton J.P.  
**Knowledge Source coordination in an Incomplete and Evolutive Universe: Studies and Achievements in ATOME.**  
Research Report CRIN 88-R-39, University of Nancy, 1988.
- (Masini 89) Maître B., Lâasri H. et Haton J.P.  
**A Blackboard-Based Shell for Multi-Level Knowledge Organization.**  
Research Report CRIN 88-R-25, University of Nancy, 1988.
- (Nii 83) Masini, G., Napoli, A., Colnet, D., Léonard, D, et Tombre, K.  
**Les langages à objets.**  
InterEditions, Paris, 1989.
- (Ovalle 89) Nii, H.P., Feigenbaum, E.A., Anton, J.J. et Rockmore A.J.  
**Signal to symbol transformation : HASP/SIAP Case Study.**  
AI Magazine, 3:23-35., 1983
- (Ovalle 91a) Ovalle, A., Pesty, S., Seigneurin, D. et Garbay, C.  
**Développement de Systèmes à Base de Connaissance pour l'Interpretation d'Images Biomédicales.**  
Tutorial : RFIA. Demi-journée de synthèse: Nouvelles perspectives de l'imagerie médicale; microscopie et macroscopie, de l'analyse à l'interprétation. AFCET-INRIA, 1989.
- (Ovalle 91b) Ovalle, A. et Garbay, C.  
**KIDS : A Distributed Expert System for Biomedical Image Interpretation.**  
12th International Conference on IPMI, pp. 419-433.  
Colchester et Hawkes (Eds), Springer-Verlag, Kent, juillet 1991.
- (Ovalle 91c) Ovalle, A. et Garbay, C.  
**Raisonnement et Contrôle en Univers Multi-Agent : Une Application à l'Interprétation d'Images Biomédicales.**  
Actes du congrès AFCET-RFIA., pp. 625-633, Lyon, nov. 1991.
- (Pycock 89) Ovalle, A. & Garbay, C.  
**Reasoning among Visual cues : an approach in Biomedicine.**  
13th. Annual Inter. Conf. IEEE on Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 1319-1320, Orlando, USA, nov. 1991.
- (Shimanoff 84) Pycock, D. et Taylor, C.J.  
**Chromosome classification in a general-pupose frame-based interpretation system.**  
Proceedings of the 5th Alvey Vision Conference, Reading, september 1989.
- (Shimanoff 84) Shimanoff, B.  
**Coordinating Group Interaction via Communications Rules.**  
In Small Group Communications.  
L.A.S.R.S. Catheart, Ed. Dubuque, IA : Brown, 1984.



## **Contribution à l'étude du raisonnement en univers Multi-Agent : KIDS, une application pour l'interprétation d'images biomédicales**

**Résumé :** Parmi les systèmes à base de connaissances fondés sur des techniques d'intelligence artificielle nous nous intéressons plus particulièrement aux systèmes de seconde génération (systèmes à schémas de raisonnement multiples) de type multi-agent. Le paradigme multi-agent est issu des approches de l'intelligence artificielle distribuée et permet de pallier les limitations rencontrées lors de la résolution de problèmes complexes. Le but de ce travail est d'analyser le raisonnement, et plus particulièrement d'aborder son étude en univers multi-agent. Il convient de préciser que celui-ci n'est pas un concept indépendant en lui-même : il est au contraire étroitement lié à d'autres problématiques telles que l'étude et la représentation des connaissances, la spécification des structures de contrôle, des protocoles de communication et d'allocation des tâches ou le degré de sophistication de l'architecture interne des agents.

Pour ce fait deux typologies originales, issues de l'étude approfondie de la connaissance et du raisonnement, seront proposées au long de cette thèse : l'une à caractère formelle l'autre à caractère technologique. La typologie formelle pour la classification des connaissances et du raisonnement permet une vue synthétique d'éléments souvent présentés de façon éparse et s'avère un outil d'assistance à la modélisation des connaissances et des raisonnements. La typologie technologique prend en compte les paramètres régissant les raisonnements propres à la technologie multi-agent non seulement au niveau individuel de l'agent mais aussi ceux développés au sein du groupe d'agents. Ces travaux ont contribué à la conception du système multi-agent KIDS (Knowledge based Image Diagnosis System), système multi-agent dédié à l'interprétation d'images biomédicales. Ce système, par la variété des formes de connaissances et de raisonnement engagés, illustre l'intérêt des typologies formelle et technologique proposées.

**Mots-clé :** Intelligence artificielle distribuée, raisonnement et contrôle, systèmes à base de connaissances, univers multi-agent, modélisation des connaissances et du raisonnement, interprétation d'images biomédicales, communication homme-machine.

**Abstract :** Among knowledge based systems using artificial intelligence techniques we were particularly interested in the multi-agent systems which arise from their second generation (systems using multiple reasoning schemes). The multi-agent paradigm results from distributed artificial intelligence approaches and makes it possible to overcome the drawbacks encountered during the resolution of complex problems. The aim of the work presented here is to analyse the reasoning paradigm, and more particularly to tackle its study in multi-agent environments. It is important to observe that this is not an independent concept in itself : it is on the contrary very close to paradigms such as the study of knowledge representation, specification of control structures, communicating protocol or task allocation, but also specification of the inside architecture of agents.

To achieve this, two original typologies, resulting from the deeper study of knowledge and reasoning, will be proposed into throughout this dissertation : the first typology reflects a formal character while the second reflects a technological character. The formal typology for knowledge and reasoning classification permits a synthetic view of elements which are usually presented in an unstructured way. In addition, this typology provides an assistance tool for supporting the knowledge and reasoning modeling. The technological typology handles the parameters governing the reasonings intrinsic to multi-agent technology, not only at the individual level of the agent but also within a group of agents. This work has contributed to the development of KIDS (Knowledge based Image Diagnosis System), a Multi-Agent system for Biomedical Image Interpretation. Because of the variety of knowledge and reasoning schemes handled, this system illustrates the importance of formal and technological typologies proposed above.

**Key words :** Distributed Artificial Intelligence, Reasoning and Control, Knowledge based Systems, Multi-Agent environments, Knowledge and Reasoning Modeling, Biomedical Image Interpretation, Human-computer interaction.