



HAL
open science

Acquisition des connaissances et raisonnement dans un univers multi-agents : application à la prise de décision en génie civil urbain

Christine Ferraris

► To cite this version:

Christine Ferraris. Acquisition des connaissances et raisonnement dans un univers multi-agents : application à la prise de décision en génie civil urbain. Informatique [cs]. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 1992. Français. NNT : 1992NAN10024 . tel-01747900

HAL Id: tel-01747900

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747900v1>

Submitted on 29 Mar 2018

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

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



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

52/624

Université
de Nancy I

INRIA-Lorraine

Centre de Recherche en
Informatique de Nancy

UFR S.T.M.I.A.

GFD Informatique

SEN 92 /
24 A

Acquisition des connaissances et raisonnement dans un univers multi-agents : application à la prise de décision en génie civil urbain.

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 7 Février 1992

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Nancy I
(Spécialité Informatique)

par

Christine FERRARIS



Composition du jury :

Président : Jean-Paul HATON

Rapporteurs : Jacqueline AYEL
Jean-Pierre LAURENT
Pierre MARCHAND

Examineurs : Marie-Christine HATON
Thomas CHEHIRE
Jean-Jacques DAVAINÉ

Acquisition des connaissances et raisonnement dans un univers multi-agents : application à la prise de décision en génie civil urbain.

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 7 Février 1992

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Nancy I

(Spécialité Informatique)

par

Christine FERRARIS



Composition du jury :

Président : Jean-Paul HATON

Rapporteurs : Jacqueline AYEL
Jean-Pierre LAURENT
Pierre MARCHAND

Examineurs : Marie-Christine HATON
Thomas CHEHIRE
Jean-Jacques DAVAINÉ

Résumé

Le raisonnement humain comporte un aspect à la fois mystérieux et passionnant. Il n'est ainsi pas étonnant que de nombreuses études soient menées dans le but de tenter de le reproduire sur des machines. C'est un des buts des recherches en intelligence artificielle (IA), avec notamment la construction de systèmes experts. Lorsque le raisonnement à modéliser fait appel à diverses compétences, on parle alors de *multi-expertise*. De tels raisonnements peuvent être modélisés par des *systèmes multi-agents*. C'est dans le cadre de ces systèmes que s'inscrit cette thèse. Elle explore les domaines de l'acquisition des connaissances, de leur représentation, de la modélisation et de l'exploitation des raisonnements experts dans les systèmes multi-agents. Les idées, propositions et réalisations qui y sont développées sont issues des difficultés que nous avons rencontrées en traitant le cas particulier d'un système expert en maintenance de voirie urbaine : le système ROSY (ROAD SYSTEM). Ce système sert donc à illustrer nos propositions tout au long de cette thèse.

Après avoir introduit le domaine multi-agents en IA et présenté succinctement le générateur ATOME, avec lequel ROSY est développé, nous décrivons le système multi-experts en lui-même. Ce système est développé en collaboration avec la mairie de Nancy et est dédié à l'aide à la décision en maintenance de voirie urbaine.

Cette modélisation est issue de l'analyse de la démarche experte et de l'acquisition des connaissances nécessaires au raisonnement expert. Nous consacrons une partie à l'étude de l'acquisition de connaissances expertes, tout d'abord dans un cadre général, en énonçant les outils et méthodes actuellement proposés, puis en nous attachant au cas particulier de la voirie urbaine. Nous présentons alors les diverses techniques et méthodes que nous avons utilisées, en dégageons les intérêts et concluons, de façon générale, sur les enseignements que nous avons pu tirer de notre expérience. Nous insistons tout d'abord sur la boucle "acquisition - structuration de l'architecture d'un système expert". Puis nous proposons une démarche pour l'acquisition des connaissances dans un univers multi-agents, fondée sur la notion de *constructeurs*.

La nature des connaissances et du raisonnement à mettre en œuvre dans ROSY nous conduit ensuite à aborder les problèmes de la représentation de ces connaissances. Cela fait l'objet des quatrième et cinquième parties. La quatrième partie s'intéresse aux différents types de données qu'il nous a fallu modéliser. Les données visuelles y sont notamment abordées. Nous traitons également d'une forme particulière de représentation de la connaissance experte : la règle graduelle. Nous présentons les solutions adoptées pour modéliser ces connaissances et envisageons des évolutions futures sur les représentations choisies. La cinquième traite de la modélisation du raisonnement. Nous y présentons les modifications apportées au système générique ATOME. Ses possibilités de représentation des raisonnements experts n'étant pas suffisantes à prendre en compte toute la richesse d'un raisonnement expert humain, nous les avons augmentées en dotant les sources de connaissances du domaine (les spécialistes) de capacités à raisonner sur leurs propres connaissances, à les réorganiser et les manipuler à bon escient. De même, nous envisageons de réviser le raisonnement des tâches, sources de connaissance de contrôle, en agissant sur la structure qui leur est associée. Il s'agit alors de repenser les concepts d'événements et de liste d'événements et de permettre à la tâche de gérer explicitement cette structure.

Les propositions émises dans ces deux parties ne se limitent pas aux systèmes ROSY et ATOME. Elles peuvent être généralisées à tout système multi-agents, voire à tout système expert, dans le domaine de l'aide à la décision.

Nous tirons alors les conclusions de ce travail dans les différents domaines que nous avons abordés et présentons ce que pourrait être la suite de ce travail.

Remerciements

Je tiens ici à remercier :

- M. Jean-Paul Haton, Professeur à l'Université de Nancy I, qui m'a chaleureusement accueillie dans son équipe au CRIN et me fait l'honneur de présider le jury de cette thèse. Je lui dois le sujet passionnant sur lequel j'ai travaillé et lui suis reconnaissante de m'avoir guidée au cours de mon travail de thèse ;
- Mme Jacqueline Ayel et M. Jean-Pierre Laurent, Maître de Conférences et Professeur à l'Université de Savoie, qui ont accepté avec sympathie la lourde tâche de juger ce travail. Leurs remarques, à l'issue de leur rapport, et mes discussions antérieures avec Mme Ayel eurent des répercussions positives sur la rédaction de ce manuscrit ;
- M. Pierre Marchand, Professeur à l'Université de Nancy I, pour qui j'ai une tendresse toute particulière. Il a bien voulu faire un rapport sur les quelques trois cents pages que comporte ce manuscrit, bien qu'il n'y trouvât pas les formules mathématiques qui lui sont si chères ;
- Mme Marie-Christine Haton, Professeur à l'Université de Nancy I, qui fut une directrice de thèse merveilleuse. Elle fut toujours prête à me fournir l'aide psychologique et scientifique nécessaire à tout chercheur dans les phases de doute et d'incertitude qu'il peut traverser, phases qui caractérisent cette profession. Sans elle, cette thèse ne serait probablement pas ce qu'elle est ;
- M. Thomas Chéhiré, ingénieur à Thomson-CSF, qui a accepté avec empressement de participer au jury de cette thèse et dont les remarques, à l'issue de la soutenance, ont contribué à enrichir ce manuscrit ;
- M. Jean-Jacques Davaine, ingénieur en chef à la mairie de Nancy, qui est à l'origine du projet ROSY. Il a participé avec entrain aux rencontres initiales entre cognitivistes et experts, ce qui nous a permis de démarrer le projet sur des bases solides. Il en a, par la suite, assuré un suivi régulier et me fait aujourd'hui l'honneur de faire partie du jury de cette thèse ;
- M. Philippe Cuchet, ingénieur responsable du service voirie à la mairie de Nancy, qui est la source de l'expertise rassemblée dans le système ROSY. Il a participé avec enthousiasme et motivation à la construction de ce système. Il a également

contribué, par sa bonne humeur et sa sympathie, à rendre ce travail fort agréable et à entretenir ma propre motivation. A lui aussi, je dois beaucoup ;

- M. Georges Cornu, ingénieur à la mairie de Nancy, qui a parfois secondé M. Cuchet dans sa tâche d'expert, apportant ainsi une vision moins experte du problème et tout aussi enrichissante.

Je ne saurais oublier tous ceux que je croise tous les jours dans les couloirs du CRIN, qui sont devenus mes amis et en qui j'ai trouvé des interlocuteurs privilégiés :

- les personnes du groupe ATOME avec qui j'ai plus particulièrement travaillé : Vincent et Frédéric, avec qui le nouveau moteur de ATOME fut réalisé, Hassan et Brigitte, les "créateurs" de ATOME, Anne-Claire, Narjes, Philippe, François et Jean-Christophe ;
- Marie-Pierre, qui travaille elle-aussi dans le vaste domaine de l'acquisition des connaissances. Il m'est impossible de compter le nombre d'heures que nous avons passé à discuter ensemble sur le sujet. Par ses remarques fort pertinentes, elle a contribué à approfondir, voire rectifier, ma vision du processus d'acquisition. La version finale de ce manuscrit lui doit beaucoup ainsi que les recherches futures que j'entreprendrai dans ce domaine ;
- Catherine et Anne-Claire, bien sûr, qui ont partagé mon bureau pendant ces trois années, mes humeurs et mes états d'âme sur le métier d'enseignant-chercheur. Et tous les autres, chercheurs, enseignants-chercheurs, personnels administratifs ou personnels de service.

Tous contribuent, par leur sympathie, à rendre agréable mon travail de recherche et ma présence au CRIN.

Enfin, j'adresse un grand merci pour leurs encouragements et leur présence à mes côtés à ceux à qui je dédie cette thèse : mes parents, mes sœurs Monique et Annie, mon frère Michel et bien sûr Bruno.

Table des matières

Introduction générale	9
I Introduction aux systèmes multi-agents	13
1 I.A. et systèmes multi-agents	17
1.1 Rappels sur les buts de l'Intelligence Artificielle	17
1.2 Les systèmes multi-agents	17
1.2.1 Définition des systèmes multi-agents	17
1.2.2 Les différentes formes de communications	19
1.2.3 Les différentes formes de contrôle	20
2 Le cas particulier des modèles à base de blackboards	23
2.1 Le paradigme du tableau noir	23
2.2 Les composants de base	25
2.3 Les mécanismes de contrôle	26
3 Présentation de ATOME	31
3.1 Architecture de ATOME	31
3.2 Fonctionnement	32
II Le système expert ROSY	35
1 Motivations qui ont conduit au système expert ROSY	39
1.1 L'originalité de la voirie urbaine	39
1.2 Rationaliser une décision	40
1.2.1 Enjeux financiers	40
1.2.2 Enjeux techniques	41
1.3 Des arguments pour une approche "Système Expert"	41

2	Le travail de l'expert en voirie urbaine à Nancy	45
2.1	But de son travail	45
2.2	La démarche de l'expert	46
2.2.1	Examen visuel et diagnostic	46
2.2.2	Choix du mode de réfection	49
	a - Les critères physiques	49
	b - Quelques critères stratégiques	51
	c - Un exemple de choix de mode de réfection	51
2.2.3	Choix des chaussées à refaire	52
	a - Les priorités définies par la ville	53
	b - Autres critères stratégiques	54
	c - Les critères financiers	54
2.2.4	Choix techniques	55
	a - Les meilleurs au sens des objectifs de la ville	55
	b - Les meilleurs pour le site d'utilisation	55
	c - Les meilleurs, aux sens du rapport qualité-prix	56
	d - Limitation des choix en matériaux	56
2.3	Ce que nous n'avons pas dit et qui complique tout	57
3	Le système expert ROSY	59
3.1	Les blackboards de l'application	60
3.1.1	Le blackboard RUE	60
3.1.2	Le blackboard DÉGRADATIONS	63
3.2	Présentation de l'architecture du système	68
3.2.1	Le système dans son ensemble	68
3.2.2	La tâche <i>Diagnostic</i>	69
	a - Rôle des différentes spécialistes	70
	b - Fonctionnement de la tâche	77
4	Le système vu a posteriori	79
4.1	Le point sur le système ROSY et développements futurs	79
4.1.1	La situation actuelle	79
4.1.2	La validation du système	81
4.1.3	Les évolutions futures	82
	a - Poursuite du développement du SE	82
	b - Réalisations autour du SE	83
4.2	Intérêt d'un tel travail	85

III Acquisition des connaissances et systèmes multi-agents 87

1	Acquisition des connaissances	91
1.1	La problématique de l'acquisition des connaissances	91
1.1.1	Difficulté de par la nature même de la tâche	91
1.1.2	La nature et le type des connaissances	92
1.1.3	Le paradoxe de l'acquisition des connaissances	93
1.1.4	La réticence de l'expert	94
1.1.5	Distorsions des connaissances expertes	94
1.2	Techniques, méthodes et outils proposés	96
1.2.1	Techniques manuelles	96
1.2.2	Techniques et méthodes informatisées	97
	a - Les méthodes	98
	b - Les outils	101
2	L'expérience de la voirie urbaine	105
2.1	Les difficultés liées au problème de la voirie urbaine	105
2.1.1	Une expertise visuelle	105
2.1.2	Les préoccupations de l'expert	106
2.1.3	Un expert plus "pratique" que "théorique"	106
2.2	L'étape de familiarisation	107
2.2.1	La familiarisation du cogniticien avec le domaine de l'expertise .	108
	a - La familiarisation dans le projet ROSY	108
	b - Les enseignements à en tirer	108
2.2.2	La motivation de l'expert	109
2.2.3	L'association "cogniticien - expert"	110
2.3	Notre façon de procéder	110
2.3.1	Le déroulement et l'exploitation des rencontres avec l'expert . .	111
2.3.2	Les techniques et méthodes utilisées	113
	a - Visites et verbalisations	113
	b - Questionnaires et jeux-tests	115
	c - L'observation de photographies	121
	d - Entretiens ciblés et entretiens de validation	122
2.3.3	Récapitulatif des techniques et méthodes utilisées	126
2.4	Les conclusions que nous avons tirées	126
2.4.1	Une ligne de conduite générale pour le cogniticien	126
	a - Proposer	128

b - Valider	128
2.4.2 Les tentatives infructueuses : analyse et leçons	129
a - Planifier le processus d'acquisition	129
b - Des connaissances qui viennent de l'expert	129
2.4.3 Raisonner sur des cas particuliers	131
2.4.4 Des techniques d'acquisition adaptées à l'expert	132
2.4.5 Impressions du cogniticien face au problème d'acquisition des connaissances	133
3 Un processus d'acquisition des connaissances dans le cadre des sys- tèmes multi-experts	135
3.1 La boucle acquisition - SME multi-niveaux	135
3.1.1 De l'acquisition des connaissances vers ATOME	136
a - Les composantes "multi-experts" et "blackboard"	136
b - La composante "multi-niveaux"	136
3.1.2 Architecture multi-experts multi-niveaux : guide pour l'acqui- sition des connaissances	137
3.1.3 Un processus itératif	139
3.2 Une méthode de développement de SME fondée sur cette boucle	142
3.2.1 Les constructeurs de base	142
a - Le constructeur descendant	142
b - Le constructeur ascendant	143
3.2.2 Principe de la méthode	144
a - Définition des sources de connaissances	144
b - Construction des blackboards	145
c - Interaction entre les deux processus : la démarche dans son ensemble	147
3.2.3 L'exemple du SE ROSY : amélioration de la méthode	147
3.3 Le modèle de l'expertise au travers de la méthode	150
3.3.1 Modèle de l'expertise vs modèle informatique	151
3.3.2 Vers une intégration explicite du modèle de l'expertise	152
3.4 Conclusions	152
4 Conclusion	157
IV Le problème des connaissances à traiter	159
1 Le problème des données visuelles	163
1.1 Représentation de données visuelles	163

1.1.1	Un compromis entre quantité et représentativité	163
1.1.2	Les représentations successives des dégradations	164
	a - Un unique représentant par dégradation	164
	b - Un représentant par pas de dix mètres et fusion systématique	164
	c - Les blocs homogènes de dégradations	165
	d - La représentation actuelle	165
1.1.3	Des données de différents niveaux	165
1.2	Hiéarchisation et point de vue	167
1.2.1	Modes de représentation à mettre en place	167
1.2.2	Simulation de ces modes dans ROSY	168
1.2.3	Intégration de ces modes dans les blackboards	170
	a - Modélisation des hiérarchies	170
	b - Traduction et héritage	171
	c - Vers des blackboards d'objets	172
1.2.4	De nouvelles possibilités : raisonner à profondeur variable	173
2	Les connaissances graduelles	175
2.1	Les connaissances graduelles en voirie urbaine	175
2.1.1	Quelques exemples	175
2.1.2	Caractéristiques principales	177
2.1.3	Les intérêts de ces connaissances	179
2.2	Représentation des connaissances graduelles	179
2.2.1	Quelques approches	179
2.2.2	Les connaissances graduelles dans ATOME	182
3	Conclusion	187

V Modélisation du raisonnement et répercussions sur ATOME

189

1	ATOME en détail	193
1.1	Les spécialistes	193
1.1.1	Caractéristiques d'une spécialiste	194
1.1.2	Activation d'une spécialiste	194
1.1.3	Les actions d'une spécialiste	195
1.2	Les tâches et leur structure de contrôle : la liste d'événements	196
1.2.1	Caractéristiques d'une tâche	197
1.2.2	Fonctionnement d'une tâche	198

a - Le raisonnement opportuniste	198
b - Le raisonnement dirigé par les règles	200
c - Le raisonnement dirigé par les événements	200
1.2.3 La structure de contrôle associée	202
1.3 La stratégie et ses résumés des blackboards	202
1.3.1 Caractéristiques d'une stratégie	203
1.3.2 Structures de contrôle associées	204
1.3.3 Fonctionnement d'une stratégie	204
2 Le raisonnement des spécialistes	205
2.1 Les problèmes rencontrés lors de la conception du système ROSY	205
2.1.1 Structuration et manipulation des connaissances	206
2.1.2 Notion de focus	208
2.1.3 Un fonctionnement différent en fonction du focus	208
2.2 Ce qu'il faut	209
2.2.1 Nouvelles fonctionnalités nécessaires	209
2.2.2 Autres solutions envisagées mais rejetées	211
2.3 Les solutions proposées par d'autres systèmes	212
2.4 Ce que nous proposons	215
2.4.1 Structuration des connaissances en ensembles de règles	216
a - Structuration avant l'activation d'une spécialiste	216
b - Structuration au cours de l'exécution	216
c - La notion d'ensemble de règles	217
2.4.2 Gestion des connaissances et du raisonnement par méta-opérations	219
a - Description des différentes méta-opérations	220
b - Portée des modifications dues aux méta-opérations	223
2.4.3 Le mécanisme d'inférence du nouveau moteur	224
a - Fonctionnement d'un moteur d'ordre 1 classique	224
b - Les paramètres du nouveau moteur	224
c - Fonctionnement du moteur	228
d - La résolution de conflit	230
e - Exemple : définition d'un mode de fonctionnement particulier	230
f - On pense à l'utilisateur !	232
2.4.4 L'ensemble des règles utilisables : charnière entre structuration des connaissances et modes de fonctionnement	233
a - Notion d'environnement	233
b - Mise à jour dans un environnement	235
c - Mise à jour d'un environnement à un autre	235

2.4.5	Nouvelle structure d'une spécialiste	240
2.4.6	Incidence des aménagements de ATOME sur la méthode d'acquisition des connaissances	242
2.4.7	Conclusions	243
3	Réflexions sur le raisonnement d'une source de connaissances de contrôle	245
3.1	Le manque d'expressivité des événements	246
3.1.1	Un manque par rapport à la nature même des événements . . .	246
3.1.2	Un manque dans les échanges des spécialistes vers la tâche . . .	247
3.2	Une communication "SC de contrôle - SCs contrôlées" plus explicite . .	248
3.2.1	Actions sur les structures existantes	248
3.2.2	Définitions de nouvelles structures	250
	a - Plaidoyer pour une unique structure de contrôle	250
	b - Un blackboard de contrôle	251
	c - Création et propagation des noeuds-événements.	253
	d - Vers une structure d'événement-objet	254
3.3	Une gestion explicite de la liste des événements	255
3.3.1	Importance de l'ordre des événements	255
3.3.2	Le choix de l'ordre des événements	256
3.3.3	Une gestion dynamique de la liste des événements	257
3.4	Impacts sur les différents acteurs du raisonnement local	259
3.4.1	Sur les spécialistes...	259
	a - Associer une condition d'arrêt à une spécialiste	260
	b - Arrêt du raisonnement en cas de manque d'infos	263
3.4.2	Sur les tâches...	264
3.5	Conclusion	265
4	Conclusion	267
	Conclusion générale	271
	Bibliographie	275
	Annexes	287
A	Les blackboards de l'application	289
A.1	Le blackboard Rue	289

A.1.1	Le niveau tronçon	289
A.1.2	Le niveau Chaussée	289
A.1.3	Le niveau Structure	290
A.1.4	Le niveau Trafic	291
A.1.5	Le niveau Etat_Actuel	291
A.1.6	Le niveau Réseau	292
A.1.7	Le niveau Fouilles_et_interventions	292
A.1.8	Le niveau Aménagements_Programmés	292
A.2	Le blackboard Dégradations	293
A.2.1	Le niveau Concept_Dégradation	293
A.2.2	Le niveau Cause	293
A.2.3	Le niveau Dégradations_sur_tronçon	293
A.2.4	Le niveau Dégradations_sur_10_mètres	293
B	Description des dégradations et des causes utilisées dans le SE Rosy	295
B.1	Les dégradations	295
B.2	Les causes	298
B.3	Importance des dégradations pour les différents critères	303

Introduction générale

Le travail que nous avons entrepris au cours de ces trois années de thèse se situe sur le plan de la modélisation des connaissances et des raisonnements experts en intelligence artificielle. Il trouve son application dans la construction d'un système expert d'aide à la décision en maintenance de voirie urbaine. Le raisonnement mené dans ce domaine, ainsi que le type des données manipulées, paraissent en effet prometteurs quant aux possibilités de recherche sur lesquelles cela pouvait déboucher.

Cette volonté de construire un tel système nous a, dans un premier temps, conduite à analyser le domaine d'application. Nous avons alors été confrontée aux divers problèmes qu'il est possible de rencontrer dans pareil cas (acquisition des connaissances, représentation de ces connaissances, choix d'une architecture logicielle adaptée au problème à modéliser, ...). Il s'agissait alors de résoudre ces problèmes de modélisation. Une nette composante multi-agents se dégageant du domaine de la voirie urbaine, et un penchant personnel pour les sciences humaines nous ont poussés à orienter nos recherches vers l'acquisition des connaissances dans un environnement de multi-expertise. L'aspect modélisation de raisonnements multi-experts nous a également séduite et nous l'avons traité dans le cadre des architectures fondées sur le modèle du blackboard. De même, nous nous sommes intéressée à la façon de représenter les données particulières (principalement visuelles et graduelles) que comporte le domaine de l'expertise, que l'on retrouve également dans d'autres domaines. Les réflexions menées dans ces différentes voies nous ont alors permis de dégager les idées, propositions et réalisations qui font l'objet de cette thèse, conjointement au développement de la partie "diagnostic" du système expert ROSY (ROad SYstem).

Ce document, dont l'organisation est conforme à la démarche que nous avons suivie dans ce travail de thèse et qui est retracée ci-dessus, comprend cinq parties principales. La première introduit le lecteur dans le domaine multi-agents et présente succinctement le générateur de systèmes multi-agents ATOME, fondé sur le modèle du blackboard. C'est en effet à l'aide de ce générateur que le système ROSY a été développé et ce sont ses fonctionnalités qui ont été améliorées (cf. partie V). La seconde partie présente le système multi-experts ROSY que nous avons développé en collaboration avec le service Voirie de la mairie de Nancy et qui est dédié à l'aide à la décision en maintenance de voirie urbaine. Nous présentons tout d'abord les motivations qui ont conduit au développement d'un tel système. Puis nous décrivons le raisonnement et la démarche de l'expert et voyons comment nous les avons modélisés dans le cadre du générateur

de système multi-agents ATOME. Les blackboards de l'application et les sources de connaissances que nous avons pu définir jusqu'à présent sont alors présentés.

Cette modélisation est issue de l'analyse de la démarche experte en voirie urbaine et de l'acquisition des connaissances nécessaires au raisonnement expert. Nous consacrons donc la troisième partie à l'étude de l'acquisition de connaissances expertes, tout d'abord dans un cadre général, puis en nous limitant à celle que nous avons entreprise. Nous présentons alors les diverses techniques et méthodes que nous avons utilisées, en dégagons leur intérêt, et concluons sur les enseignements que nous avons pu tirer de notre expérience : avantages de la démarche que nous avons suivie mais aussi erreurs que nous avons commises.

Une "auto-observation" *a posteriori* de notre façon de procéder nous a permis, dans un premier temps, de découvrir une démarche systématique d'acquisition des connaissances. Cette démarche a par la suite été améliorée par le recul que nous avons pu prendre par rapport à cette expérience et par l'analyse de nos erreurs. Nous avons ainsi abouti à la définition d'une méthode d'acquisition des connaissances liée à une architecture multi-agents, utilisant la notion de *constructeurs*.

Les quatrième et cinquième parties posent les nombreux problèmes de modélisation des connaissances et du raisonnement que nous avons rencontrés tout au long du développement du SE ROSY. Des propositions y sont émises de manière à résoudre ces problèmes. Certaines ont été réalisées, d'autres sont encore sous la forme d'idées plus ou moins avancées. Les problèmes évoqués ne sont pas propres au système ROSY mais peuvent être rencontrés dans la conception de tout système expert ou multi-experts. Les solutions proposées sont donc générales et pas seulement adaptées au cas particulier de l'expertise en voirie urbaine :

- la quatrième partie s'intéresse plus particulièrement aux différents types de données qu'il nous a fallu modéliser. Les *données visuelles* y sont notamment abordées. Nous traitons également d'une forme particulière de représentation de la connaissance experte : la *règle graduelle*¹. Nous avons en effet pu constater une utilisation assez importante de ce type de règles par l'expert du domaine. Nous voyons comment elles ont été représentées, en utilisant un formalisme classique de règle de production, et ce qu'il est envisageable de faire de manière à ce qu'elles soient directement utilisables au cours du raisonnement ;
- la cinquième partie traite, pour sa part, de la modélisation du raisonnement. Les possibilités de représentation des raisonnements experts dans ATOME, bien que déjà fort développées du fait du caractère hybride du modèle, ne sont cependant toujours pas suffisantes pour qu'il soit possible de prendre en compte toute la richesse d'un raisonnement expert humain. Aussi avons-nous été amenés à augmenter ces capacités en agissant tout d'abord sur les *spécialistes*, agents raisonnant sur les connaissances du domaine dans ATOME. Nous avons fourni à ces dernières les moyens de *manipuler* et d'*utiliser* leurs connaissances comme elles l'entendent, de façon à pouvoir procéder au mieux dans le raisonnement

1. Il s'agit de règles de type "Plus (ou moins) X est A, plus (ou moins) Y est B".

qu'elles tiennent. La solution que nous proposons est fondée sur une haute paramétrisation du potentiel de représentation et d'utilisation de la connaissance. Cela garantit une certaine longévité aux extensions apportées : celles-ci ne sont en effet pas figées et donc pas limitées aux types de raisonnement pour lesquels elles ont été définies. Nous pouvons donc penser qu'elles ne seront pas "dépassées" à court terme, qu'il n'y aura pas besoin de leur adjoindre d'autres capacités du fait de leur insuffisance, à court terme toujours, à assurer la modélisation des raisonnements experts.

Nous avons envisagé également de réviser le raisonnement des agents de ATOME chargés de gérer les interventions des spécialistes, c'est-à-dire du contrôle du raisonnement à un premier niveau de décision et d'abstraction : les *tâches*. Il s'agit principalement d'intervenir sur les structures de contrôle qui leur sont associées (les *liste d'événements*) en repensant ces structures et leurs éléments de base (les *événements*) de manière à permettre aux tâches de les gérer explicitement. La révision que nous proposons ici nous semble transposable à l'agent de contrôle coordonnant les travaux des tâches elles-mêmes et placé au plus haut niveau dans la hiérarchie des agents de ATOME : la *stratégie*.

Les cinq parties étant décrites, nous tirerons les conclusions de nos travaux dans les différents domaines abordés et nous présenterons ce que pourrait être la suite de ce travail. Cela fera l'objet de la toute dernière partie.

PARTIE I

Introduction aux systèmes multi-agents

Cette partie plonge le lecteur dans le domaine multi-agents. Nous y faisons tout d'abord quelques rappels sur les objectifs visés par l'intelligence artificielle. Nous décrivons ensuite le principe d'un univers multi-agents avant de présenter diverses façons d'entreprendre les deux mécanismes sur lesquels il est fondé : la communication entre les agents et la coordination du raisonnement de ces agents. Nous passons ensuite à un univers multi-agents particulier, le modèle du blackboard, dans lequel la communication se fait *via* une zone commune d'échange d'informations appelée *blackboard*. Nous rappelons le paradigme qui a donné naissance à un tel modèle, en présentons les composants de base et voyons comment le problème de la gestion de la coordination entre agents y est résolu. Enfin, nous centrons notre discours sur le générateur de systèmes multi-agents ATOME, avec lequel nous avons développé le système expert ROSY (cf. partie II) et dont nous avons amélioré les fonctionnalités (cf. partie V).

1

I.A. et systèmes multi-agents

1.1 Rappels sur les buts de l'Intelligence Artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est une discipline de l'informatique qui a pour but de modéliser des aptitudes humaines dites intelligentes (raisonnement, compréhension de la parole, vision, . . .) de manière à ce qu'un ordinateur puisse reproduire ces aptitudes [Haton JP et Haton MC 89]. Une des branches de l'IA concerne la modélisation de raisonnements dits *experts* [Haton *et al.* 91]. Il s'agit de raisonnements tenus par des personnes hautement qualifiées dans un domaine donné, qui y ont acquis un *savoir-faire*. Ce savoir-faire est inédit et précieux. Il émane en effet d'une longue expérience et d'une longue pratique dans le domaine et a été construit de toutes pièces par l'expert lui-même, autour des connaissances théoriques qui lui ont été enseignées. L'expert a ainsi adapté la théorie en définissant des heuristiques et des raccourcis de raisonnement destinés à son usage personnel, qui lui permettent de faire face aisément à tout cas qu'il rencontre.

La modélisation de ces connaissances et donc du raisonnement expert se fait dans le but de développer des *systèmes experts* (SE) ou *systèmes à bases de connaissances* ([Farreny et Ghallab 87], [Laurière 82a] et [Laurière 82b]). Ces systèmes tentent de reproduire au mieux le raisonnement expert. Ils posent les problèmes de l'acquisition des connaissances expertes, de leur représentation, de leur structuration et organisation dans une architecture logicielle et, enfin, celui de la validation du système obtenu. C'est dans le cadre de ces systèmes que se place cette thèse et plus particulièrement dans le domaine *multi-agents*.

1.2 Les systèmes multi-agents

1.2.1 Définition des systèmes multi-agents

Lorsque le raisonnement expert peut-être divisé en plusieurs compétences, on parle alors de *multi-expertise*. Cela peut être modélisé par plusieurs *agents* qui vont œuvrer

à la résolution d'un problème commun. Nous entrons alors dans le domaine des univers multi-agents ([Erceau et Ferber 91], [Haton 89]).

Le principe de ces univers consiste, dans un premier temps, à répartir et partager l'ensemble de la connaissance entre plusieurs agents intelligents, chaque agent se chargeant alors d'une des compétences dont nous avons parlé ci-dessus. Un agent regroupe ainsi la connaissance disponible dans un des domaines de compétence et utilise cette connaissance dans un raisonnement qui reproduit le raisonnement expert limité à cette compétence, résolvant ainsi une partie du problème initial. Il devient alors spécialisé dans ce sous-domaine. Il peut donc être qualifié d'*entité physique ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions des autres agents* [Ferber et Ghallab 88].

Dans un second temps, il s'agit de faire *communiquer* ces agents de manière à ce qu'ils collaborent à la construction d'une solution commune au problème initial. Chaque agent est en effet à même, de par l'expertise qu'il renferme, de contribuer à la résolution du problème. Chacun va donc participer en apportant ses propres conclusions, en demandant des informations aux autres ou en répondant aux requêtes émises par les autres. Un échange d'informations entre les différents agents est donc indispensable à un bon fonctionnement du processus de résolution. Il faut donc se pencher sur le problème de la communication entre ces agents.

De même, la gestion de leurs interactions est à étudier. Chaque agent est en effet susceptible d'intervenir à tout moment dans le processus de résolution. Cela peut par exemple aboutir à des situations où deux agents vont être en concurrence à un moment donné de la résolution. Le raisonnement d'un agent peut alors se révéler plus pertinent que celui d'un autre. Il est donc nécessaire d'organiser, de planifier et de gérer les interventions de manière à obtenir une efficacité maximale dans le processus de résolution d'une part, à parvenir à une solution d'autre part (une mauvaise coordination des agents pourrait en effet conduire à une impasse dans le processus de résolution).

Les univers multi-agents posent donc les problèmes [Gleizes *et al.* 90] :

- du type de contrôle à instaurer,
- de la description, décomposition et distribution des problèmes ou des faits ainsi que ceux de la synthèse et de la cohérence des résultats obtenus par les différents agents,
- de la mise en œuvre de la communication et des interactions entre agents.

pour lesquels de nombreuses recherches sont entreprises (voir [AFIA 91] pour un panorama des recherches en France dans le domaine de l'IA distribuée).

Ce qui suit présente les aspects communication et contrôle des systèmes multi-agents avant de montrer ce que les systèmes à base de blackboards, cas particulier de systèmes multi-agents, proposent pour tenter de résoudre les problèmes évoqués.

1.2.2 Les différentes formes de communications

Les agents peuvent communiquer en partageant des informations ou en se transmettant informations par le biais de messages :

- communication par partage d'informations.

La communication entre les différents agents du système est réalisée par partage d'informations lorsque ceux-ci disposent d'une zone de données commune dans laquelle ils rangent les conclusions qu'ils ont pu tirer (cf. figure 1.1). Outre ces résultats partiels, cette zone renferme les données du problème initial. Les agents peuvent ainsi y puiser les informations dont ils ont besoin pour résoudre une partie du problème global.

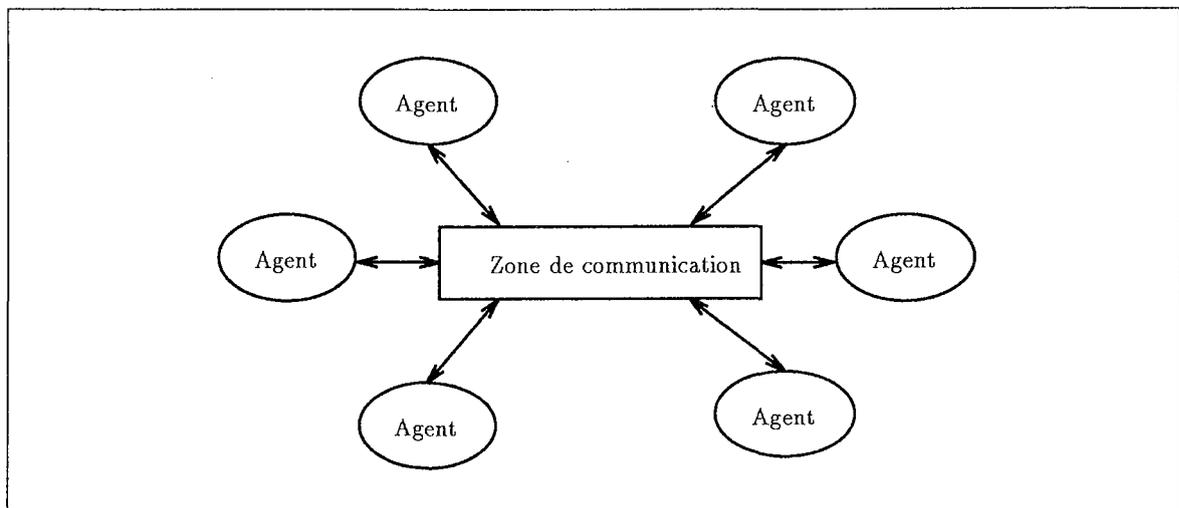


Figure 1.1. Communication entre agents par partage d'informations.

Cette zone est le seul moyen d'échange d'informations entre les agents. Ils la consultent pour se faire une idée de l'état d'avancement de la construction de la solution et voir ainsi si la situation leur est favorable, si leur raisonnement est opportun ou pas. Les agents n'ont alors pas besoin de se connaître mutuellement.

Ce type de communication correspond à ce que la littérature désigne communément sous le nom de *modèle du blackboard*, le blackboard correspondant à la zone de données commune ;

- communication par envoi de messages.

Une autre organisation possible des agents peut consister à ce que chacun ait sa propre base de faits locale, où ses propres résultats, représentant une partie de la solution courante au problème global, sont stockés. Un agent peut alors, lorsqu'il le juge utile, entrer en communication directe avec un autre agent en lui transmettant de l'information *via* des messages, de la même façon que des échanges postaux peuvent se faire (cf. figure 1.2). Ces messages peuvent comporter des demandes de renseignements ou encore fournir, spontanément ou suite à une demande antérieure, des informations : il y a échange des résultats partiels.

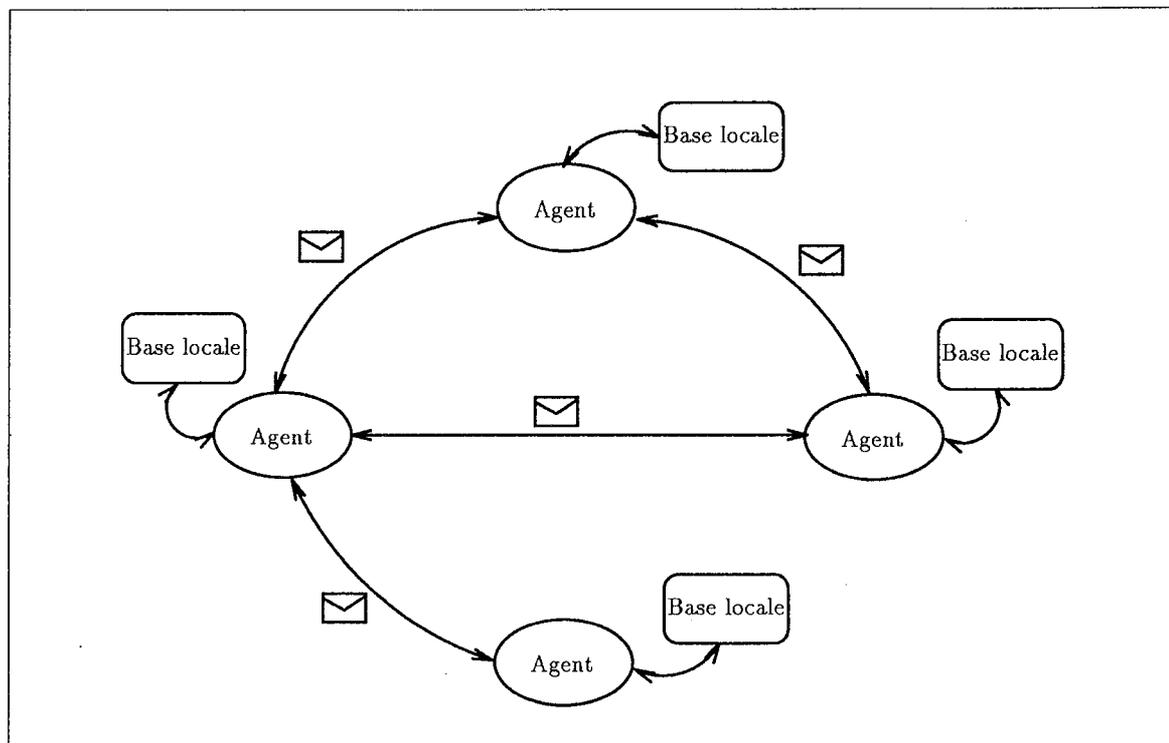


Figure 1.2. Communication entre agents par envoi de messages.

Ce type de communication suppose l'utilisation d'un protocole pour réaliser les échanges. Il est utilisé dans les modèles *d'acteurs* [Ferber 87] ou de *société de spécialistes* [Gong 87].

1.2.3 Les différentes formes de contrôle

Nous avons mentionné ci-dessus l'importance du contrôle dans les systèmes multi-agents. Celui-ci agit en effet sur la façon dont les divers agents vont enchaîner leurs raisonnements. Il gère et conditionne ainsi le processus global de résolution, donc la construction de la solution. Différents types de contrôle sont envisageables. Il peut être assuré par :

- un système d'IA unique qui gère l'ensemble de tous les agents. Ce système doit alors connaître les compétences de chaque agent de façon à être capable de choisir, à tout instant lors du processus de résolution, celui qui est le plus à même de faire progresser la recherche de la solution ;
- plusieurs systèmes d'IA, pouvant eux-mêmes être des agents. Le rôle de chacun d'eux peut, par exemple, consister à gérer un sous-ensemble d'agents. Cela revient à décentraliser partiellement le type de contrôle décrit ci-dessus (le contrôle est à la fois centralisé au niveau de chaque système d'IA et décentralisé dans plusieurs systèmes) ;

- un programme classique et figé, de type gestion des ressources d'un système. Les agents ont alors chacun une priorité indépendante du processus de résolution. En cela, ce mode de contrôle est assez rigide et n'est adapté qu'à des situations où un ordonnancement des divers agents peut être identifié *a priori* ;
- négociations entre les agents [Lâasri *et al.* 91]. Le contrôle est alors distribué entre les divers agents qui choisissent, en se concertant et en "discutant", le prochain agent qui raisonnera.

Des combinaisons entre ces types de contrôle sont également possibles. C'est par exemple le cas dans [Ayel et Laurent 91] où un contrôle par négociation entre plusieurs agents (les *unit-controllers*, chargés de la coopération d'un groupe d'activité) est combiné à un contrôle hiérarchique au sein de chaque groupe d'activité (le contrôle est centralisé au niveau du *unit-controller* du groupe). L'ensemble des *unit-controllers* forment alors un système complet dans lequel le contrôle est du second type.

2

Le cas particulier des modèles à base de blackboards

Nous poursuivons cette présentation générale dans le domaine des modèles à base de blackboards. Ce modèle constitue en effet le cadre de cette thèse, bien que certaines des idées qui y sont développées puissent être généralisées à tout système multi-agents, voire à tout système expert.

2.1 Le paradigme du tableau noir

Le modèle du blackboard utilise une communication par partage d'informations. Le paradigme qui lui est associé est le suivant :

considérons une assemblée d'experts humains réunis dans une salle dans le but de résoudre un problème global commun qui leur a été posé. Chaque expert présent est spécialisé dans un domaine particulier et peut contribuer à apporter un élément nouveau à la recherche de la (ou des) solution(s) au problème. Ces experts sont privés du moyen de communication roi chez les êtres humains : la parole. Ils ne peuvent de ce fait communiquer qu'en inscrivant leurs idées, leurs conclusions ou les informations qu'ils détiennent sur un tableau noir qui se trouve dans la salle.

Pour ne pas qu'il y ait de bousculades devant le tableau, pour que deux experts ne soient pas en conflit face à une information et que le travail se déroule bien et soit efficace, une décision est prise indiquant à tout moment qui peut passer au tableau pour y noter ses informations ou résultats. Les nouvelles données inscrites peuvent alors être vues de l'ensemble des experts présents. Elles sont ainsi à la disposition de tous et chacun peut les utiliser dans le raisonnement local qu'il mène. Ceux que ces données intéressent réagissent alors en demandant, à leur tour, à noter des informations sur le tableau noir, informations qui peuvent venir contredire ce qui a déjà été noté par ailleurs¹.

1. Les experts ont là affaire à un raisonnement *non monotone*, dans lequel il est possible de remettre en question des déductions produites antérieurement. Il va alors falloir revenir sur le raisonnement si la nouvelle information se révèle être vraie.

Le processus de résolution se déroule ainsi par étapes progressives au cours desquelles la solution partielle qui apparaît sur le tableau peut être enrichie ou contestée, jusqu'à ce qu'une solution complète et satisfaisante pour tous les experts soit trouvée.

Ce paradigme a donné naissance au *modèle du blackboard* ([Nii 86a], [Nii 86b] et [Engelmore et Morgan 88]). Les premiers systèmes fondés sur ce modèle ont vu le jour dans les années 70. Ils ont connu un développement beaucoup plus important dans la dernière décennie en raison du succès de quelques systèmes précurseurs devenus célèbres. Nous pouvons notamment citer :

- aux Etats-Unis :

HEARSAY II, développé à l'Université de Carnegie-Mellon, dont le domaine d'application est la reconnaissance de la parole continue [Erman *et al.* 80]. Il s'agit là du précurseur en la matière,

HASP/SIAP, développé à l'Université de Stanford pour l'interprétation de signaux sous-marins [Nii *et al.* 82],

BB1, développé à l'Université de Stanford également, qui est un outil générique d'aide au développement de systèmes multi-agents [Hayes-Roth 84], mais aussi CRYALIS [Engelmore et Terry 79], AGE [Nii et Aiello 79], DVMT [Lesser et Corkill 88], HEARSAY III [Erman *et al.* 81], GBB [Corkill *et al.* 86] et beaucoup d'autres encore, tous étant des descendants plus ou moins éloignés des précédents ;

- en France :

ATOME [Lâasri et Maître 89], développé au CRIN, qui est un générateur de système multi-agents. De nombreuses applications sont actuellement développées à l'aide de ce générateur, notamment celle qui est présentée dans cette thèse (le système multi-expert ROSY) ;

ABACAB, développé à l'INSERM, qui intègre un outil de maintien de la cohérence [Bachimont 90],

KIRK [Chehire et de Lastic Saint-Jal 88] ou SMECI [Corby 87], qui présentent la particularité d'emprunter à la fois aux modèles classiques des SE et au blackboard,

mais aussi SONIA [Collinot 88] pour les problèmes d'ordonnancement à l'Université de Paris VI, IKAROS pour la reconnaissance de la parole (qui utilise le modèle de BB1), le système TRAM à Grenoble [Koenig et Crochon 88] dans le cadre du groupe PLEIAD (Pôles et Lieux d'Echanges en IA Distribuée), ...

2.2 Les composants de base

Le modèle informatique du blackboard correspond au comportement qui a été décrit dans le paradigme ci-dessus. Il comporte de ce fait trois composants de base (cf. figure 2.1) qui correspondent à ceux du paradigme :

- un ou des *blackboards*, équivalents du tableau noir.

Il s'agit de bases de données structurées, regroupant les données initiales du problème ainsi que les solutions partielles que les divers agents apportent. Ils sont organisés en niveaux d'abstraction, permettant ainsi de considérer la solution et les données sous divers angles, selon divers points de vue et à différents niveaux de détail. Chacun de ces niveaux correspond à une classe d'objets, est décrit par des attributs et peut être rattaché à d'autres niveaux au moyen de liens. Les instances de ces niveaux sont appelées *nœuds* ou *hypothèses* et sont généralement représentées sous la forme de structures (genre "record" du langage Pascal) ;

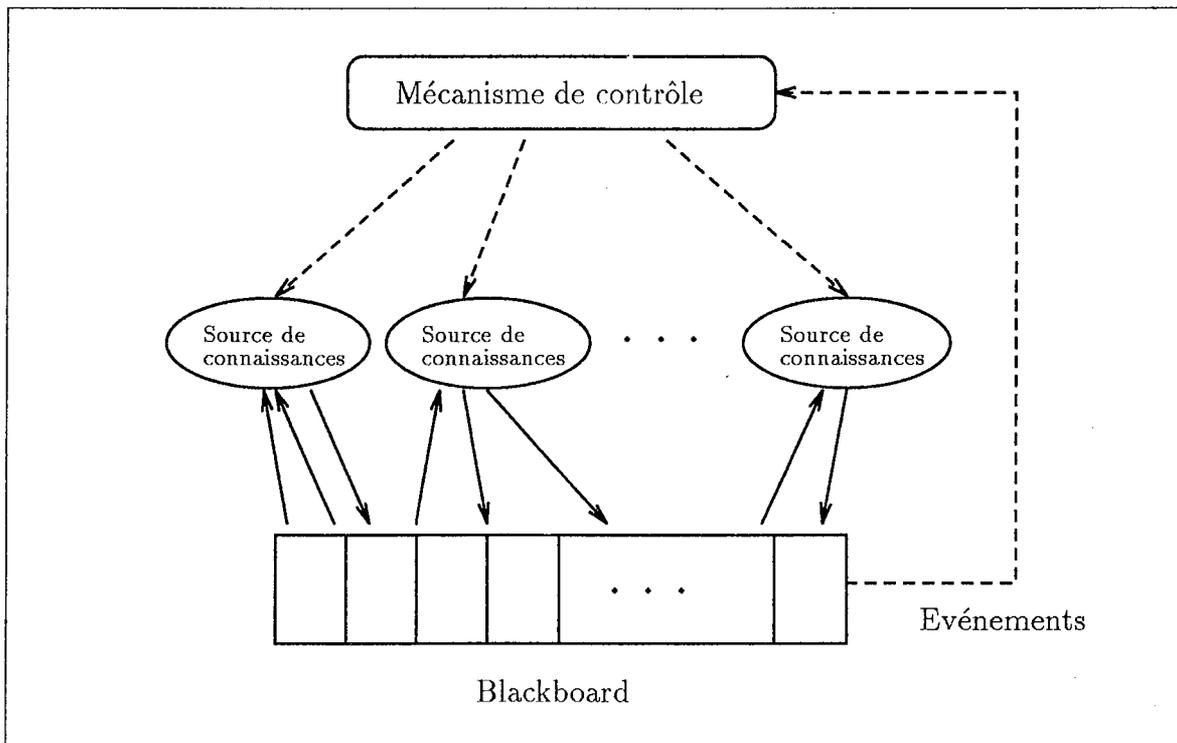


Figure 2.1. Les trois composants de base d'un modèle à base de blackboard.

- des *sources de connaissances* (ou agents), équivalents des experts.

Chaque source de connaissances a une compétence particulière et rassemble le savoir-faire lié à ce domaine de compétence. Elle utilise ce savoir-faire pour résoudre une partie du problème global. Son action consiste à raisonner "dans son coin" et à intervenir ensuite sur les données du blackboard en modifiant une solution partielle, en supprimant une de ces solutions ou en apportant une nouvelle

solution. Nous voyons ici poindre la notion d'*événements*, qui est inhérente à un modèle de blackboard et qui correspond aux actions menées par les sources de connaissances sur les données et solutions partielles du blackboard.

Les sources de connaissances ont un format "condition-action". La partie "condition" précise les situations dans lesquelles une de ces sources peut contribuer à la solution du problème. La partie "action", quant à elle, rassemble l'expertise de la source de connaissances, codée sous forme déclarative ou procédurale. Une source de connaissances intervient lorsque sa partie "condition" est vérifiée. Cette vérification se fait en fonction des changements qui ont eu lieu dans le blackboard, c'est-à-dire *en fonction des événements*.

Les sources de connaissances sont amenées à coopérer et à échanger des informations *via* le blackboard. Elles ne s'appellent pas mutuellement, chacune ignorant l'existence des autres. C'est de cette coopération aveugle que doit cependant naître la solution au problème commun d'où la nécessité de disposer d'un mécanisme qui va la gérer ;

- un *mécanisme de contrôle*, équivalent de la personne qui assure la coordination des experts présents dans la salle.

Ce mécanisme, que nous venons à l'instant d'évoquer, coordonne l'intervention des sources de connaissances selon une certaine stratégie. Il consulte dans ce but l'état de la solution courante et réagit plus particulièrement aux *événements survenus* dans le ou les blackboards. Son rôle est de résoudre les conflits d'accès aux données du blackboard et d'indiquer aux sources de connaissances une focalisation d'attention sur certaines de ces données. La résolution peut ainsi être guidée.

Ce mécanisme est ce qu'il y a de plus complexe à mettre en œuvre dans une architecture blackboard. Il est possible de distinguer quatre types de contrôle parmi tous les systèmes existants. Nous les détaillons dans ce qui suit.

Il est important de noter, avant de présenter les divers mécanismes de contrôle, que la construction de la solution s'effectue de façon incrémentale et opportuniste au sein des blackboards, chaque source de connaissances apportant sa contribution à la solution au problème posé de la façon la plus pertinente possible.

2.3 Les mécanismes de contrôle

Nous décrivons ici les caractéristiques des mécanismes de contrôle existants : rôle de ces mécanismes, représentation du contrôle et modes de contrôle.

Les deux principales fonctions assignées aux mécanismes consistent, nous l'avons vu, à résoudre les problèmes de conflit entre sources de connaissances et à fournir une focalisation d'attention (ou focalisation de contrôle). Ces fonctions peuvent être assumées de diverses manières, qui sont résumées sur la figure 2.2.

- Résolution de conflit :
 1. utilisation d'*agendas* et de *priorités* calculées à partir d'heuristiques dépendant de la solution courante,
 2. utilisation de *méta-sources* de connaissances.
- Focalisation de contrôle
 1. sur une région du blackboard,
 2. sur une source de connaissances,
 3. sur une source de connaissances avec, comme contexte, une région.

Figure 2.2. Les diverses façons de résoudre les conflits entre agents et d'orienter le raisonnement en fournissant une focalisation d'attention.

Le contrôle peut être représenté de façon explicite ou implicite, chacune de ces représentations présentant des avantages (\oplus) et des inconvénients (\ominus), dont les principaux sont présentés dans la figure 2.3.

- *implicite*

(ex : dans HEARSAY II, un programme qui englobe des heuristiques permettant de calculer la priorité d'une source de connaissances et qui choisit la source de connaissances à activer par rapport au calcul de ces heuristiques)

 - \oplus sélection rapide de la source de connaissances à activer.
 - \ominus évolutivité, mise à jour du contrôle (maintenance).
- *explicite*

fait par des sources de connaissances de contrôle, de façon directe ou indirecte (par exemple, à travers un blackboard, comme dans BB1).

 - \oplus évolutivité, modularité, maintenance (la mise à jour des connaissances de contrôle n'implique pas de remettre à jour les connaissances du domaine).

Figure 2.3. Représentation du contrôle.

Les quatre types de contrôle dont nous avons parlé correspondent à un contrôle :

- *procédural*, fondé sur la notion d'agendas (par exemple, HEARSAY II ou DVMT) :

⊕ efficacité.

⊖ contrôle relativement figé.

à utiliser lorsque les connaissances de contrôle sont uniformes, structurées, bien organisées.

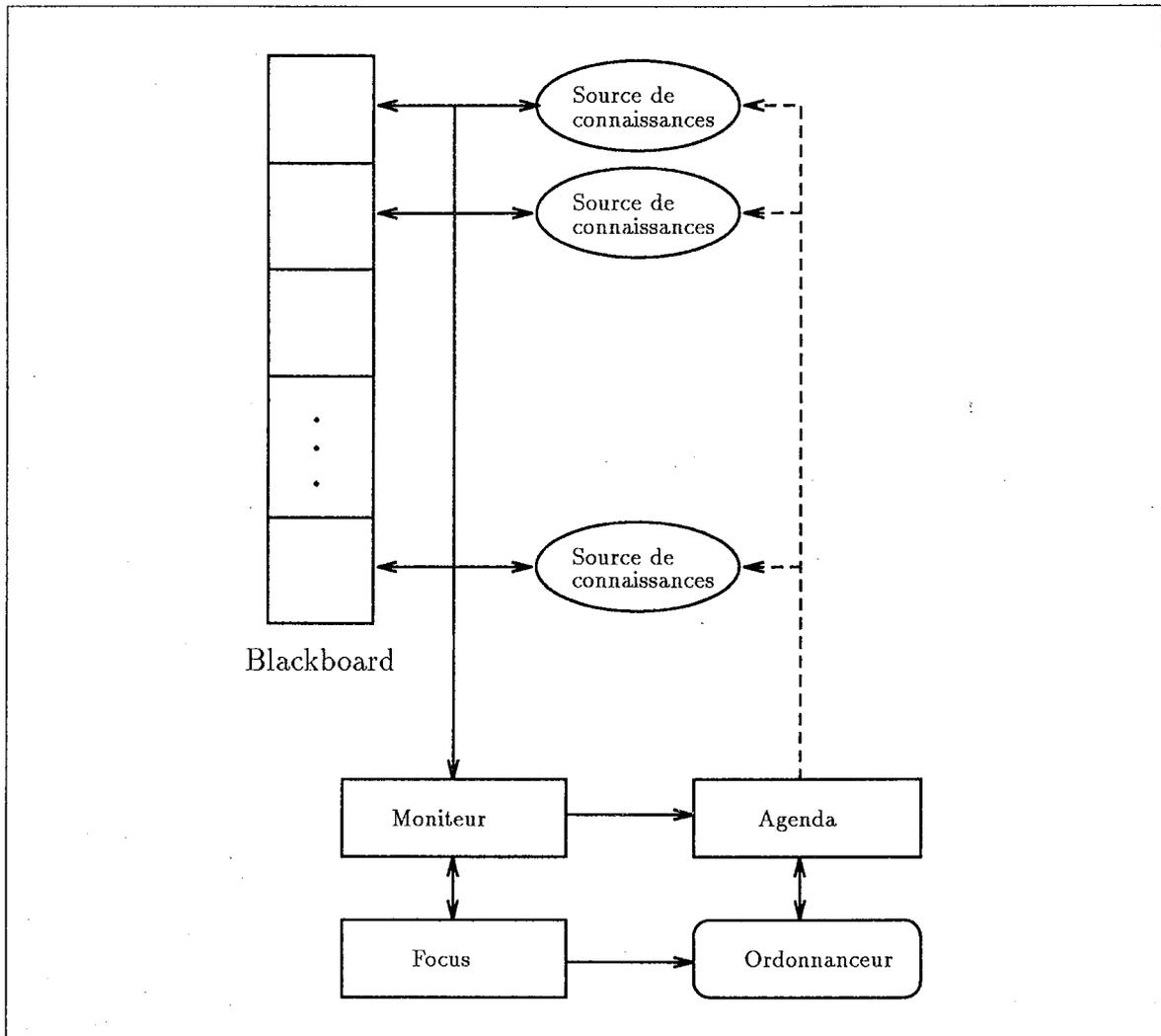


Figure 2.4. Mécanisme de contrôle procédural (HEARSAY II dans [Erman *et al.* 80]).

- *hiérarchique*, fondé sur la notion de méta-sources de connaissances (HASP/SIAP ou CRYALIS).

Une stratégie dirige alors des méta-sources de connaissances intermédiaires qui vont elles-même gérer l'activation des sources de connaissances du domaine.

⊕ représentation explicite et modulaire du contrôle,
formalisation structurée du problème,
représentation plus simple des stratégie de contrôle,

efficacité supérieure à celle d'un contrôle fondé sur des agendas avec calcul de priorité (cf. le contrôle opportuniste qui suit).

⊖ rigidité,
ordre d'activation des sources de connaissances difficile à identifier et à formaliser.

à utiliser lorsque le flux de contrôle est bien maîtrisé,
lorsqu'il est possible d'acquérir une expertise fine.

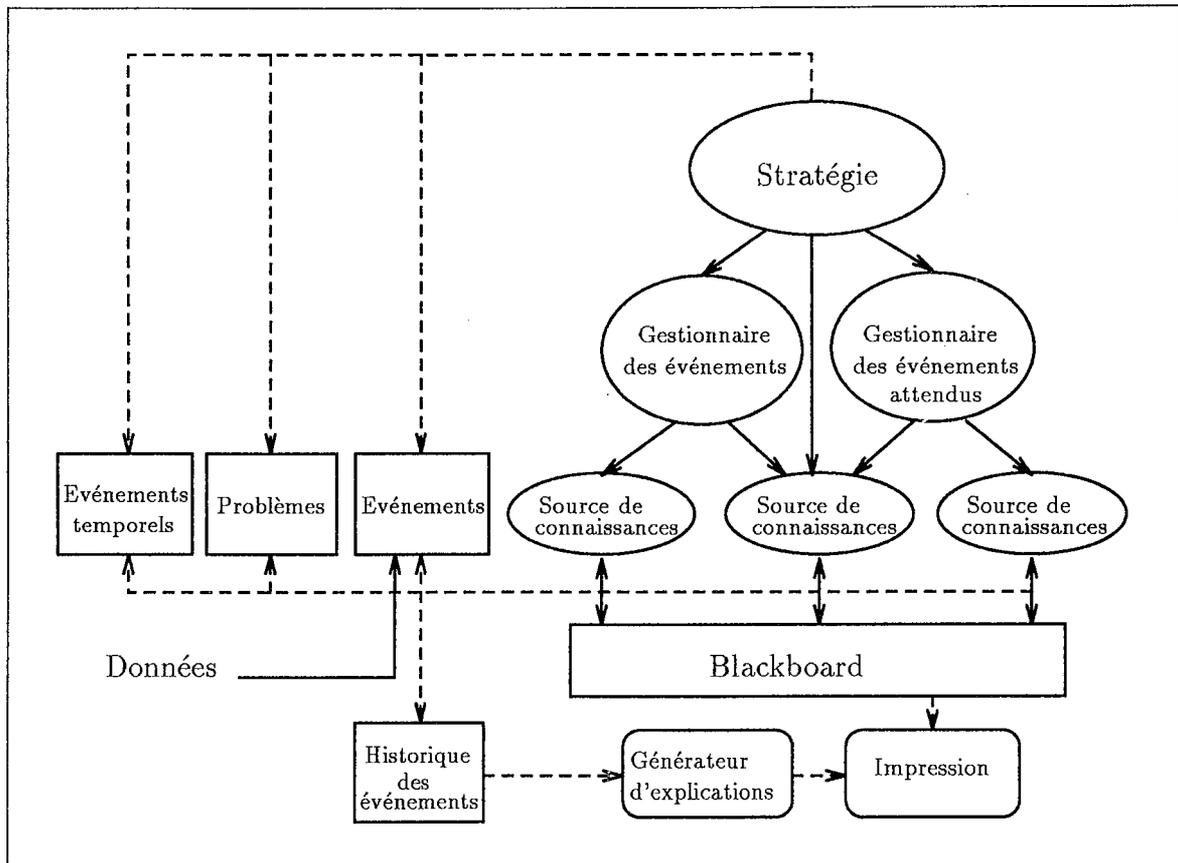


Figure 2.5. Mécanisme de contrôle hiérarchique (HASP/SIAP dans [Nii *et al.* 82]).

- *opportuniste* [Hayes-Roth 85], à base de blackboard et d'agendas (par exemple, BB1).

On distingue alors les sources de connaissances de contrôle des sources de connaissances du domaine, le blackboard de contrôle de celui du domaine. Les sources de connaissances de contrôle accèdent alors aux données du blackboard de contrôle afin de coordonner les autres sources de connaissances, agissant ainsi sur la résolution du problème :

⊕ comportement du système très souple et opportuniste,

⊖ efficacité,

détermination et maintenance des heuristiques permettant de calculer la priorité des sources de connaissances.

à utiliser lorsque l'ordonnancement des sources de connaissances est inconnu, en phase de mise au point.

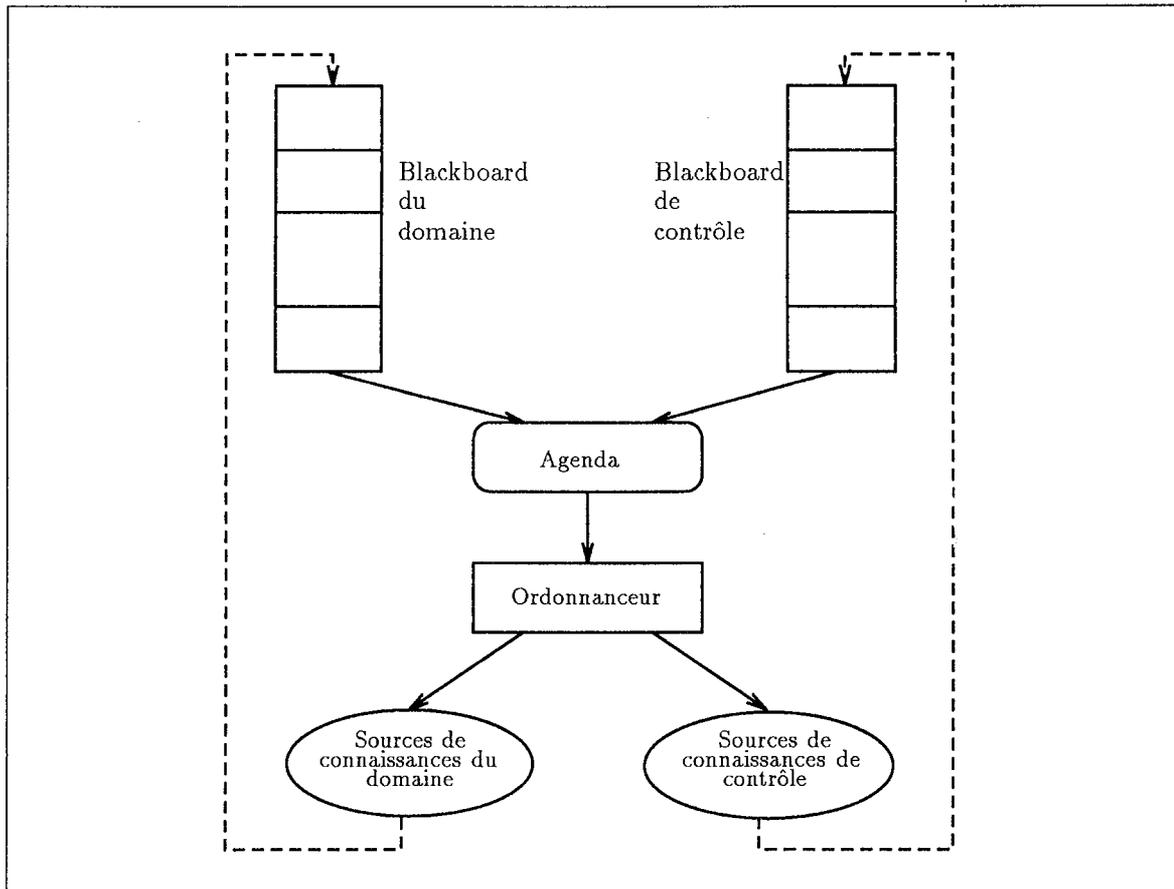


Figure 2.6. Mécanisme de contrôle opportuniste.

- et *hybride* [Lâasri et al. 88], fondé sur la notion de phases de résolution d'un problème (ATOME).

La principale caractéristique de ce contrôle est de ne pas être uniforme. Le processus de résolution pouvant être divisé en plusieurs étapes ou phases, on va associer à chacune d'entre elles un contrôle approprié, qui évoluera en fonction de l'état des blackboards.

Ce mode de contrôle est par ailleurs hiérarchique et fait appel à deux niveaux de méta-sources de connaissances. Il est ainsi composé de deux types de contrôle : un contrôle global, qui est appliqué à l'ensemble du processus de résolution, le faisant évoluer de phase en phase, et des contrôles locaux, qui sont utilisés dans chaque phase.

Il s'agit en fait d'un compromis entre l'efficacité du contrôle hiérarchique et l'opportunisme du contrôle à base de blackboard. Ce mode de contrôle est issu de ce qui a été choisi et développé pour ATOME que nous présentons au chapitre suivant.

3

Présentation de ATOME

ATOME est un générateur de systèmes multi-experts fondé sur le modèle du blackboard et développé au CRIN [Lâasri et Maître 89]. Il est à l'origine du modèle de contrôle hybride qui a été décrit au chapitre précédent. Nous n'en faisons ici qu'une présentation succincte, en introduisant ses caractéristiques propres et ce qui le différencie des autres systèmes à architecture de blackboard. Nous en ferons une description plus complète et détaillée dans la partie V, où une telle description est nécessaire.

3.1 Architecture de ATOME

Tout utilisateur de ATOME a la possibilité de définir un ou plusieurs blackboards. Il s'agit en fait de définir les niveaux qui vont composer chaque blackboard ainsi que la structure (attributs et liens) de chacun de ces niveaux.

Le développement d'une application avec ATOME nécessite également de définir des sources de connaissances. ATOME considère trois types de sources de connaissances, indépendantes les unes des autres et organisées de façon hiérarchique en trois niveaux. Chaque niveau contrôle celui qui lui est immédiatement inférieur. On trouve, au sommet de la hiérarchie, les stratégies. Viennent ensuite les tâches suivies des spécialistes¹ qui occupent le plus bas niveau. Ces dernières n'ont pas de rôle de contrôle mais sont les seules à pouvoir agir sur les données des blackboards, en utilisant les connaissances heuristiques ou procédurales dont elles sont composées. Les stratégies et les tâches sont des *méta-sources de connaissances* qui ont la charge de coordonner les sources de connaissances qu'elles contrôlent. Après avoir analysé la qualité de la solution courante au problème à résoudre, elles choisissent la source de connaissances à activer, celle dont le travail sera le plus à même de faire avancer la résolution du problème à traiter. Cette qualité est évaluée :

- par les tâches en fonction des derniers *événements* survenus dans les blackboards et stockés dans des *listes d'événements*.

L'architecture de ATOME présente la particularité d'associer une liste d'événements à chaque tâche. Une tâche peut ainsi indiquer les événements qui l'intéres-

1. On dit "une" spécialiste dans le "langage" ATOME.

sent et avoir un mode de contrôle propre, adapté à la résolution qu'elle envisage et indépendant de celui des autres tâches.

Ce sont les spécialistes qui décident de la création des événements. Ceux-ci ne sont en effet pas systématiquement créés lors de toute action d'une spécialiste sur un nœud du blackboard. Ils ne sont créés que lorsque la spécialiste le juge nécessaire, c'est-à-dire lorsqu'elle considère que l'action qu'elle a entreprise est importante et doit être mentionnée. Les événements sont alors propagés vers la ou les listes d'événements des tâches qui se sont déclarées intéressées ;

- par les stratégies en fonction de la présence d'informations importantes (nœuds des blackboards) dans les *résumés des blackboards*.

Ces résumés offrent une synthèse de l'état d'avancement de la solution courante. La stratégie peut ainsi en juger en ne disposant que du strict minimum d'informations nécessaire.

Tout comme la tâche choisit les types d'événements qui l'intéressent, la stratégie indique quels sont les nœuds des blackboards qui vont faire partie des résumés.

La figure 3.1 ci-contre présente l'architecture de ATOME et permet de faire remarquer que, si l'on peut définir plusieurs stratégies, une seule peut être utilisée à la fois. La stratégie est, en quelque sorte, le chef d'entreprise qui dirige et prend les grandes décisions (orientations du problème à résoudre) alors que les tâches peuvent être assimilées à des responsables locaux, qui traitent les sous-problèmes inhérents au problème global.

3.2 Fonctionnement

Le fonctionnement global d'un système-ATOME², pour lequel toutes les composantes de base ont été définies selon les diverses expertises liées au domaine d'application, fait appel à une boucle de contrôle de base. Cette boucle constitue un cycle d'exécution du système :

1. la stratégie choisit la règle la plus importante ayant sa partie gauche satisfaite et la déclenche. Elle consulte pour cela les résumés des blackboards. L'exécution de cette règle provoque l'activation d'une séquence de tâches ou d'une unique tâche. La stratégie transmet alors, de façon séquentielle, le contrôle à chacune des tâches activées et se met en attente. Les nœuds sélectionnés par la stratégie sont également transmis en guise de *première focalisation de contrôle* ;

2. Système développé avec ATOME.

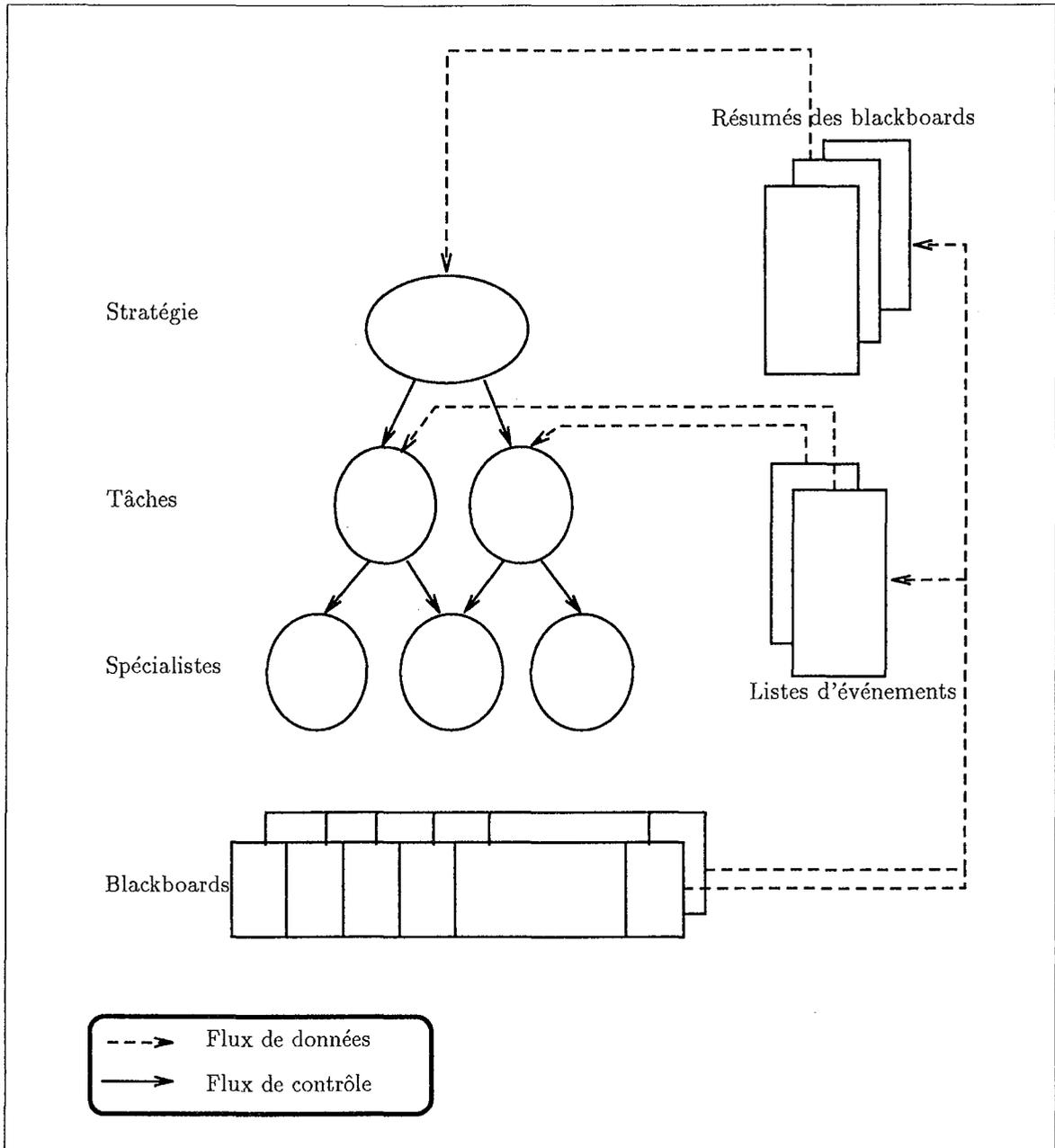


Figure 3.1. Architecture de ATOME.

2. la tâche qui a le contrôle provoque l'activation d'une ou de plusieurs spécialistes (toujours de façon séquentielle) et se met alors en attente. Là aussi, il y a transmission du contrôle aux spécialistes et d'une *seconde focalisation de contrôle* : les événements qui ont permis l'activation des spécialistes. Le but est ici de permettre à une spécialiste activée d'accéder aux nœuds qui sont associés à ces événements.

La tâche peut orienter son raisonnement en fonction du focus de contrôle transmis par la stratégie. Elle peut ainsi se focaliser sur les événements associés aux nœuds que cette dernière a sélectionnés.

Lorsqu'elle a fini de travailler, elle redonne le contrôle à la stratégie ;

3. la spécialiste en cours d'activation consulte les régions des blackboards qui l'intéressent. Elle peut créer, modifier ou supprimer des hypothèses dans les divers blackboards. Ses interventions peuvent alors engendrer des événements qui sont propagés vers les listes des tâches intéressées. De même, elles peuvent être considérées comme importantes : les nœuds associés sont alors placés dans les résumés des blackboards. C'est donc la spécialiste qui, en alimentant les listes d'événements et les résumés des blackboards, assure la poursuite du processus de résolution (c'est elle qui "fait que cela boucle").

Elle a la possibilité d'utiliser les focus qui ont été émis auparavant, en première et seconde focalisation de contrôle. Lorsqu'elle a fini de travailler, elle redonne le contrôle à la tâche appelante ;

4. fin du cycle.

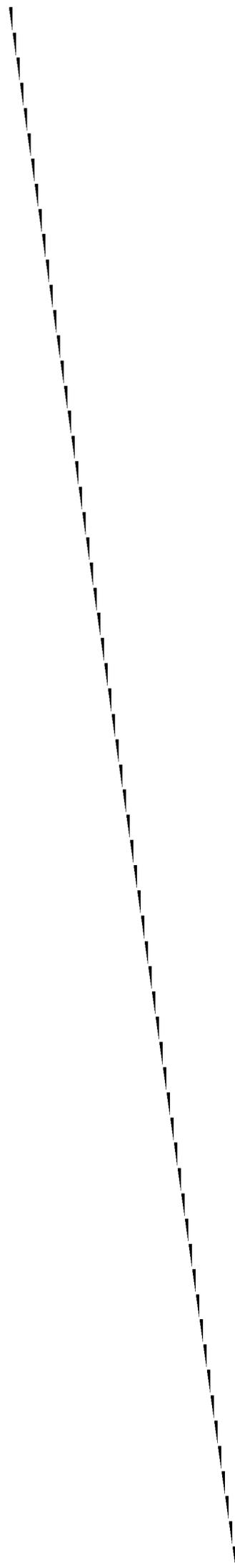
Le système s'arrête lorsqu'aucune règle de la stratégie n'est déclenchable.

Chaque activation de tâche correspond en fait à une *phase* (cf. 2) du modèle hybride. C'est la stratégie qui est chargée de faire évoluer le système de phase en phase (i.e. de tâche en tâche), chaque phase ayant un contrôle approprié et dépendant de l'état de la solution courante. Le fonctionnement d'un système-ATOME est donc à la fois opportuniste (du fait de ce modèle hybride à multi-phases) et efficace (du fait de la hiérarchie de contrôle).

ATOME a été retenu pour le développement du système ROSY, qui fait l'objet de la partie suivante.

PARTIE II

Le système expert ROSY



Les municipalités ont en charge l'entretien du réseau routier urbain. Dans le cadre d'un programme pluriannuel, elles sont amenées à reconstruire ou à rénover des chaussées, en commençant par les plus dégradées au sens des objectifs de la ville. L'action engagée vise à assurer une sécurité et un confort maximums aux usagers sur les différentes voies de circulation, tout en optimisant les investissements. Le double problème du choix des rues à traiter et du type de réfection à entreprendre sur chacune d'elles se pose alors.

Il s'agit là d'une tâche difficile, que la municipalité a confiée à des personnes qualifiées "d'experts" : leur savoir-faire est en effet issu d'une longue expérience dans le domaine, ce qui leur permet actuellement, dans certains cas, de conclure d'un seul coup d'œil sur une chaussée. Ces personnes assurent à la fois les fonctions de gestionnaire de la voirie urbaine et d'experts en matière de réparation de chaussées. Cette seconde charge les conduit à manipuler des connaissances dites "expertes" (heuristiques issues de leur pratique) et fait appel à beaucoup d'informations, pas toujours disponibles ni précises.

Les experts du domaine ont exprimé le désir de disposer d'un outil qui les aiderait dans leur travail. Ils éprouvent en effet le besoin de rationaliser leurs décisions de façon à rendre optimale leur démarche en matière de gestion de voirie et réaliser ainsi des économies sur le budget voirie. L'approche système expert semblant la plus indiquée à traiter leur problème, une collaboration s'est instaurée entre le CRIN et les ingénieurs de voirie de la mairie de Nancy. C'est ainsi qu'est né le projet de système expert ROSY. ROSY se propose de modéliser toute la démarche d'un expert en voirie urbaine, depuis l'analyse et le diagnostic de l'état de surface des chaussées jusqu'à l'établissement de la liste des rues à rénover.

Cette partie a pour but de faire le bilan du travail réalisé jusqu'alors sur le système ROSY. Elle est composée de trois chapitres traitant plus particulièrement du système, dans lesquels sont respectivement exposés :

- ce qui a motivé le développement d'un tel système et pourquoi une approche "système expert" a été retenue ;
- la démarche de l'expert lorsqu'il lui faut établir une liste de rues nécessitant une réfection. De cette démarche se dégage une nette composante multi-agents, ce qui explique que ROSY ait été développé à l'aide du système multi-agents ATOME ;
- le système expert lui-même, dans son état actuel. Nous présentons tout d'abord les différents blackboards de l'application, qui ont été définis suite à identification des données nécessaires au raisonnement expert. Nous montrons ensuite l'architecture actuelle de ROSY : le découpage en tâches a été effectué et nous sommes actuellement en phase de validation pour la partie *Diagnostic* du système.

Le dernier chapitre s'attache à montrer les intérêts *a posteriori* de la construction d'un tel système, que ce soit pour la municipalité, pour l'expert lui-même ou pour

notre propre approche du domaine multi-agents (acquisition des connaissances ou modélisation du raisonnement). Y sont également envisagés la poursuite de la réalisation de ROSY et les développements éventuels autour du système.

1

Motivations qui ont conduit au système expert ROSY

1.1 L'originalité de la voirie urbaine

Le domaine de la voirie urbaine ne dispose pas de techniques qui lui sont propres pour la construction, le dimensionnement¹ et la rénovation des chaussées. Souvent, il y a transfert de technologie du domaine routier ou autoroutier au domaine urbain. Ces techniques sont alors adaptées en fonction des spécificités de la ville par rapport à la campagne.

Or, les techniques routières sont inapplicables en milieu urbain à cause de caractéristiques propres aux chaussées urbaines, principalement :

- la présence de réseaux sous la chaussée,
- l'existence de trottoirs et de caniveaux,

mais aussi l'absence de barrières de dégel, la canalisation des flux importants de trafic, notamment dans les couloirs de bus, l'existence de zones à faible circulation comme les voies de stationnement, ...

Le calcul du dimensionnement des chaussées [Ministère 77] est un exemple représentatif de l'impossibilité d'appliquer les techniques routières sur un réseau urbain. Si, en milieu routier, on est capable de dimensionner une chaussée de façon algorithmique à partir de paramètres peu nombreux (trafic, état du sous-sol, conditions climatiques) et ainsi d'en déterminer la durée de vie, cela est actuellement impossible en zone urbaine à cause des réseaux essentiellement. Ceux-ci compliquent la tâche de l'expert. Les fuites, imprévisibles, dues à la vétusté et à l'usure naturelle des réseaux ainsi que l'évolution technologique de ces derniers conduisent inéluctablement à des interventions (fouilles dans le corps de chaussée) qui seront suffisantes pour assurer la destruction de l'homogénéité de la chaussée.

1. détermination de la structure de fondation d'une chaussée : matériaux à utiliser et épaisseurs des différentes couches de matériaux.

L'utilisation des techniques routières conduit donc l'expert à ignorer les particularités des rues qu'il gère.

Une alternative consisterait à adapter ces techniques au domaine urbain en tenant compte des réseaux et autres paramètres. Ainsi, en matière de dimensionnement, il faudrait faire coïncider durée de vie de la chaussée et limite constituée par l'intervention sur réseau en terme de temps. Or, il n'existe pas aujourd'hui d'approche technique formalisée de ce type-là.

1.2 Rationaliser une décision

La gestion des voiries urbaines est donc empreinte d'une part d'arbitraire puisque qu'aucune technique spécifique au milieu urbain n'existe. Les services techniques de la ville de Nancy ont éprouvé le besoin de rationaliser leurs décisions, d'en chasser le côté aléatoire. Ils souhaitent disposer d'un outil d'aide à la gestion de la voirie urbaine dans le but de :

- préciser le diagnostic que l'expert fait lorsqu'il étudie une chaussée. Il lui faut en effet analyser l'aspect d'une chaussée et les dégradations qui y apparaissent de façon à déterminer de quel mal elle souffre, si le mal est profond (il a atteint la fondation) ou s'il n'est que superficiel. Ce diagnostic conditionne en grande partie le choix du mode de réfection et celui des chaussées à refaire (cf. 2.2.2 et 2.2.3). Le rendre plus sûr permettrait de mieux choisir ;
- choisir la bonne thérapie (c'est-à-dire le bon mode de réfection) parmi celles possibles. Le diagnostic est unique mais plusieurs thérapies peuvent en découler.

Ce souci s'est fait pressant du fait d'une conjoncture budgétaire difficile et suite à diverses constatations, financières et techniques.

1.2.1 Enjeux financiers

Le tout premier but assigné au SE est de pouvoir traiter les cas limites, ceux qui posent problème les experts. Ces derniers doivent pouvoir sélectionner un ensemble de chaussées à analyser et le SE doit, à son tour, extraire de cet ensemble la liste des rues sur lesquelles il faut absolument intervenir pour ne pas être obligé de recourir à une réfection maximale. Il s'agit, en quelque sorte, de "sauver" les chaussées qui peuvent encore l'être. C'est ainsi, en partie, que l'on envisage de faire des économies sur le budget de la voirie.

De plus, sachant que toute décision en matière de voirie urbaine peut entraîner une erreur estimée à 10% (voire 15%) du budget total (environ 6 MF), nous pouvons aisément comprendre pourquoi il s'agit là d'un argument de poids pour les experts. Il doit gérer au mieux le budget que la mairie lui alloue et doit de ce fait considérer toute éventualité de réaliser des économies.

L'optimisation de l'investissement est donc souhaitée, afin d'éviter toute perte éventuelle de main d'œuvre et de matériaux, et afin de rentabiliser les dépenses engagées.

1.2.2 Enjeux techniques

Actuellement, une certaine quantité de matériaux peut être perdue parce qu'on n'est jamais sûr de l'optimalité de la technique de réparation choisie. L'exemple du dimensionnement peut être cité : il n'y a pas récupération du surdimensionnement par une augmentation de la longévité de la chaussée, contrairement à ce qui se passe dans le domaine routier.

Or il existe des matériaux qui ne seront plus extractibles à faible coût d'ici une vingtaine d'années, du fait de leur raréfaction. Aussi faut-il limiter au maximum tout gâchis éventuel. Cette réaction est guidée par des considérations écologiques mais également financières.

La réalisation d'un tel outil comporte de plus un côté "défi à relever". Il s'agit de participer au mouvement de création, développement et mise au point d'aides aux experts en voirie. Cette tendance est très forte, à l'heure actuelle, dans le domaine. Il en rejaillira une image de dynamisme et d'innovation sur la capitale lorraine.

L'équipe voirie de la municipalité de Nancy a pris conscience de cet état de fait et confirme donc sa volonté de collaborer à la réalisation d'un outil qui soit général, utilisable par toute commune et pas seulement limité au cas particulier de sa ville.

1.3 Des arguments pour une approche "Système Expert"

La démarche "Système Expert" a été retenue. La gestion de la voirie urbaine répond en effet aux critères d'applicabilité d'une telle démarche, définis dans [Haton JP et Haton MC 89] :

- le problème est bien défini. Nous évoluons dans un domaine parfaitement délimité, où un besoin de disposer d'un outil a été ressenti ;
- il existe des ingénieurs experts qui font actuellement le travail. Ils sont très motivés et prêts à présenter leur savoir-faire de la façon la plus simple et la plus claire qui soit. Ils seront la source de l'expertise ;
- comme nous l'avons vu précédemment, il n'y a pas de démarche algorithmique connue en matière de voirie urbaine. L'expert se fie à son expérience, aux heuristiques qu'il a pu en tirer et à son savoir-faire, acquis lors de nombreuses études de cas. De telles connaissances sont généralement modélisées dans un système expert ;
- l'expertise en matière de voirie fait appel à une grande quantité de connaissances, de nature très diversifiée. Sont traitées ou utilisées :
 - des données géologiques,
 - des lois physiques issues de la résistance des matériaux,

- des informations sur les matériaux et leurs caractéristiques,
- dans un tout autre genre, des paramètres stratégiques, liés aux objectifs de la municipalité (contentement et sécurité des usagers et des riverains, souci de la pérennité de la chaussée, ...),
- des observations visuelles,

et la liste n'est pas exhaustive. Dans le seul domaine des fournitures, chaque entreprise propose son catalogue "Matériaux" présentant de l'ordre de trente produits.

Il y a donc une quantité considérable de connaissances diverses à emmagasiner. L'approche "Système Expert" est la plus adaptée pour résoudre ce problème de variété d'informations à représenter et de quantité d'informations à stocker ;

- la nature de la connaissance milite en faveur d'une méthodologie "Système Expert" : il y a certes à la fois des connaissances profondes et des connaissances de surface mais ces dernières sont beaucoup plus utilisées par l'expert que les premières.

Les connaissances profondes [Ernst 85] sont les connaissances sur le domaine dans lequel le problème se pose. Ce sont la description des objets de ce domaine, la description de leurs relations et des lois qui les gouvernent. Elles correspondent en général à l'acquis scientifique et technique de l'expert.

Les connaissances de surface sont les connaissances que l'expert a développées au contact du problème, lors de nombreuses résolutions de cas. Ce sont des abstractions nouvelles, des associations entre caractéristiques du problème et éléments de solution, qui peuvent être plus ou moins floues, plus ou moins subjectives ;

- les connaissances à mettre en jeu sont appelées à *évoluer*. De nouvelles techniques et de nouveaux produits sont en effet chaque année mis au point dans les laboratoires des entreprises spécialisées dans la réfection des routes. De plus, les divers organismes concernés par le domaine (CETUR², LCPC³, AIVF⁴, DDE⁵, ...) organisent régulièrement des rencontres entre spécialistes, des conférences où sont présentées les dernières méthodes développées. Sans cesse, de nouveaux sujets d'étude sont proposés et trouvent des personnes motivées pour les entreprendre.

L'intelligence artificielle y est souhaitée ([Ritchie 87], [IVF 89]) et représentée avec les projets SCEPTRE⁶ [Ritchie *et al.* 87], HPMS⁷ et PMS⁸ [ENPC 85] aux Etats-unis, ERASME⁹ développé à Sophia Antipolis avec le concours du CETE

2. Centre d'Etudes des Transports URbains.

3. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

4. Association des Ingénieurs des Villes de France.

5. Direction Départementale de l'Equipement.

6. Surface Condition Expert System for Pavement Rehabilitation Planning.

7. Highway Pavement Monitoring System, système de suivi des chaussées autoroutières.

8. Pavement Management System, système de gestion de ces mêmes chaussées.

9. Entretien Routier Assisté par Système Multi-Experts.

Méditerranée ([Fajon et Corby 88] et [Corby *et al.* 90]), ADDA¹⁰ dans le domaine de la vision [Hajek et Haas 88], ...

Cela débouche sur une amélioration de la connaissance du domaine, sur le développement de nouveaux moyens de mesure qui seront mis à la disposition du technicien en voirie. Actuellement, le *Penetradar* est en cours de test dans les Laboratoires des Ponts et Chaussées. Cet appareil permet de mesurer en continu, à grande cadence et de façon non destructive, l'épaisseur des couches d'une structure de chaussée. On en voit tout de suite l'intérêt pour le contrôle des fondations. Ce type d'instrument pourrait à terme être utilisé à Nancy. Il faut donc tenir compte d'une possible évolution des moyens de mesure.

Les recherches se font dans des domaines variés et très pointus et témoignent du dynamisme en matière de gestion de voirie. L'outil doit donc être souple et adaptable (vu les fluctuations importantes qui surviennent dans les connaissances), et faciliter la mise à jour des connaissances. Ceci est une des principales caractéristiques des systèmes experts, du fait de la séparation entre les connaissances et l'utilisation de ces connaissances ;

- malgré une grande effervescence en matière de développement d'outils en voirie, toutes les mairies ne disposent pas des dernières innovations. Elles ne pourront donc pas toutes compléter leurs informations à l'aide de mesures ou d'études demandées à des organismes spécialisés. De plus, un certain flou fait partie intégrante de l'état de la connaissance dans le domaine. Les données sont ainsi plus ou moins complètes, plus ou moins précises, plus ou moins sûres. Il n'est, de ce fait, pas rare de voir l'expert supposer que telle fondation *doit être* de tel type, que la pente de la rue vaut *à peu près* x%, ...

Il faut donc traiter des données incomplètes, inexactes, incertaines et imprécises. Les systèmes experts sont actuellement les seuls logiciels capables d'aborder de telles données ;

- la démarche experte en voirie est basée en partie sur les perceptions de l'expert. Elle inclut en ce sens une grande part de subjectivité. Deux experts peuvent proposer des conclusions qui ne sont pas identiques et il est bien difficile de juger lequel propose la meilleure solution. En fait, il n'existe pas de "meilleure solution", pas de référence absolue.

Il est donc très important que l'outil *justifie ses propositions*. Il lui faut convaincre ses utilisateurs que son raisonnement est judicieux et qu'ils pourront s'en servir en toute confiance. Cette tâche est d'autant plus ardue auprès de l'expert qui n'a pas abouti à des conclusions similaires. Une approche "Système Expert" est tout indiquée pour cette fonction.

Toutes les conditions sont donc réunies pour qu'une expérience "système expert" soit tentée : des gens motivés sont prêts à l'entreprendre et la méthodologie "Système

10. Automated Distress Data Acquisition, digitalisation de photographies de surfaces de chaussées et identification des principales dégradations qui y apparaissent.

Expert” s’adapte bien au domaine. De plus, les bénéfices des techniques des systèmes experts dans le domaine de la voirie urbaine peuvent être considérables. Il y a tout d’abord le problème financier qui est loin d’être négligeable. Il y a aussi l’affinement du raisonnement et la possibilité de présenter plusieurs solutions. Mais surtout, cela présente un gros intérêt :

- pour le rassemblement et la codification des connaissances liées à la voirie.

Les connaissances disponibles dans des ouvrages spécialisés (actes de conférences, périodiques émanant des différents organismes, recommandations du Ministère, ...) ne sont pas directement applicables à la voirie urbaine : d’une part parce qu’elles sont destinées essentiellement au domaine routier, d’autre part parce qu’elles sont théoriques et qu’il faut les faire passer à la pratique, ce qui demande d’acquérir une certaine expérience avant de pouvoir les utiliser correctement. Elles sont complétées par des heuristiques qui ne sont publiées nulle part. Répertorier ce savoir-faire serait particulièrement valorisant pour toute municipalité qui souhaite utiliser l’expertise de ses meilleurs spécialistes, aujourd’hui et après que ceux-ci se seront retirés ;

- pour l’implantation et l’application de toute nouvelle connaissance (technique, heuristique, ...) de façon systématique.

Nous avons pu constater dans ce qui précède que le domaine de la voirie est très fertile en matière d’innovation. Paradoxalement, il y a une différence considérable entre la connaissance accumulée par les chercheurs et les experts et la connaissance actuellement utilisée sur le terrain. Un système expert serait donc un excellent moyen de diffusion de la connaissance experte, savoir-faire et dernières innovations confondus.

Notons, en dernière remarque, que le raisonnement expert a en fait été modélisé selon une approche multi-agents. Nous mettons en effet en évidence dans le chapitre qui suit, que l’expertise est en fait une multi-expertise (l’expert fait à la fois du diagnostic, de la prise de décision, de la gestion, ...). Nous préciserons pourquoi une telle approche a été retenue et ce qui a motivé le choix du générateur de système multi-experts ATOME en 3 partie III, lorsque nous présenterons la méthode que nous avons suivie pour développer le système. Nous passons maintenant à la description du travail de l’expert en voirie urbaine.

2

Le travail de l'expert en voirie urbaine à Nancy

2.1 But de son travail

L'expert en voirie urbaine à Nancy gère 160 kilomètres de rues. Il a à sa charge les chaussées, trottoirs et caniveaux qui composent les rues. Chaque année, il établit un planning des travaux à exécuter sur le réseau urbain, travaux qui se répartissent en deux catégories principales :

- *la maintenance* qui consiste à assurer l'entretien courant des rues par de petits travaux ponctuels ne nécessitant pas de gros moyens techniques et financiers. Il s'agit en fait d'intervenir rapidement sur un défaut local de chaussée ou trottoir, ceci pour éviter tout accident éventuel et pour préserver la longévité de la chaussée (il faudra s'occuper, entre autres tâches, de reboucher les nids de poule qui forment à la sortie de l'hiver) ;
- *la réfection* qui, elle, suppose de faire appel à une entreprise spécialisée pour un chantier important. Il faut alors décider si l'on va refaire complètement la rue, c'est-à-dire depuis les fondations, ou simplement le tapis (la "couche de roulement").

L'objectif de l'expert est d'aboutir à une amélioration de l'état global du réseau urbain. Il dispose pour cela d'un budget annuel qui va limiter l'étendue des interventions possibles. Il lui faut donc intervenir juste et bien. Il est ainsi confronté à deux problèmes cruciaux :

- le choix des rues à traiter,
- le choix de la réfection (type, matériaux et techniques à mettre en œuvre) pour chaque rue.

La résolution de ces problèmes, fondée sur une expertise visuelle et un diagnostic fait selon une démarche présentée au paragraphe qui suit, doit aller dans le sens de la

politique que s'est fixée la ville. Les gestionnaires doivent donc se soucier de maintenir un certain niveau de qualité des voies urbaines, principalement en matière de confort, sécurité et pérennité, tout en veillant à l'entretien de ce patrimoine routier et à l'optimisation des investissements.

Il s'agit là de critères généraux pouvant orienter la gestion de la voirie urbaine de toute municipalité. D'autres sont également parfois pris en compte tels le bruit ou l'esthétique, mais à un niveau secondaire. Nancy a choisi de mettre en avant sécurité et pérennité avant tout, mais aussi confort et esthétique, dans une moindre mesure.

2.2 La démarche de l'expert

L'expert entretient chez lui une excellente connaissance du réseau dont il s'occupe, par des visites régulières. Cela lui permet d'avoir une vue d'ensemble et ainsi de pouvoir déterminer des catégories de chaussées en fonction de l'état de dégradation de chacune. Cela va des rues en bon état (cas rares) jusqu'aux rues complètement dégradées.

Il range chaque rue dans une catégorie et associe à chaque catégorie un type de réfection. Il peut ainsi établir une liste de chaussées à refaire en fondation et une liste de chaussées à refaire en surface, en limitant le nombre de chaussées sur chaque liste en fonction du budget. Ces listes constituent alors son planning. La démarche experte consiste donc à construire les différentes catégories, ce qui revient à associer à chaque rue un type de réparation, et à choisir des rues dans ces catégories.

Le problème est alors de savoir comment l'expert définit ces catégories et comment il choisit ensuite les chaussées. Nous avons donc cherché à expliciter sa façon de procéder et les connaissances qu'il utilise pour mener à bien son raisonnement. Par de nombreux entretiens et observations, dont nous donnons un aperçu au chapitre suivant, nous sommes passés de :

“on voit tout de suite quelles rues sont bonnes, quelles rues sont mauvaises”,

ainsi que le disait l'expert, à la démarche que nous décrivons ci-après. Le processus appliqué à chaque rue est comparable à un examen médical. Il comprend un examen visuel accompagné d'un diagnostic pour déterminer de quoi le patient (la rue) souffre, puis la recherche du type de thérapie et, enfin, la prescription du ou des “médicaments” (matériaux et techniques) adéquats, si besoin est.

2.2.1 Examen visuel et diagnostic

L'expert détermine les différentes catégories de rues dont nous avons parlé auparavant grâce à un examen visuel plus ou moins approfondi, au cours duquel il procède à l'élaboration d'un diagnostic. Il va sur le terrain pour voir dans quel état sont les rues, en ayant toujours en tête le fait qu'il devra se prononcer sur l'état de la chaussée pour choisir une réfection adéquate. Il repère dans ce but les éléments qui lui permettent de conclure. Il relève ainsi les défauts qui apparaissent sur la chaussée, tente d'en expliquer la formation et dresse le bilan de santé de la chaussée.

L'auscultation se fait à divers niveaux de détails. L'expert commence tout d'abord par juger de l'aspect général de la rue. Il repère les gros défauts, ceux qui se voient de loin (par exemple, des affaissements de grande amplitude) et ceux qui sont ou risquent d'être dangereux pour la sécurité des automobilistes, des cyclistes ou des piétons (par exemple, les nids de poule dans la bande de roulement). Il apprécie le profil de la chaussée pour voir s'il est encore correct (s'il ne ressemble pas à un champ de bosses). Il contrôle le bon alignement des bordures et des caniveaux et vérifie que ceux-ci ne sont pas déformés. Une estimation globale de l'état de la chaussée en est déduite. Il s'agit d'une première appréciation de l'état de la fondation ou d'une appréciation définitive pour certains cas.

Lorsque cette estimation n'est pas suffisante, il procède à un examen complet de la rue, en la parcourant d'un bout à l'autre. Il relève les dégradations qui vont soit étayer le premier jugement qu'il a porté, soit le remettre en cause. Cela le conduit donc, au fur et à mesure de ses pérégrinations, à étudier chacune des dégradations qu'il rencontre. Il cherche à en trouver l'origine et tente d'en expliquer la formation. Nous le voyons donc s'enquérir auprès des riverains d'une éventuelle fuite sur un réseau, chercher du regard un indice ou encore plonger dans une tranchée ouverte pour aller observer la fondation. Son principal souci est de déterminer si telle dégradation est le signe d'une faiblesse de la fondation, s'il s'agit d'un phénomène purement superficiel ou encore d'un accident ponctuel.

Pour certaines détériorations, la cause est évidente. Elles sont en effet dues à des évolutions naturelles connues des matériaux. Par exemple, les dalles en béton de certaines fondations subissent un phénomène naturel de retrait thermique, ce qui provoque des fissures transversales régulièrement espacées sur la chaussée. Pour les autres détériorations, la tâche est plus compliquée et suppose de disposer :

- des indices que l'expert peut collecter sur la chaussée.

Par exemple, l'affaissement d'une portion de rue, au bout de laquelle on trouve un regard sur un réseau, peut s'expliquer par l'affaissement d'une tranchée. Si, en plus, les marques d'une ancienne fouille sont visibles, l'expert peut conclure de façon presque sûre que les désordres constatés proviennent du mouvement de la tranchée ;

- de la mesure du trafic.

Il est possible d'utiliser soit une estimation, soit une mesure précise qui sera transformée en une donnée qualitative suivant un classement défini par le Ministère de l'Équipement. Cela dépend en fait des moyens de mesure de la ville.

Un trafic lourd et canalisé peut, par exemple, expliquer la présence d'ornièrage sous les traces des roues des voitures (c'est le cas typique des couloirs de bus) ;

- de la connaissance du passé de la rue.

Une fissure en bord de rive peut s'expliquer par un élargissement de la chaussée ayant eu lieu antérieurement. L'historique d'une rue est primordial pour déterminer la cause d'une dégradation. Le suivi des fouilles en est une composante

principale. Il permet de savoir de quand datent les fouilles, ce qui a été fait et où elles se situent exactement ;

- de la connaissance de la structure de la rue.

Savoir quels matériaux et quelles techniques ont été employés pour construire la fondation donne déjà une première idée à l'expert sur l'état de cette structure. On sait par exemple qu'une structure en graves-laitiers¹ est solide et résiste durant une trentaine d'années. Au contraire, des fondations en graine² condamne la rue à une vie brève et "mouvementée" ;

- de la date et du type de la dernière réfection.

La date de la dernière réfection détermine l'*âge de la rue*. Il est normal qu'une rue refaite en tapis de roulement il y a vingt ans soit abîmée. Elle a subi l'usure naturelle due au climat et au trafic. La fondation n'en est pas en cause pour autant.

Les constatations visuelles et ces renseignements permettent à l'expert de trouver, au mieux, la véritable cause d'une dégradation donnée, au pire de limiter la liste des causes possibles. Ces conclusions vont alors lui servir à réajuster l'opinion qu'il se fait de l'état de la fondation, en la remettant en cause ou en la confortant. Il procède ainsi, au fur et à mesure des analyses de dégradations et d'autres paramètres, à tâtonnement et par rectifications successives (cf. figure 2.1) jusqu'à l'obtention d'une solution qui corresponde à tout ce qu'il a pu observer. Le diagnostic est alors établi de façon plus ou moins sûre, en fonction de ce qu'il a pu déduire des dégradations observées et des informations qui sont à sa disposition. L'expert peut demander, en cas de doute, que des mesures complémentaires soient faites. Le déflectographe Lacroix est, pour le moment, le seul instrument de mesure qui soit utilisé. Il permet de déterminer la déformation de la chaussée sous une charge importante. Il renseigne sur la résistance de la structure : il est ainsi possible de savoir si celle-là est bonne ou pas. Les mesures fournies correspondant à des relevés ponctuels, seule une relative confiance peut leur être accordée. Il est également possible de procéder au prélèvement d'une carotte de chaussée, ce qui présente la fâcheuse conséquence de détériorer la chaussée et d'y introduire un point faible. Il est donc préférable de ne pas opter pour cette solution ou encore de profiter de fouilles en cours (ce dont l'expert ne se prive pas).

A la fin de cette étape, une analyse plus ou moins définitive des causes probables des dégradations a été élaborée ainsi qu'une appréciation de l'état de la chaussée. C'est à partir de ce diagnostic que l'on va choisir la réparation adéquate, tout comme un médecin détermine les médicaments à prescrire à un malade.

1. Mélange de graves et de laitiers aux propriétés pouzzolaniques. La grave est un mélange de granulats suivant une courbe granulométrique prédéfinie. Le laitier est un coproduit de la production de la fonte.

2. Matériau composé de petits cailloux blancs et d'une sorte de terre sableuse de couleur ocre jaune, qui entre souvent dans la composition des trottoirs ou des aires de jeu dans les parcs.

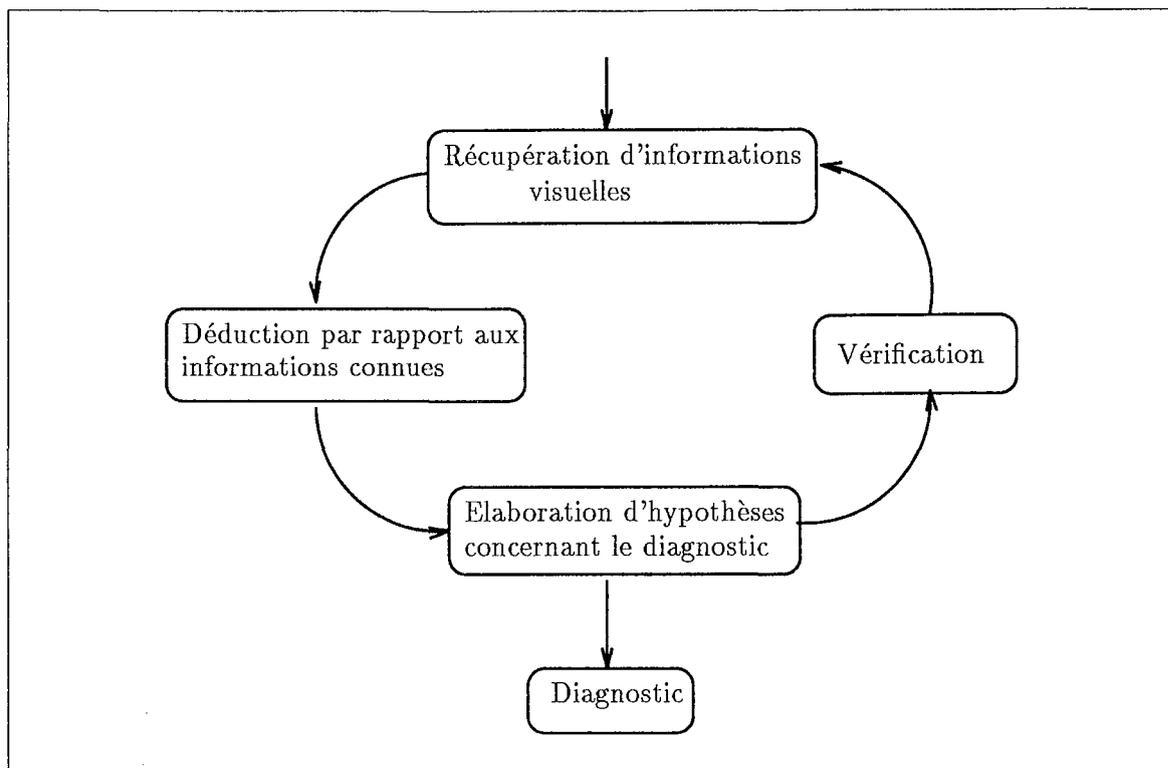


Figure 2.1. Cycle d'élaboration d'un diagnostic.

2.2.2 Choix du mode de réfection

L'expert a dressé une liste des rues observées, avec les causes des dégradations y apparaissant, lorsqu'il peut les déterminer. Il faut maintenant attribuer à chacune de ces rues un type de réparation (fondation, surface, maintenance ou aucune intervention) avant d'extraire celles qui vont effectivement être réparées, cela dans la limite du budget alloué.

Le degré de détérioration d'une chaussée est le critère essentiel que l'expert utilise pour déterminer le mode de réfection à appliquer. Il peut également avoir recours à d'autres critères, d'ordre physique ou stratégique, lorsque l'état de la chaussée ne lui permet pas de trancher pour un mode de réfection ou un autre. Ces paramètres peuvent faire en sorte que, à degrés de détérioration égaux, deux chaussées ne subiront pas la même réfection.

a - Les critères physiques

Outre l'état de la chaussée, on range dans cette catégorie l'état de la fondation, le type des dégradations, l'âge de la chaussée, les réseaux souterrains et le trafic. Il s'agit de paramètres directement liés à la rue :

- l'état de la chaussée, nous l'avons vu, est le premier critère de choix. Une rue très abîmée, dont les dégradations proviennent de la fondation, aura droit à une thérapie extrême (réfection en fondation) ;

- l'état de la fondation.

Si la fondation est composée de bons matériaux, ou s'il est connu qu'elle est en bon état, l'expert aura tendance à diminuer l'intensité du traitement même si des désordres qui a priori la mettraient en cause (par exemple les affaissements) apparaissent. Il préférera, dans pareil cas, traiter ponctuellement les gros défauts, refaire un tapis si le besoin s'en fait sentir, ou ne rien faire du tout ;

- le type des dégradations.

Une dégradation peut être due à un mauvais état de la fondation sans pour autant que cela implique le choix d'une réfection totale en fondation. C'est le cas des dégradations qui sont liées à des phénomènes naturels et inéluctables (celles dont la cause est évidente (cf. § 2.2.1)), eux-mêmes en liaison avec une composition particulière de la chaussée. Ces phénomènes surviennent très tôt, créant des dégradations sur les rues. Ils s'atténuent avec le temps et l'on finit par aboutir à un état stable de la chaussée. Le processus s'annihilant, il n'y a pas de raison de faire appel à une thérapie forte : cette dernière sera allégée (exemple : les affaissements dus au tassement des tranchées) ;

- l'âge de la chaussée.

Une chaussée se détériore avec le temps, le climat et le trafic. Une partie des dégradations inventoriées n'est donc pas le fait d'un problème particulier émanant de la fondation ou du tapis de roulement mais tout simplement de l'usure naturelle³. Le mode de réfection doit donc prendre en compte l'âge de la chaussée. Ainsi, une rue refaite en fondation il y a dix ans et très usée éveillera un doute chez l'expert. Il n'est en effet pas normal qu'une chaussée refaite à neuf il y a peu de temps soit abîmée à un tel point. Son état dénote alors un problème grave ;

- les réseaux.

Eux aussi subissent l'usure du temps. Leur densité et leur âge influent sur le choix de la thérapie. Mieux vaut limiter les dépenses, quitte à ne rien faire, si l'on sait que telle ou telle canalisation est très vieille et menace de "lâcher" à tout instant ; ou encore si les réseaux ont une densité élevée, ce qui augmente les risques de voir les concessionnaires intervenir dans un temps relativement proche.

Si l'on souhaite vraiment investir, il faudra passer des accords avec les différents propriétaires de réseaux de façon à ce que toute canalisation soit mise à neuf avant la réfection de la chaussée. Sauf accident imprévisible, la pérennité de la chaussée (et ainsi la rentabilité de l'investissement) devrait alors être assurée ;

3. Nous rejoignons ici la notion de phénomène naturel vue auparavant.

- le trafic.

Les chaussées sont plus ou moins sollicitées selon qu'il y a plus ou moins de trafic et que celui-ci est plus ou moins lourd. La thérapie varie donc dans le même sens que la quantité et le type du trafic ("véhicules légers", "poids lourds", "les deux"). Il y aura une certaine tendance à diminuer l'importance de la réparation sur une rue à faible trafic (par exemple une desserte de quartier) même si la fondation est un peu touchée (à condition qu'elle ne le soit pas trop). L'expert estime en effet que ce type de chaussée ne sert qu'à très peu de gens, ne supporte aucun effort et ne doit, de ce fait, pas engendrer de grosses dépenses d'argent. La fondation présente est jugée suffisante pour le peu de charges qu'elle a à supporter.

b - Quelques critères stratégiques

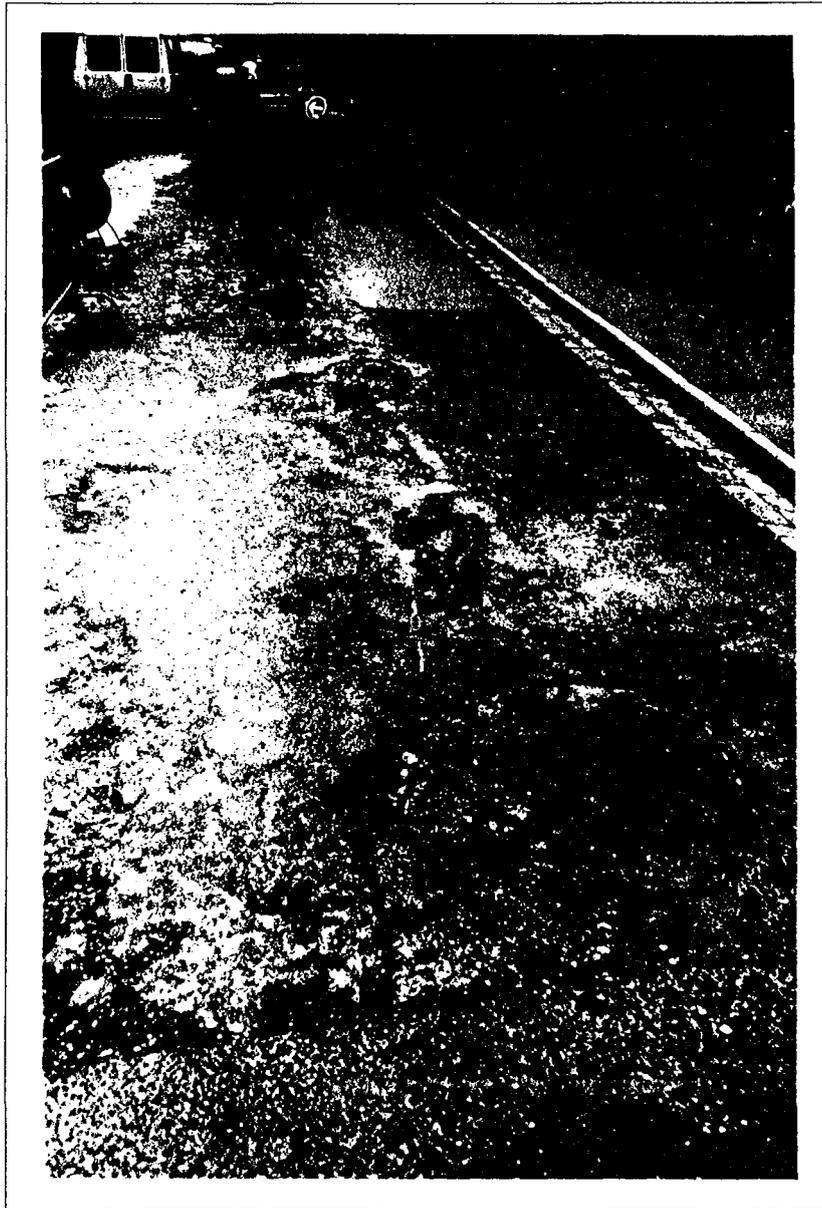
Ces critères sont rattachés à la politique en matière de voirie urbaine de la municipalité de Nancy ou à des lignes de conduite que l'expert s'est fixées. Ils interviennent plutôt pour décider des priorités entre rues mais peuvent également influencer, dans une moindre mesure, sur le choix du mode de réfection. Il s'agit d'aménagements programmés, à prévoir ou prévisibles sur la chaussée (modification de son profil) ou autour de la chaussée (tous chantiers, constructions ou fouilles), qui doivent avoir lieu à plus ou moins brève échéance. Les services techniques en ont connaissance, pour partie d'entre eux parce qu'ils en sont les maîtres d'œuvre. Le fait de savoir que de tels travaux doivent survenir prochainement a pour effet, dans un premier temps, de différer toute réfection sur une chaussée. Mais cela peut porter davantage à conséquence et aller jusqu'à remettre en cause le type de réfection initialement retenu. Ainsi, si une modification du profil d'une chaussée est envisagée (par exemple, réaménagement du parking, plantations d'arbres, ...), l'expert préférera détruire l'ensemble de la chaussée pour la reconstruire plutôt que de s'en tenir à une réfection moindre : les aménagements prévus obligent déjà à empiéter sur le corps de chaussée, autant tout refaire à neuf.

c - Un exemple de choix de mode de réfection

Nous tenons ici à illustrer la démarche experte en matière de choix du mode de réfection. Ce que nous souhaitons avant tout montrer est que les paramètres que nous avons décrits ci-dessus ne sont pas tous systématiquement utilisés. L'expert les considère en fonction de ses besoins, dans un ordre qui nous échappe encore à l'heure actuelle.

Considérons la rue de la figure 2.2.2. Elle présente un cas de désenrobage très avancé, arrivé au stade ultime, même, puisque la fondation est visible sous l'enrobé.

Elle est considérée comme étant très abîmée. Or, le mode de réfection qui a été retenu se limite à une réfection en surface (la couche de roulement est à refaire.). L'état de la chaussée est en effet dû à son âge (elle a 19 ans) et probablement au fait qu'elle a initialement été mal faite (elle est en effet trop abîmée pour que son seul grand âge puisse expliquer cet état). De plus, il s'agit d'une chaussée située dans un quartier



résidentiel : le trafic y est faible (limité aux seuls riverains). Une réfection en surface est donc largement suffisante.

2.2.3 Choix des chaussées à refaire

Il semblerait logique, *a priori*, que les chaussées les plus touchées soient les “heureuses élues” et subissent la réfection la plus importante. Le degré de détérioration intervient en effet dans le choix des rues à traiter. Mais il n’est pas le seul critère. D’autres, d’ordre stratégique ou économique, sont également pris en compte. Ces critères marquent le côté subjectif du choix de la thérapie. Ils regroupent les priorités établies par la politique de réfection que s’est fixée la municipalité et des facteurs di-

vers qui perturbent le choix du remède. La terminologie de paramètres extérieurs leur sied parfaitement puisqu'ils ne désignent pas quelque chose de directement rattaché à une rue mais quelque chose qui influe sur une rue depuis l'extérieur.

a - Les priorités définies par la ville

Elles interviennent à un niveau supérieur à celui des critères physiques présentés précédemment, une sorte de "méta-niveau", puisqu'elles traduisent les objectifs à moyen terme de la commune. Elles ont été déterminées dans un même but : celui de contenter les usagers. On doit pouvoir rouler agréablement à Nancy.

La ville a choisi de mettre en avant deux catégories de rues et a décidé de mesures définissant des contraintes dans le choix des rues.

1. *Priorité aux grands axes de circulation.*

Les rues très circulées de la ville doivent être traitées les premières. La municipalité souhaite assurer la sécurité et le confort des nombreux usagers qui empruntent les routes principales. Celles-ci comportent les routes qui permettent de relier Nancy à son agglomération, le centre-ville aux différents quartiers résidentiels, et les grands axes de liaison. Il s'agit principalement des rues qui permettent l'accès à la ville et des grosses artères qui en assurent la traversée.

Ce choix retrace la volonté de désengorger ces voies, d'assurer la fluidité du trafic : la vitesse y étant relativement élevée, les risques d'accident sont ainsi limités .

2. *Priorités liées à l'urbanisme.*

On a choisi de favoriser les rues qui ont un statut important dans la hiérarchie de la voirie nancéenne. Il s'agit des voies qui ont un centre d'intérêt historique, culturel ou commercial et vers lesquelles les usagers vont converger.

La première mesure s'adressait plus particulièrement aux habitants de l'agglomération nancéenne ; celle-ci veut toucher un plus vaste public en englobant les visiteurs, touristes, ... Le prestige de la ville est en jeu. Aussi une campagne de réfection et d'embellissement des rues de la vieille ville, cœur historique de Nancy, est-elle menée de front avec celle de réhabilitation d'anciens immeubles et de certains quartiers, noircis par le temps. La réparation d'une chaussée est un stimulant pour la restauration des façades, lorsqu'elle la précède ; elle est son complément indispensable lorsqu'elle la suit.

De par leur environnement, les rues ont des priorités. Par souci de l'image de marque de la ville, elles seront refaites et, si les aménagements prévus sont conséquents, la thérapie pourra même être renforcée : les chaussées seront entièrement reconstruites. L'environnement influe donc non seulement sur le choix des chaussées à refaire mais peut également influencer sur la façon de les refaire .

3. *Répartition équitable entre les différents quartiers.*

Nancy est divisée en douze quartiers. Le gestionnaire en voirie va tenter de refaire au moins une rue par quartier, afin de contenter un maximum de personnes. Cette mesure contribue à stimuler l'action des commissions de quartier qui collaborent à la gestion de la voirie en signalant toute grosse dégradation, en regroupant les mécontentements et surtout en assurant un rôle de médiation entre la municipalité et ses habitants.

4. *Continuité dans le choix du lieu de réfection.*

Cette volonté de continuité relève de la logique. On ne refait pas aléatoirement des portions de chaussée. Lorsque des travaux sont entrepris, une année, sur un axe comprenant plusieurs rues nécessitant toutes des réparations, il semble logique de poursuivre sur le même axe, l'année suivante, et ainsi de suite jusqu'à en atteindre la fin. La politique de réfection doit être cohérente et apparaître comme telle aux yeux des gens.

Une priorité est donc attribuée aux rues prolongeant des chaussées déjà refaites ou attendant à de telles chaussées.

b - Autres critères stratégiques

Nous avons déjà présenté ces critères en 2.2.2, en insistant davantage sur le côté "choix du mode de réfection". Nous décrivons ici leur aspect "choix des chaussées". Il s'agit, nous l'avons vu, de travaux d'aménagements sur une chaussée. Les chaussées sont soumises à rude épreuve, lors de tels travaux, et se détériorent beaucoup plus vite. Y investir serait du gaspillage. Toute intervention conséquente est donc reportée. Il faut cependant songer à maintenir ou réassurer une qualité minimale de la chaussée en matière de confort et sécurité, tout en limitant les dépenses. Des réparations temporaires et peu coûteuses sont donc envisagées, permettant aux chaussées de résister le temps des travaux. Citons, à titre d'exemple, les aménagements des bords de la Meurthe. Dans la zone concernée, les réfections en voirie ont été gelées pour cinq ans, durée prévue des travaux.

c - Les critères financiers

Le budget ne doit pas intervenir dans le choix de la réfection. Il n'est pas question de refaire une rue qui a besoin d'une nouvelle fondation en tapis de roulement uniquement par manque de budget. Il est alors préférable de laisser la rue telle qu'elle est et de revoir le problème l'année suivante. D'ailleurs, cela ne constituerait pas une économie mais du gâchis d'argent puisque la rue se détériorerait beaucoup plus vite.

Le budget ne sert en fait qu'à arrêter la liste des rues à refaire. Il est le dernier critère à intervenir et le plus absolu, celui qu'on ne peut transgresser.

L'expert considère donc tous ces paramètres avant d'établir une première liste de réparations, financièrement calquée sur l'année précédente (il dispose pour cela d'une

fourchette de coûts au mètre carré de chaque type de réparations). Il commence par examiner pêle-mêle tous ceux concernant une rue, puis ceux concernant l'ensemble des rues (répartition équitable par rapport au quartier, continuité, priorité aux gros travaux en début de mandat) avant de s'attaquer au budget.

La liste obtenue tente de respecter au mieux les différents critères. Ces derniers étant fortement corrélés les uns aux autres, certains peuvent être satisfaits en faveur ou au détriment d'autres. Le degré de satisfaction doit cependant être maximal.

2.2.4 Choix techniques

L'expert a alors la lourde tâche de choisir les matériaux et les techniques à mettre en œuvre pour la réalisation des travaux de voirie, matériaux et techniques qui correspondent au type de réparation choisi. Les techniques ne posent pas de gros problèmes. Elles sont en nombre limité et sont liées au type de réparation. Le seul point délicat concerne le dimensionnement d'une chaussée (cf. 1.1) dans le cas d'une réfection en fondation. La tâche est plus ardue pour le choix des matériaux. L'expert doit en effet trouver, parmi la foule de produits existants, les meilleurs.

a - Les meilleurs au sens des objectifs de la ville

Les matériaux ont des caractéristiques physiques propres (solidité, résistance à l'eau, ...). En fonction de ces caractéristiques, ils répondent plus ou moins aux objectifs visés par la ville (cf. 1.1). L'expert recherche donc ceux qui cumulent le maximum de qualité allant dans le sens de ces objectifs. Par exemple, si l'on souhaite la pérennité d'une chaussée à fort trafic, on évitera la graine comme matériau de fondation. Elle a en effet une fâcheuse tendance à se gorger d'eau.

De même, l'emploi d'un enrobé⁴ composé de cailloux de faible granulométrie est à proscrire sur une voie où la vitesse est relativement élevée. La taille des granulats serait trop petite pour assurer une rugosité suffisante à la chaussée et, par là-même, la sécurité des automobilistes.

b - Les meilleurs pour le site d'utilisation

L'influence de l'environnement joue, ici aussi, un rôle important. Il faut adapter les matériaux au site dans lequel on se trouve. Pour la vieille ville, c'est principalement l'esthétique qui est recherchée en respectant le caractère historique et le style de construction des maisons, d'où le choix de pavés en granit. Pour un quartier résidentiel assez circulé, on choisit un revêtement limitant le bruit. Pour une zone fréquentée par des enfants, la sécurité est privilégiée en augmentant la rugosité de la chaussée. Chaque site est lié à un critère (sécurité, esthétique, confort ...) qu'il faut retrouver dans les caractéristiques du type de matériaux employés.

Une certaine homogénéité doit également être recherchée dans un but d'esthétique.

4. Mélange de bitume et d'agrégats (dont une certaine quantité de fines).

Cela suppose alors de choisir des revêtements en apparence identique dans les différents secteurs de la ville.

c - Les meilleurs, aux sens du rapport qualité-prix

Il s'agit ici de résoudre le problème du rapport qualité/prix. L'expérience a prouvé qu'il y avait des économies qu'il vaudrait mieux ne pas faire. Citons, à titre d'exemple, les bordures en béton dont le prix est intéressant, comparé à celui des traditionnelles bordures en granit. Elles n'en ont cependant pas les qualités de résistance au gel et s'effritent après n'avoir subi les rigueurs que de peu d'hivers, se révélant finalement beaucoup plus chères puisque leur remplacement survient beaucoup plus tôt.

Cela ne veut pas dire non plus qu'il faut systématiquement prendre ce qu'il y a de plus cher. La gamme de matériaux existants est si vaste qu'il est possible de trouver d'excellents produits à des prix raisonnables. Par exemple, les rues piétonnes et commerciales du centre sont équipées de pavés auto-bloquants. De tels pavés ont été choisis pour l'esthétique et parce qu'ils sont trois fois moins chers que les pavés de granit. Ils seront de plus tout aussi résistants vu la charge quasi nulle qu'ils auront à supporter.

Il ne faut pas non plus perdre de vue le critère de réutilisabilité des matériaux. Un pavé de granit est certes cher mais inusable, ou presque. Il ne sera donc jamais jeté mais stocké et réemployé. D'autres matériaux sont également recyclables mais avec davantage de difficultés. Investir dans un matériau durable est un aspect attrayant pour le gestionnaire en voirie, même si la dépense est plus élevée initialement.

d - Limitation des choix en matériaux

L'étape des choix techniques demande donc un travail colossal (du fait de la quantité de matériaux existants, du nombre de sites divers, ...) et répétitif. Il faut en effet recommencer les mêmes opérations autant de fois qu'il y a de rues au planning provisoire. L'expert a donc fini par la réduire considérablement. Des habitudes se sont installées. Seules deux ou trois variétés de produits différents sont habituellement utilisées. L'expert se cantonne dans leur utilisation car il sait que ces produits fourniront entière satisfaction. Ils constituent en effet un compromis entre les différents critères qui ont été présentés ci-dessus (environnement, respect des objectifs de la ville, ...). Il se dégage donc une certaine uniformité dans le choix des matériaux.

Matériaux et techniques étant choisis, l'expert peut alors procéder au calcul exact du montant des travaux et à un encadrement de ce qu'il était prévu de faire dans les limites du budget. La liste définitive des rues à réparer est alors arrêtée.

2.3 Ce que nous n'avons pas dit et qui complique tout

Nous avons dit, lors de la présentation de la phase diagnostic (cf. 2.2.1), que l'expert utilise des informations telles que type et date de la dernière réfection, historique des rues, structure de la chaussée, etc. Or, si les âges des rues sont généralement connus, il n'en va pas de même pour les autres informations. En effet :

- rares sont les rues dont la composition de la fondation est connue. Il faut alors essayer de trouver une personne membre du service voirie qui s'en souviennne parce qu'elle a participé à la réfection. Les rues datant presque toutes d'il y a au moins dix-huit ans, cette quête est vouée à l'échec avant même d'avoir commencé ;
- de même, si la date de la dernière réfection entreprise sur une chaussée est répertoriée, ce qui a été fait lors de cette dernière réfection est, en général, tombé dans le domaine de l'oubli ;
- l'historique subit le même sort, pour les mêmes raisons. Il est cependant à noter qu'un effort est fait pour ce qui est des fouilles. Une mémoire informatique conserve, à la mairie de Nancy, la trace de toute fouille survenue en trottoir ou en chaussée depuis 1986.

Et ces informations peuvent ne pas être les seules à manquer. L'expert en est donc conduit à devoir émettre des hypothèses. Les "il ne doit pas y avoir grand chose là-dessous⁵ mais la chaussée tient." et autres "je ne sais pas ce qui a été fait lors de la dernière réfection mais il ne s'agissait sûrement pas d'une fondation."⁶ sont fréquents dans les verbalisations concernant sa démarche. Son raisonnement est fondé sur ces suppositions, suppositions qu'il cherche à conforter par ce qu'il voit, par ce qu'il parvient à savoir. Il est donc confronté au problème de l'information incomplète, ce qui vient compliquer la tâche de modélisation qui nous attend.

D'autres facteurs rendent également cette tâche plus complexe. Tout d'abord, nous pouvons remarquer que les problèmes de choix des rues et du type de réfection ne sont pas dissociés. Il est, à la limite, possible de considérer que le premier est inclus dans le second dans le sens où ne pas mettre une rue au planning revient à choisir la thérapie "ne rien faire pour l'instant". Il y a inter-dépendance : en jouant sur le remède, on joue sur le choix des rues par le biais du budget. Ainsi, si la rue X est refaite en fondation, la rue Y ne pourra plus être refaite ; au contraire, si l'on renonce à la fondation pour X, l'argent dégagé sera pour Y. Les deux notions ne sont pas franchement délimitées : il va donc falloir trouver un compromis entre les paramètres qui influent sur l'une, l'autre ou les deux, de façon à obtenir une solution satisfaisante au double problème de choix.

5. C'est-à-dire, sous la couche de roulement.

6. Les énoncés que nous rapportons ici sont ceux de l'expert et sont issus de diagnostics qu'il a établis en notre présence, *in situ*.

Ensuite, il faut noter le fait que la démarche n'est pas toujours aussi rigoureuse que présentée auparavant. Certaines étapes peuvent être inexistantes ou atrophiées. L'examen visuel peut, par exemple, être réduit à une seule appréciation de l'aspect général de la rue, sans être suivi d'un diagnostic complet et détaillé, pour une rue appartenant à une zone gelée⁷. Les résultats d'un tel diagnostic sont en effet inutiles dans pareil cas puisqu'aucune autre procédure ne va être engagée.

De même, les critères physiques et stratégiques (cf. 2.2.2 et 2.2.3) ne sont pas tous systématiquement pris en compte. Un critère peut, dans certaines situations, être suffisamment important pour qu'il soit inutile de considérer les autres. De plus, ils sont utilisés pêle-mêle, sans ordre prédéfini et il est bien difficile de juger a priori de leur importance les uns par rapport aux autres.

La démarche experte en voirie urbaine est donc sous l'influence d'un grand nombre de paramètres dont certains interviennent à plusieurs niveaux dans le raisonnement. Elle n'est pas toujours très rigoureuse et il est parfois difficile de déterminer les limites d'une étape, ou celles de la portée d'un paramètre.

Ce que nous avons rapporté dans l'ensemble de ce chapitre, est issu de ce que nous avons pu constater au tout début de l'acquisition des connaissances, dans les rues de Nancy. Notre vision des choses s'est ensuite petit à petit affinée, au fur et à mesure de nos rencontres avec l'expert et la démarche experte a ainsi pu être explicitée. Le chapitre suivant montre comment elle a été modélisée, à l'aide du générateur de système multi-agents ATOME.

7. Secteur où l'on sait à l'avance qu'aucune réparation ne sera faite.

3

Le système expert ROSY

Nous abordons ici la partie réalisation de l'application. L'objectif visé dans le projet ROSY est de reproduire toute la démarche experte en voirie urbaine, depuis l'analyse de la surface des chaussées jusqu'à l'établissement de la liste définitive des rues à refaire [Ferraris *et al.* 89]. Etant donné la complexité de la tâche (des domaines de compétence multiples à modéliser, des données visuelles à formaliser, ...), nous nous sommes limités, dans le cadre de cette thèse et conformément à la démarche que nous décrivons au chapitre 3 de la partie III, à définir l'ensemble des compétences qui entrent en jeu et à approfondir une de ces compétences, le diagnostic. Nous avons abouti à la version actuelle du système ROSY où :

- les blackboards sont définis¹ ;
- le découpage en tâches a été réalisé ;
- le raisonnement a été modélisé pour les tâches d'initialisation et de diagnostic. Elles ont été découpées en spécialistes, l'expertise de chacune de ces spécialistes ayant été acquise et codée. Nous avons également travaillé à expliciter le contrôle de ces tâches sur les spécialistes, reproduisant ainsi la démarche experte au sein de chaque tâche.

Nous sommes actuellement au terme de la tâche de diagnostic. Des validations locales des connaissances du système ont été réalisées (règles de spécialistes, complétude des données des blackboards) et une validation de la globalité du raisonnement ne saurait tarder (cf. chapitre 4). Le raisonnement des autres tâches sera intégré dans les versions à venir du système ROSY.

Nous présentons dans la suite de ce chapitre, ce qui correspond aux réalisations mentionnées ci-dessus, à savoir les blackboards de l'application, les diverses sources de connaissances identifiées (tâches et spécialistes), l'architecture actuelle de ROSY, ainsi que le raisonnement mené au sein de la tâche de diagnostic [Ferraris *et al.* 90]. Nous nous limiterons, pour cette dernière, au cas général des chaussées qui ne comportent pas d'aménagements programmés.

1. Nous verrons au chapitre 3 de la partie III que, étant donné la démarche de développement que nous suivons, la structure des blackboards est susceptible d'être enrichie à tout instant. Elle ne sera définitive que lorsque l'ensemble du SE arrivera à terme. Il en est de même pour le découpage en sources de connaissances.

3.1 Les blackboards de l'application

La tâche de maintenance en voirie urbaine fait appel à la manipulation d'une grande quantité de données concernant les rues et les dégradations. Celles-ci ont été recensées lors de la phase d'acquisition des connaissances de l'expert (cf. 2, partie III). Les entités de base manipulées par l'expert sont au nombre de trois :

- le *tronçon*, portion de rue allant d'un carrefour à un autre, composé de une ou plusieurs chaussées (couloir de bus, couloir VL, ...),
- la *chaussée* et toutes ses caractéristiques (données visuelles permettant de la décrire, tels les profils, l'homogénéité ou encore les dégradations qui apparaissent à la surface, mais aussi la quantité de trafic et son type, les réseaux souterrains, la composition de la fondation, le passé de la rue parfois bien utile pour expliquer la formation d'une dégradation, *etc.*),
- les *dégradations* et leurs causes principales. C'est dans la liste des causes possibles attachées à une dégradation que l'on cherchera à identifier celle qui est responsable de la dégradation en question sur le tronçon traité.

Les dégradations et les causes que nous avons retenues ainsi que les associations entre ces deux entités sont issues de [Ministère 87], de l'observation de l'expert sur le terrain et de longs entretiens avec lui.

Nous l'avons dit, la structure des blackboards est conditionnée par l'avancement de la modélisation du raisonnement. Elle dépend également des possibilités de représentation offertes par ATOME. Dans l'état actuel des choses, notre choix s'est arrêté aux structures dont la description suit.

3.1.1 Le blackboard RUE

Le blackboard RUE regroupe tous les renseignements propres aux tronçons. Il est divisé en plusieurs niveaux rattachés les uns aux autres par des liens. Chaque niveau correspond à un type de données et regroupe tous les objets de ce type (par exemple, le niveau trafic décrit le trafic de chacune des chaussées enregistrées). Les liens sont des relations entre deux types d'objets (par exemple, le lien *contient_chaussées* va relier un tronçon donné aux chaussées dont il est composé). Il est ainsi possible de retrouver tous les objets correspondant à une même chaussée via un réseau de liens.

La figure 3.1 donne une représentation de ce blackboard sous la forme d'un pseudo-schéma entités-associations. Les flèches représentent les relations entre les niveaux et correspondent aux liens-ATOME. Nous avons mentionné les cardinalités de ces relations.

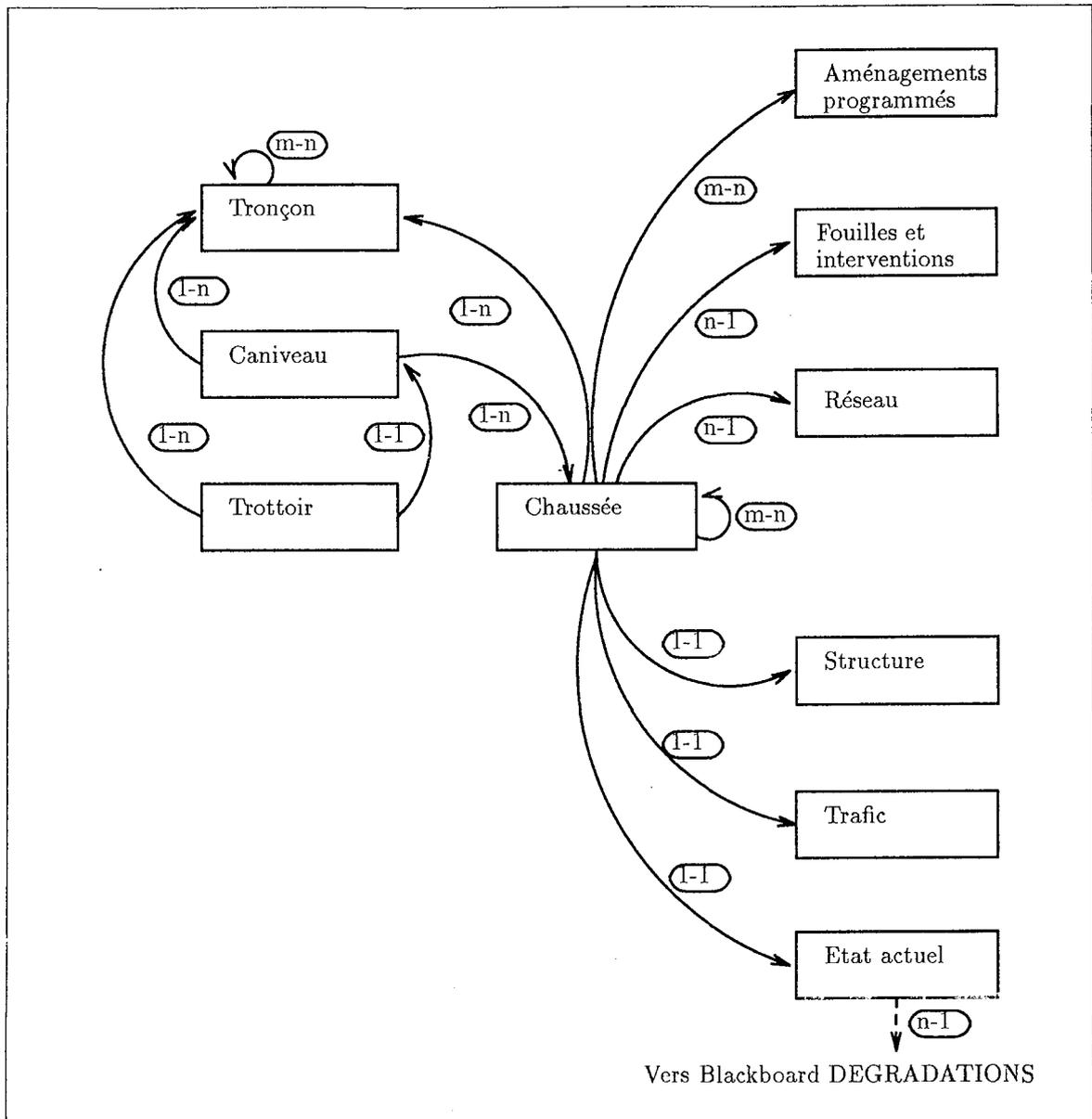


Figure 3.1. Le blackboard RUE.

Nous présentons les différents niveaux dans ce qui suit. Ces niveaux répertorient, outre la description des chaussées, les données dont nous avons parlé tout au long de 2.2 (critères physiques, stratégiques et informations servant au diagnostic visuel). Nous ne détaillerons les attributs et liens que du premier niveau, à titre d'exemple. Ceux des autres niveaux sont rassemblés en annexe A.1.

- Le niveau *Tronçon*.

Il regroupe toutes les caractéristiques d'un tronçon et permet de resituer les chaussées qui le composent dans leur environnement urbain. Ses composantes sont décrites sur la figure 3.2. Au même titre que le niveau *Chaussée*, des niveaux *Trottoir* et *Caniveau* doivent être définis. Eux aussi vont comporter un

Nom de la rue
Numéro de la rue
Situation géographique
Nom du quartier
Environnement (commerces, écoles, zone d'urbanisme,...)
Description du sol support
Longueur
Pente (< 5% / 5-10% / > 10%)
CONTIENT_CHAUSSÉES : <i>lien vers le niveau Chaussée</i>
CONTIENT_TROTTOIRS : <i>lien vers le niveau Trottoir</i>
CONTIENT_CANIVEAUX : <i>lien vers le niveau Caniveau</i>
ATTENANT_A : <i>lien vers le niveau Tronçon</i>

Figure 3.2. Attributs et liens du niveau *Tronçon*.

lien *Fait_partie_de* les rattachant au niveau *Tronçon*. Des liens *A_cote_de* (ou *Attendant_à*) permettront de relier chaussées, trottoirs et caniveaux.

- Le niveau *Chaussée*.

Le niveau *Chaussée* rassemble toutes les informations qui permettent de décrire une chaussée. On y trouve aussi bien des informations statiques (par exemple, la largeur de la chaussée) que dynamiques (par exemple, la description des profils). Ces dernières devront être mises à jour lors d'un relevé de dégradations, opération de collecte des informations décrivant l'état d'une chaussée. Cela se fait sur le terrain par portions de dix mètres, de manière à faciliter la tâche à la personne qui effectue ce relevé.

- Le niveau *Structure*.

Ce niveau renseigne sur la composition et l'état de la structure (ou fondation) d'une chaussée en répertoriant les différentes couches de matériaux qui la composent ainsi que leurs épaisseurs.

- Le niveau *Trafic*.

Il décrit le type et la quantité de trafic sur une chaussée donnée.

- Le niveau *Etat_Actuel*.

Il s'agit là d'un niveau particulier puisqu'il permet de relier une chaussée aux dégradations qui y apparaissent. Il fait également office de zone intermédiaire dans laquelle sont stockées les éventuelles plaintes des usagers ainsi que toute mesure ayant été faite sur la chaussée (par exemple, des mesures de déflexion). Il comporte de plus des références qui permettront de visualiser la chaussée et

ses dégradations sur vidéodisque².

- Le niveau *Réseau*.

L'état des réseaux se trouvant dans le sous-sol d'une chaussée (eau, gaz, assainissement, ...) conditionne fortement le choix du mode de réfection (cf. 2.2.2). Aussi avons-nous été amenés à introduire le niveau *Réseau* de façon à disposer de renseignements sur ces réseaux, notamment leur situation dans le corps de chaussée et un attribut indiquant leur état. Ce dernier peut-être renseigné avant que le diagnostic ne soit fait ou au cours du diagnostic.

- Le niveau *Fouilles_et_interventions*.

Ce niveau recense tous les travaux qui ont été entrepris sur ou dans une chaussée depuis sa dernière réfection, dans la limite des informations actuellement disponibles à la mairie de Nancy. Il peut servir, par recoupement d'informations, à expliquer la présence d'une dégradation. Il "suffit" pour cela de tenter de rapprocher la situation d'une dégradation de celle d'une fouille³. Il peut également être un des éléments qui va permettre d'émettre une opinion sur l'état d'un réseau. Ces informations, outre dans la mémoire des personnels municipaux, trouvent également refuge dans le fichier des fouilles. Celui-ci devrait, à plus longue échéance, alimenter ce niveau.

- Le niveau *Aménagements_Programmés*.

Nous trouvons, dans le niveau *Aménagements_Programmés*, une trace des travaux dont on sait qu'ils auront lieu à brève échéance (un à deux ans au maximum) sur une chaussée donnée. La présence de telles informations reportera à plus tard (après travaux) toute réfection conséquente sur la chaussée en question (cf. les critères stratégiques de 2.2.3). Seules des opérations de réhabilitation de la chaussée pour la maintenir dans un état correct (de petite envergure et, donc, peu onéreuses) seront entreprises.

3.1.2 Le blackboard DÉGRADATIONS

Le blackboard DÉGRADATIONS (cf. figure 3.3), rassemble des renseignements de deux types sur les dégradations. On trouve d'une part des données conceptuelles qui recensent les différents types de dégradation ainsi que les causes possibles de celles-ci, d'autre part des données qui permettent de décrire directement les dégradations qui se trouvent sur une chaussée. Une liste des dégradations et de leurs causes, retenues suite à de nombreux entretiens avec les experts et de nombreuses études de cas, est fournie en annexe B. La description des niveaux de ce blackboard, principalement ceux décrivant les dégradations sur le terrain, nous a posé de sérieux problèmes, dont certains ne sont toujours pas résolus à l'heure actuelle. Nous avons en effet été confrontés simultanément à la représentation de données visuelles, à la quantité et la représentativité de

2. La mairie de Nancy dispose, sur vidéodisque, de photographies de l'ensemble des chaussées nancéennes. Une photo a été prise pour chaque portion de dix mètres.

3. Cela n'est fait, bien entendu, que lorsque la fouille n'est pas apparente sur la chaussée.

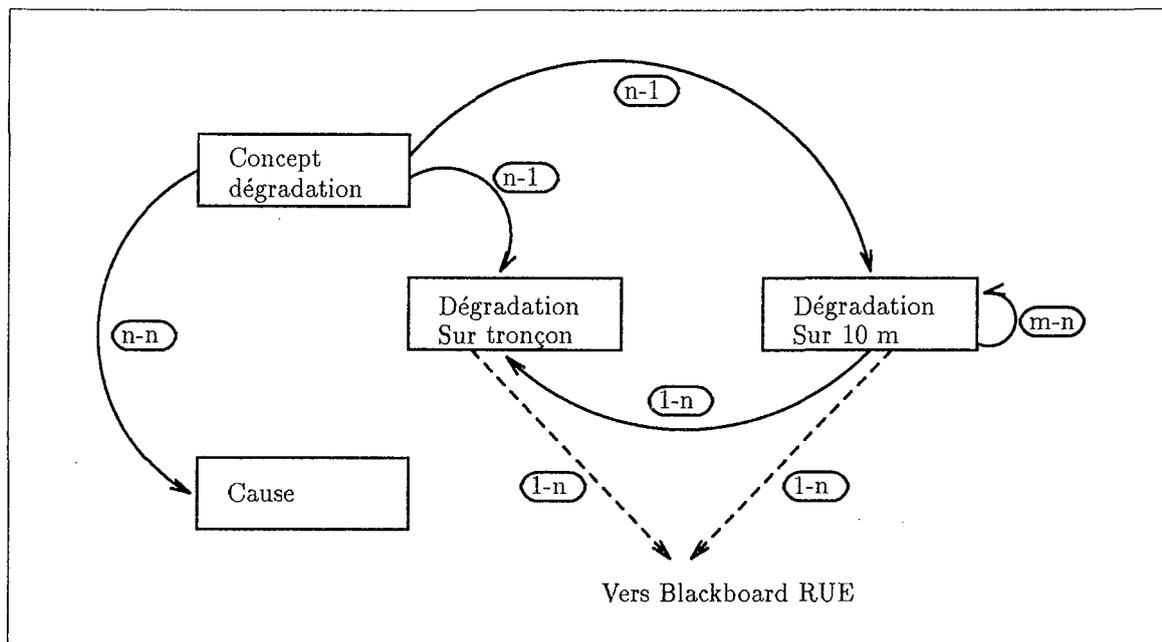


Figure 3.3. Le blackboard DÉGRADATIONS.

ces données, à leurs divers types, ..., sans compter la volonté de rationaliser le processus de décision (d'où une plus grande quantité de données nécessaires). Ces problèmes, que nous détaillons dans la partie IV, nous ont conduit à de nombreuses remises en cause de la structure de ce blackboard. Notre choix s'est pour l'instant arrêté sur les niveaux suivants :

- Le niveau *Concept_Dégradation*.

Nous avons identifié dix-sept dégradations différentes que l'on trouve plus ou moins fréquemment sur les rues de Nancy. Elles sont décrites en tant que concept de référence par les informations de la figure 3.4. Les nœuds de ce niveau correspondent en quelque sorte à des classes d'objets dont les instances sont les dégradations observées sur le terrain (modélisées par les niveaux *Dégradations_sur_tronçon* et *Dégradations_sur_10_mètres*).

- Le niveau *Cause*.

Le niveau *Cause* répertorie les causes éventuelles de dégradations, causes que les experts ont souhaité retenir. A chaque cause est associée une liste de dégradations que la cause en question est susceptible de provoquer et vice-versa. Cette association permettra de retrouver à quelle cause une dégradation est due, vu sa situation sur la chaussée, son étendue, les dégradations qui sont à proximité, etc. Ce niveau est caractérisé par les attributs et liens de la figure 3.5.

- Le niveau *Dégradations_sur_10_mètres*.

Le niveau *Dégradations_sur_10_mètres* est le seul niveau du blackboard DÉGRADATIONS qui soit directement accessible à l'utilisateur. Ce dernier alimente en

<p>Nom de la dégradation</p> <ul style="list-style-type: none"> - (Pelade/ Désenrobage/ Nid de poule/ Nid de poule traité/ Ruine) pour la sous-classe <i>Arrachements</i> - (Affaissement/ Orniérage / Bosse) pour la sous-classe <i>Déformations</i> - (Faïençage/ Longitudinales/ Transversales/ En_dallot/ Aléatoires/ Au_droit_de_joints/ Disjointoiement_de_pavés) pour la sous-classe <i>Fissures</i> - (Glacage/ Ressuage) pour la sous-classe <i>Remontées</i> <p>Description</p> <p>Famille (Arrachements/ Déformations/ Fissures/ Remontées)</p> <p>Origine (Fondation/ Surface/ Inconnue)</p> <p>Type de chaussée (une à cinq valeurs à prendre dans l'ensemble {souple, rigide, semi-rigide, pavée, enduit superficiel})</p> <p>Importance/sécurité</p> <p>Importance/confort</p> <p>Importance/pérennité</p> <p>Causes_probables : <i>liste des causes susceptibles de provoquer la dégradation en question</i></p> <p>DONNE_NAISSANCE_A : <i>lien vers les niveaux Dégradations_sur_tronçon et Dégradations_sur_10_mètres de ce même blackboard.</i></p>
--

Figure 3.4. Attributs et liens du niveau *Concept_Dégradation*.

<p>Nom de la cause</p> <p>Description rapide</p> <p>Description détaillée du processus complet</p> <p>Catégorie (Fouilles/Usure naturelle/Mise en œuvre/Accident/Passé de la rue)</p> <p>Origine (une à deux valeurs à prendre dans l'ensemble {Fondation, Surface})</p> <p>Condition_de_rejet (<i>prédicat</i> : s'il est vrai alors la cause est à rejeter)</p> <p>Condition_suffisante (<i>prédicat</i> : s'il est vrai alors on est sûr d'avoir trouvé la bonne cause (ou une des bonnes causes))</p> <p>Est_cause_de : <i>liste de Concepts_dégradations pouvant être provoqués par la cause en question.</i></p>
--

Figure 3.5. Description du niveau *Cause*.

effet le système en fournissant les renseignements répertoriés dans ce niveau, à raison d'un enregistrement par dégradation et par portion de dix mètres linéaires de chaussée. Ce niveau a été introduit, initialement sur proposition des experts⁴, dans le but :

- de faciliter la tâche à la personne qui relève, sur une chaussée donnée, les informations demandées par le système. Les premiers essais de relevé de dégradations sur le terrain se faisaient à raison de un enregistrement par dégradation pour l'ensemble de la chaussée. Le "releveur" avait alors beaucoup de mal à évaluer la plupart des paramètres à fournir (étendue, dégradations à proximité, ...);
- d'augmenter la représentativité de certains relevés. Les difficultés évoquées précédemment conduisaient à des relevés approximatifs, voire inexacts, et non représentatifs de la situation sur la chaussée;
- de prendre en compte certains phénomènes sur la chaussée qui ne se retrouvaient pas dans un relevé global. On ne pouvait, par exemple, pas représenter ni repérer des problèmes ponctuels graves.

Tous les enregistrements ainsi créés ne sont pas analysés dans l'étape de diagnostic vu la quantité de données qu'il faudrait traiter et, pour certaines, le peu d'intérêt que cela pourrait représenter. Ces données sont donc fusionnées entre elles, dans la mesure du possible et à caractéristiques égales, de façon à n'obtenir plus que le strict minimum nécessaire à une bonne représentation de l'état de la chaussée. Le résultat d'une fusion est un nœud du niveau *Dégradations_sur_tronçon*.

Nous pensions ainsi réduire considérablement la quantité d'informations à traiter. Or, le fait de chercher non seulement à reproduire le raisonnement expert mais également à rationaliser le processus de décision oblige à conserver des détails et une précision qui disparaîtraient dans une opération de fusion (voir la façon dont est faite la synthèse, au paragraphe suivant). La fusion se réduit donc, dans bien des cas, à une recopie⁵ d'objets du niveau *Dégradations_sur_10_mètres* au niveau *Dégradations_sur_tronçon*, en se limitant aux attributs et liens communs.

Le diagnostic est réalisé à partir des données fusionnées, c'est-à-dire des nœuds du niveau *Dégradations_sur_tronçon*. Si cela se révèle vraiment indispensable⁶, il est possible de consulter un enregistrement du niveau *Dégradations_sur_10_mètres* afin de disposer de précisions.

- Le niveau *Dégradations_sur_tronçon*.

4. Les difficultés qu'ils rencontraient sur le terrain pour effectuer les relevés de dégradations les avaient en effet conduits à procéder par portions de dix mètres linéaires de chaussée.

5. La différence de structure entre les deux niveaux, bien que minime (cf. annexe A.2.4), rend cette opération de recopie nécessaire. Nous cherchons en effet à ce que la tâche de diagnostic ait des informations uniformes à traiter.

6. Par exemple, pour vérifier que la cause d'une dégradation est un problème de fouilles, en rapprochant l'adresse postale qui permet de localiser une fouille de l'adresse postale localisant une portion de dix mètres et, par là même, la dégradation qui s'y trouve.

Ce niveau permet de décrire en termes de localisations absolue et relative, d'ampleur ou encore de gravité, une dégradation sur une chaussée. Les nœuds lui appartenant proviennent de la fusion d'objets décrits au niveau *Dégradations_sur_10_mètres*.

Pour l'ensemble d'une chaussée, il peut y avoir un ou plusieurs représentants d'une même dégradation (même nom). Cela dépend des caractéristiques des portions de dégradation sur la chaussée concernée, c'est-à-dire de la quantité d'objets du niveau *Dégradations_sur_10_mètres* qu'il a été possible de fusionner. Pour l'instant, trois critères de fusion ont été retenus :

- fusion de tous les objets du niveau *Dégradations_sur_10_mètres* correspondant en fait à une même dégradation. Il s'agit de "morceaux" de dégradation faisant partie d'un même bloc homogène, pouvant s'étendre sur plusieurs portions de dix mètres, voire sur l'ensemble de la chaussée ;
- fusion de dégradations qui semblent être alignées dans l'axe d'un réseau ;
- fusion des objets du niveau *Dégradations_sur_10_mètres* correspondant à des dégradations non ambiguës⁷, dont les importances par rapport aux différentes qualités⁸ sont fixées *a priori* (ne dépendent pas des caractéristiques de la dégradation). Ce dernier critère de fusion s'explique par la façon dont est faite la synthèse des résultats de la tâche *Diagnostic* (cf. 3.2.2).

A titre d'exemple, nous pouvons citer le cas d'une rue où une zone fortement faïencée et assez conséquente apparaît en compagnie d'autres petites zones de faïençage de moindre importance (cf. figure 3.6). Le faïençage étant une dé-

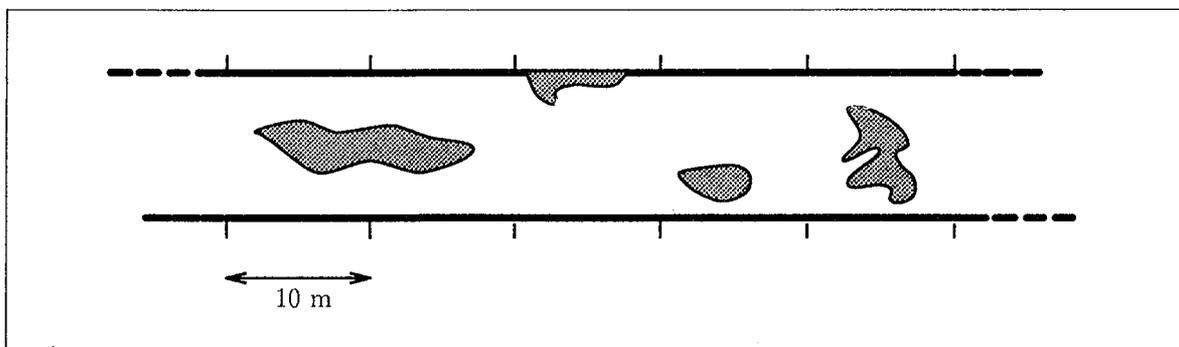


Figure 3.6.

gradation ambiguë, cette situation est représentée dans ROSY par un nœud au niveau *Dégradations_sur_tronçon* décrivant la grande zone, et autant de nœuds qu'il y a de petites zones touchées par le faïençage.

7. Dégradations dont l'origine (fondation ou surface) est connue *a priori*.

8. sécurité, confort, pérennité.

3.2 Présentation de l'architecture du système

Nous présentons tout d'abord, dans ce chapitre, l'architecture du SE dans son ensemble, avant de présenter en détail la tâche sur laquelle nous avons travaillé (la tâche de *Diagnostic*). Nous décrivons les différentes compétences qui interviennent dans cette tâche puis voyons comment celles-ci sont utilisées lors du raisonnement, en fonction du cas à traiter.

3.2.1 Le système dans son ensemble

La tâche de l'expert en voirie urbaine est découpée, dans ROSY, en cinq tâches-ATOME, qui font elles-mêmes appel à des spécialistes pour atteindre les objectifs qui leur sont assignés (voir figure 3.7). Ces tâches et les spécialistes qu'elles contrôlent constituent ainsi cinq groupes de compétence dans un domaine particulier de l'expertise. Il s'agit de :

- un groupe chargé d'enregistrer les informations sur les rues à traiter. Ce sont les tâches *Init* et *Etat-de-la-rue* qui se partagent ce travail. La première est plus particulièrement chargée d'initialiser le système en fournissant la liste de toutes les dégradations et de toutes les causes inventoriées lors des réunions avec les experts. La seconde permet de décrire l'état courant des chaussées sur lesquelles le système va raisonner. Elle est également chargée de l'opération de fusion dont nous avons parlé auparavant.

Les fonctions de ces deux tâches sont actuellement limitées par le fait qu'elles ne fournissent que les données nécessaires à la tâche *Diagnostic*. Elles seront étendues lorsque les autres tâches seront définies ;

- un groupe chargé d'établir un diagnostic sur l'état d'une rue donnée (ceci est pris en charge par la tâche *Diagnostic*) ;
- un groupe chargé de la sélection des rues à traiter et du choix de leur mode de réfection selon des critères physiques (tâche *Thérapie-choix physiques*) ;
- un groupe ayant la même fonction mais qui intègre des paramètres extérieurs à la chaussée (tâche *Thérapie-choix politiques*) ;
- un groupe dont la tâche est de limiter la liste des rues à traiter par rapport au budget alloué (tâche *Budget*).

Chacun de ces groupes peut travailler à n'importe quel moment dans le raisonnement mené, remettre en cause ou compléter les conclusions apportées par un autre. Par exemple, si la liste des rues qu'il est souhaitable de traiter ne concorde pas avec le budget alloué, on pourra revenir sur la sélection de ces rues, sur le mode de réfection de certaines et, si besoin, sur le diagnostic. Celui-ci devra alors être à même de fournir des précisions supplémentaires concernant une rue, qui serviront de nouvelles données de départ pour établir une nouvelle sélection de rues. Il est à noter que le SE ne va

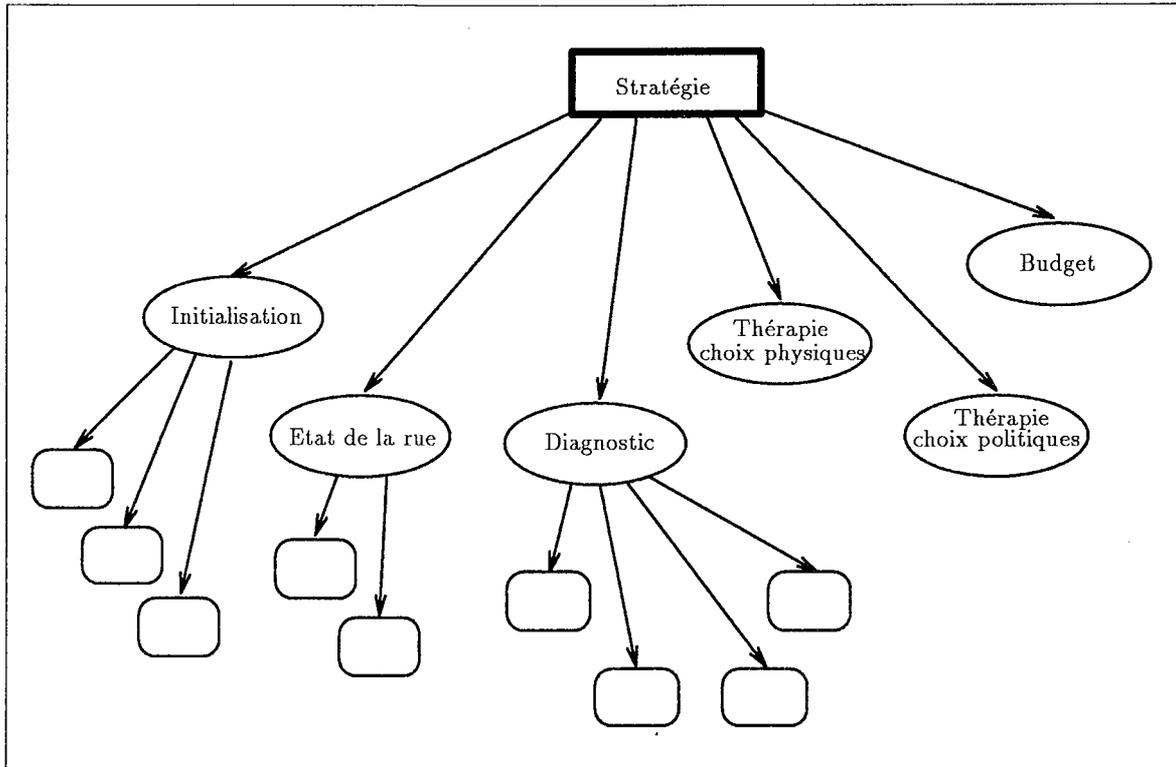


Figure 3.7. Architecture du système multi-agents ROSY.

pas travailler sur l'ensemble des chaussées nancéennes mais sur un sous-ensemble de ces chaussées, sélectionnées a priori. Le nombre total de chaussées est en effet trop élevé pour que leur traitement "en bloc" par le SE soit réaliste (il serait long, certes, mais surtout il demanderait énormément de temps pour le relevé des informations concernant chaque chaussée). Il n'y a pas d'intérêt à scruter en détail 160 kilomètres de rues pour en extraire, en définitive, quelques-uns. De plus, cela ne correspond pas à la façon de procéder de l'expert : celui-ci effectue une présélection sur la totalité du réseau routier urbain dont il a la charge. Aussi le SE, tout comme l'expert, raisonnera-t-il sur le résultat de cette présélection⁹.

3.2.2 La tâche *Diagnostic*

La tâche *Diagnostic* (cf. figure 3.8) travaille sur une chaussée donnée. Elle est chargée de fournir une appréciation de l'état de la fondation et de la surface d'une chaussée (tout en cherchant à expliquer ce qui peut justifier ces états) et de mesurer les qualités (ou les lacunes) de celle-ci en matière de confort, sécurité, pérennité et esthétique. Elle utilise, pour cela, toutes les données qui permettent de décrire la chaussée en cours

⁹. Elle devrait s'effectuer de façon automatique après identification des critères de présélection, ce que les experts cherchent actuellement à faire. Elle pourra par la suite être intégrée au SE par nécessité (si une approche algorithmique se révèle insuffisante) ou par commodité.

d'étude (paramètres qui en donnent une vue d'ensemble tels que les profils ou l'appréciation de son état général, descriptifs des dégradations y apparaissant, ...) ainsi que des renseignements qui vont permettre d'expliquer la formation d'une dégradation (âge de la rue, trafic, présence de canalisations, ...). Elle constitue une partie très

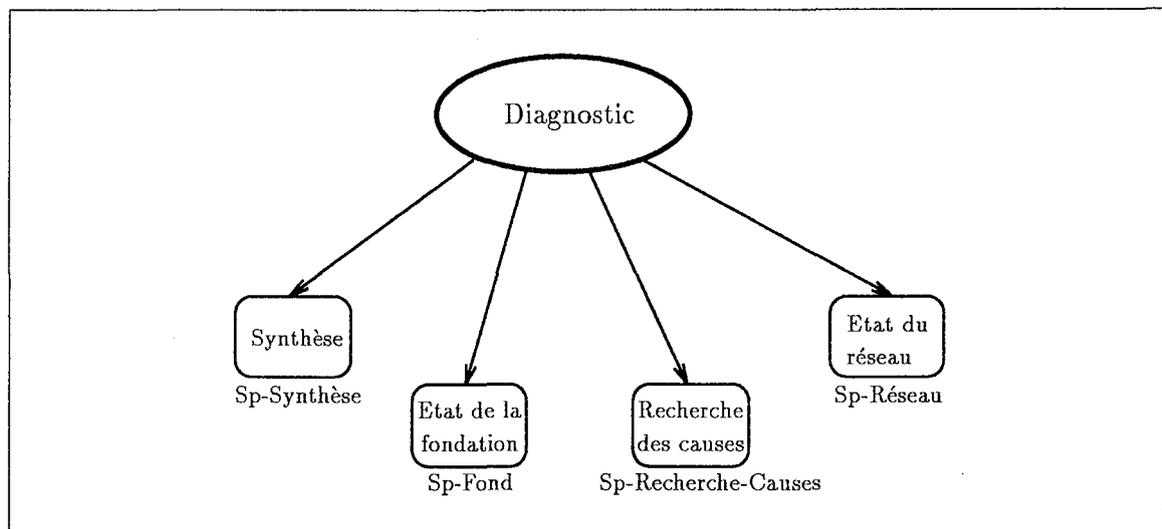


Figure 3.8. Architecture de la tâche *Diagnostic*.

importante du SE. C'est en effet sur elle que repose toute la suite du raisonnement en maintenance de voirie urbaine. Si l'on dispose d'un bon diagnostic (lorsque celui-ci est nécessaire, ce qui est le cas la plupart du temps), on va pouvoir comparer aisément deux chaussées et désigner celle des deux qui se trouve dans l'état le plus critique. Aussi l'élaboration de cette tâche a-t-elle été longue et minutieuse. Elle fut d'autant plus longue que nous avons initialement commis l'erreur de considérer que l'ensemble des connaissances utilisées par l'expert devait se retrouver dans ROSY, ce qui nous a conduit à être inutilement exhaustifs (nous détaillerons ce point au paragraphe 2.4 dans la partie III).

Nous verrons tout d'abord, dans ce qui suit, le rôle de chacune des spécialistes de la tâche. Puis nous expliquerons comment la tâche met en œuvre toutes ces connaissances de façon à fournir un diagnostic pour chaque chaussée analysée.

a - Rôle des différentes spécialistes

La spécialiste *Sp-réseaux*

Cette spécialiste est chargée de déterminer l'état d'un réseau donné et la confiance que l'on peut avoir en lui. Elle analyse principalement dans ce but l'âge du réseau et la fréquence des fouilles que ce dernier a subies récemment. Ces connaissances sont assez limitées car l'expert en voirie urbaine n'est pas un expert en réseaux et préfère se fier à l'avis des concessionnaires sur leurs réseaux. Elles ne serviront donc que si le système ne dispose que d'un avis peu fiable émanant du concessionnaire ou de pas

d'avis du tout.

La spécialiste *Sp-fond*

La spécialiste *Sp-fond* a pour rôle d'essayer de conclure rapidement sur l'état de la fondation d'une chaussée (cf. figure 3.9). Elle utilise, dans ce but, des paramètres qui décrivent l'aspect général de la chaussée (par exemple, les profils) et des informations sur sa structure.

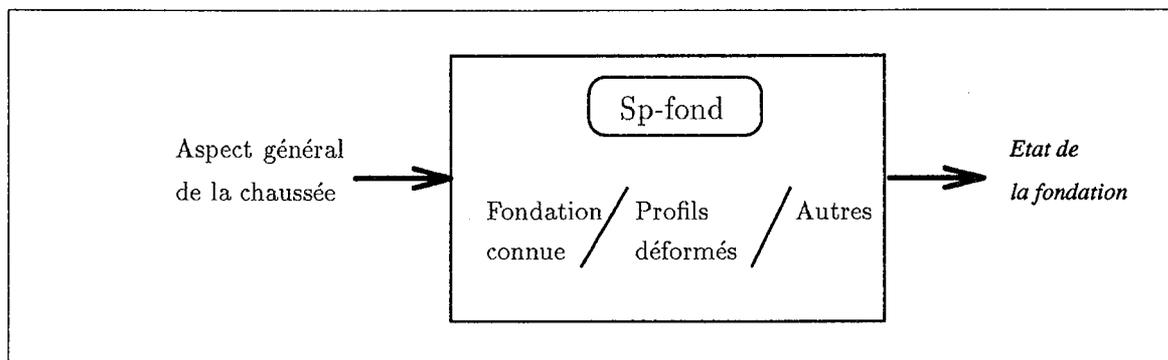


Figure 3.9. Le rôle de la spécialiste *Sp-fond*.

Ses connaissances peuvent se regrouper autour de trois thèmes et, de ce fait, se diviser en trois ensembles contenant respectivement :

- des connaissances permettant de conclure à coup sûr sur l'état de la fondation. Elles utilisent notamment des données sur les profils, le type de la chaussée (pavée, rigide, souple, ...) et son âge. On a, par exemple :

Si les profils sont déformés ou très déformés et la chaussée a plus de 25 ans alors la fondation est mauvaise.

- des connaissances qui sont susceptibles de permettre de conclure à coup sûr sur l'état de la fondation. Elles sont basées sur des estimations expérimentales et statistiques du comportement et de la résistance de certaines fondations. Leur utilisation est donc conditionnée par le fait de connaître la composition de la fondation. Par exemple :

Si le type de la chaussée = pavée et la composition de la fondation = (GL 40 cm, sable 3 à 5 cm) alors la fondation est jugée bonne.

suivie de :

Si la composition de la fondation est connue et jugée bonne et les profils sont bons alors la fondation est bonne.

permettra de conclure sûrement sur la fondation.

- toutes les autres connaissances, qui peuvent contribuer à l'évaluation de l'état de la fondation. Par exemple :

Si la couche de roulement est très abîmée alors renforcer l'hypothèse de mauvais état de la fondation.

La spécialiste *Sp-fond* exploite ces regroupements dans son raisonnement. Elle cherche tout d'abord à conclure rapidement et à coup sûr en utilisant les deux premiers groupes de connaissances. Le dernier groupe n'est exploité que si aucune conclusion n'a été tirée des deux premiers. En revanche, elle n'a pas les moyens d'exprimer de façon globale le fait que les connaissances du second groupe ne doivent pas être utilisées si la composition de la fondation n'est pas connue. Elle envisagera donc ce groupe de connaissances, que la fondation soit connue ou pas, contrairement à ce que fait l'expert. Elle essaie cependant, dans la limite des moyens fournis par ATOME, d'organiser sa connaissance en fonction du cas à traiter et de se construire, grâce à ces différents groupes, une véritable stratégie de raisonnement qui essaie de se rapprocher, au plus près, de la façon de faire de l'expert¹⁰.

La spécialiste *Sp-recherche-causes*

La spécialiste *Sp-recherche-causes* travaille sur une dégradation donnée (un nœud du niveau *Dégradation_sur_tronçon*), apparaissant sur une chaussée donnée. Son rôle est d'essayer de déterminer la ou les causes les plus probables de chaque dégradation traitée, dans le but, plus lointain, de pouvoir incriminer ou pas la fondation. Elle dispose, pour cela, de liens préétablis entre la dégradation à étudier et un ensemble de causes susceptibles de l'avoir provoquée. Elle raisonne en plusieurs étapes, du fait des regroupements qui peuvent être opérés sur ses connaissances en fonction de leur type.

Une condition de rejet a été associée à chaque cause répertoriée. Cette condition est telle que, si elle est vérifiée, la cause ne peut pas être responsable de la formation de la dégradation en cours d'étude. Par exemple :

Rejet si la couche de roulement n'est pas faite en enrobé ou si la dernière réfection date de moins de 10 ans.

est la condition qui permet de rejeter la cause *Enrobé trop vieux*. La spécialiste commence donc tout d'abord par tester ces conditions de rejet. Un premier élagage de la liste des causes possibles de la dégradation est ainsi obtenu, élagage qui peut être tel qu'il fournisse la cause responsable (il est, dans ce cas, inutile de poursuivre le raisonnement). Elle utilise ensuite des connaissances propres à une dégradation, telle que :

Si fissures transversales à pas décimétrique alors cause = "Remontée de fissures depuis une grave hydraulique".

10. Nous verrons comment s'en rapprocher davantage encore et la modéliser de façon plus fidèle dans la partie V. Les propositions que nous y faisons permettent, par exemple, de ne considérer le second groupe de connaissances que lorsque la fondation est connue.

des connaissances propres à une cause :

Si la chaussée est jeune et que le phénomène de dégradation n'est pas minime alors mettre en doute les matériaux ou la mise en œuvre.

ou encore, des connaissances propres à un type de causes :

Les problèmes de mise en œuvre sont plus probables que les autres lorsque la dégradation est située dans une zone difficilement accessible aux engins de travaux publics. (R₁)

Nous avons initialement envisagé d'identifier les causes responsables de la formation de la dégradation de la manière suivante : après suppression des causes rejetées, chaque cause restant en course était affectée d'un poids qui mesurait son degré de culpabilité; ces poids étaient modifiés tout au long du raisonnement (en augmentant ou diminuant); les causes qui obtenaient des poids supérieurs à ceux des autres et suffisamment conséquents pour être significatifs étaient alors considérées comme étant celles par qui le mal était arrivé. Cette façon de faire, qui nous semblait être proche de la démarche experte, n'a pu être réalisée pour les raisons suivantes :

- d'une part, l'explicitation des poids en question a été un échec (nous en expliquons les raisons dans la partie III, au chapitre 2);
- d'autre part, nous nous étions engagée sur une fausse piste . Nous pensions en effet, à l'époque, qu'il fallait à tout prix retrouver dans la spécialiste le comportement de l'expert, et donc entreprendre systématiquement une recherche de causes pour toute dégradation, que cette recherche aboutisse ou non. Tout élément permettant de conclure devait donc être envisagé dans une règle de spécialiste et contribuer à cette recherche (en influant sur les poids en question). L'expert ne parvient certes pas toujours à identifier la cause d'une dégradation mais il cherche toujours à le faire.

Nous nous étions donc lancée dans une quête sans fin où nous cherchions à identifier, dans la limite de l'expertise, des règles qui auraient permis de différencier les diverses causes associées à une dégradation ainsi que les facteurs qui faisaient qu'une cause était un peu plus probable qu'une autre. Puis nous nous sommes rendu compte du fait que l'expert procédait à cette recherche systématique pour sa satisfaction personnelle, parce que, disait-il, "on aime bien savoir".

Nous avons alors revu la façon de procéder de la spécialiste. D'une part, elle ne dispose plus maintenant que de connaissances sûres (aucun poids n'est affecté à une ou plusieurs causes). Ainsi, la règle R₁ ci-dessus ne fait plus appel à des coefficients de vraisemblance mesurant la confiance qui est accordée à une cause. Elle a été transformée en une règle d'orientation du raisonnement¹¹ :

11. ATOME ne permet pour l'instant pas d'écrire *explicitement* de telles règles, puisqu'il n'est pas possible de modifier l'ordre dans lequel une spécialiste consulte ses règles. Nous verrons en 2, partie V, ce que nous avons réalisé pour doter le générateur de telles fonctionnalités.

Lorsque la dégradation est située dans une zone difficilement accessible aux engins de travaux publics, commencer par analyser les règles traitant de problèmes de mise en œuvre.

D'autre part, le but visé par la spécialiste n'est plus le même. Elle ne cherche plus à identifier au mieux la ou les causes d'une dégradation mais à savoir si celle-ci provient d'un problème de fond ou de surface, lorsque l'expertise lui permet de trancher. Elle se limite donc à :

- la recherche des causes des dégradations ambiguës (nous rappelons qu'est qualifiée de *dégradation ambiguë* toute dégradation dont l'origine (fondation ou surface) n'est pas connue a priori (exemple : un nid de poule)),
- une recherche partielle, qui cessera lorsqu'une cause aura été retenue avec certitude (si l'on y parvient), qu'elle soit ambiguë (même définition que ci-dessus) ou pas.

Le résultat de son raisonnement (cf. figure 3.10) n'est donc plus d'exhiber un sous-ensemble de causes potentiellement responsables mais une origine, la recherche de cette origine pouvant passer par la recherche d'un tel sous-ensemble. En fonction des cas, elle statuera donc sur "problème de fond", "problème de surface" ou "origine inconnue"¹².

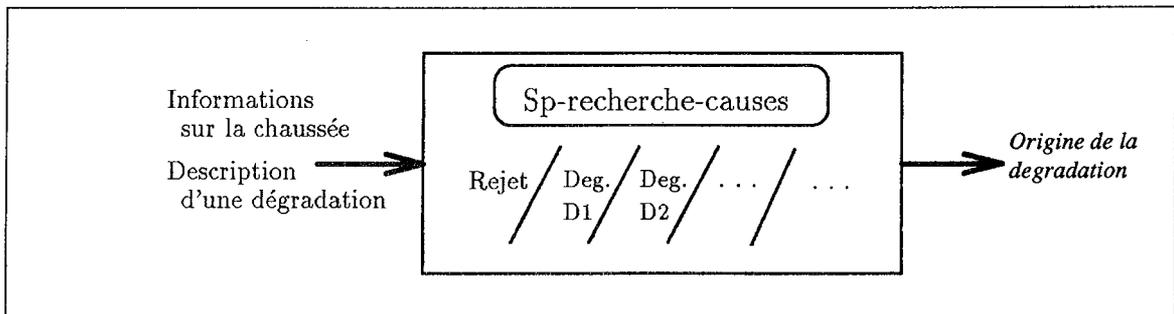


Figure 3.10. Le rôle de la spécialiste *Sp-rech-causes*.

Ce résultat a été orienté de façon à ne fournir que les éléments indispensables à la résolution du problème de diagnostic. En ce sens, le raisonnement de la spécialiste diffère quelque peu de celui de l'expert.

La spécialiste *Sp-synthèse*

Sp-synthèse travaille sur une chaussée et mesure ses qualités en matière de confort, sécurité, pérennité et esthétique. Elle est également chargée de comptabiliser :

12. Ce dernier cas peut provenir du fait qu'il n'a pas été possible de conclure sur un ensemble de causes homogènes du point de vue de l'origine, que la conclusion a porté sur une cause ambiguë ou que rien n'a pu être déduit.

- le nombre de mètres carrés de fondation définitivement et irrémédiablement abîmée (c'est-à-dire ceux pour lesquels il ne fait aucun doute que la fondation est à refaire),
- le nombre de mètres carrés de dégradations dont l'origine n'a pu être déterminée,
- le nombre de mètres carrés de dégradations de surface,

et d'identifier les problèmes ponctuels graves (par exemple, un affaissement isolé de forte amplitude, une zone fortement faïencée, ...). Son rôle (cf. figure 3.11) consiste donc à préparer les données qui vont permettre à la tâche *Thérapie-choix physiques* de raisonner.

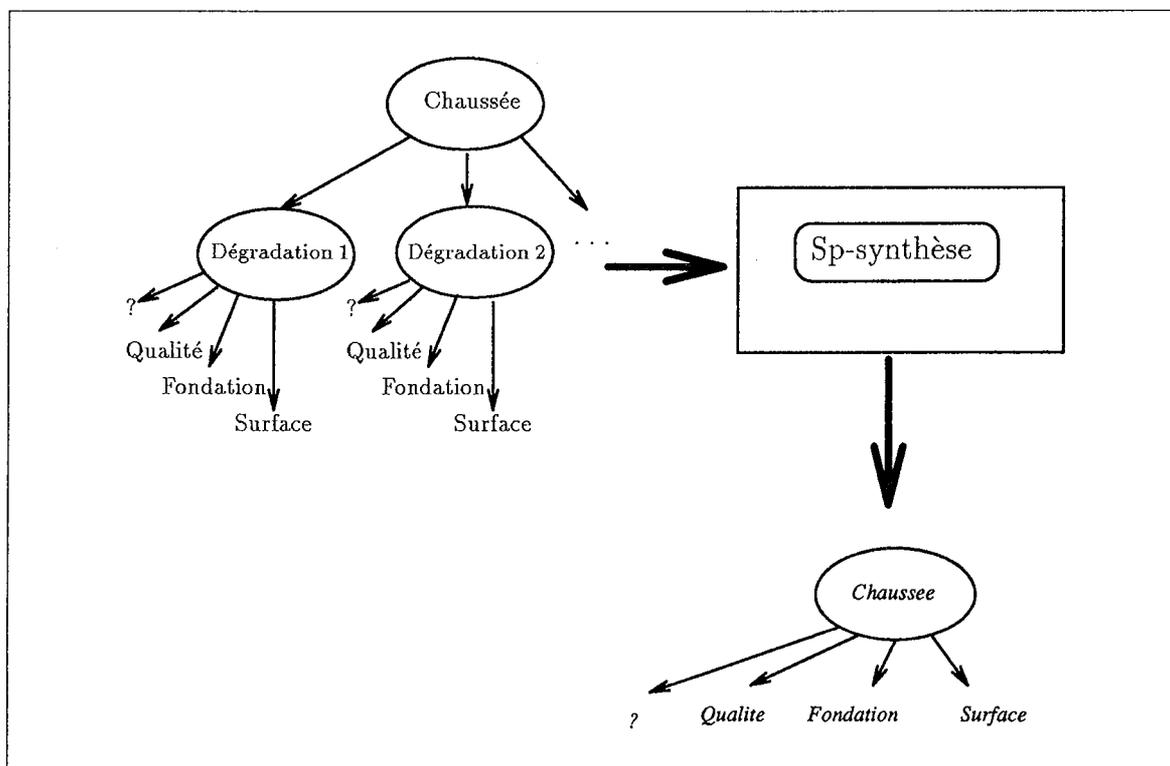


Figure 3.11. Les conclusions apportées par la spécialiste *Sp-synthèse*.

Celle-ci pourra en effet, grâce à ces renseignements, mettre l'accent sur quatre types de chaussées :

- les chaussées dont la mesure du nombre de mètres carrés de fondation abîmée frôle le seuil¹³ au dessus duquel une réfection en fondation est obligatoire, chaussées qu'il est encore possible de sauver en intervenant rapidement ;
- celles qui obtiennent des mesures de qualité mauvaises (par exemple, celles qui risquent de mettre en danger les usagers) ;

13. Ce seuil a été fixé à 40% de la surface totale de la chaussée, sur un linéaire de 50% de sa longueur totale.

- celles qui présentent des problèmes ponctuels qui, là aussi, pourraient être néfastes aux usagers ;
- et enfin, celles qui comportent de nombreuses dégradations dont l'origine est inconnue. Il faudra alors compléter le raisonnement de la tâche *Diagnostic* en considérant d'autres critères (par exemple, le trafic) de manière à faire pencher la balance du côté "Fondation" ou du côté "Surface".

Il sera alors possible de se faire une première opinion sur le mode de réfection auquel une chaussée peut prétendre et d'établir un interclassement entre chaussées en ne prenant en compte, dans un premier temps, que les critères physiques¹⁴.

Hormis la qualité par rapport à l'esthétique qui liée directement à l'homogénéité de la chaussée, les calculs des mesures de qualité utilisent les importances par rapport aux différentes qualités des dégradations (cf. annexe B.3). Si certaines de ces importances sont indépendantes des caractéristiques de la dégradation, d'autres¹⁵ dépendent de la position de la dégradation sur la chaussée, de son amplitude ou encore de son étendue. Ainsi, un affaissement de forte amplitude sera considéré comme grave pour la sécurité s'il est situé en bande de roulement. En revanche, il sera quasiment ignoré, malgré son amplitude, s'il se trouve sur une voie de stationnement.

Les importances par rapport aux qualités des diverses dégradations sont exprimées en terme de "forte", "moyenne" et "faible". Pour chaque dégradation présente sur la chaussée en cours de traitement, la spécialiste détermine l'importance par rapport à chacun des critères en calculant le nombre de mètres carrés de dégradation considérés comme "fort", "moyen" ou "faible" pour le critère en question. Les différentes importances obtenues sont alors cumulées, ce qui nous donne une première appréciation de la qualité de la chaussée pour les quatre critères. Ces appréciations sont ensuite pondérées en prenant en compte des facteurs aggravants tels que la vitesse des véhicules pour la qualité par rapport à la sécurité ou le trafic pour le critère "pérennité".

Ce processus peut cependant être raccourci lorsqu'il est possible de statuer dès le départ sur le mauvais état de la fondation (cas où *Sp-fond* conclut). Dans pareil cas, la qualité par rapport à la pérennité sera considérée comme nulle et la qualité par rapport à l'esthétique sera dénuée de sens (peu importe en effet l'esthétique puisque la chaussée est à refaire dans son ensemble). De même, si les profils sont déformés, la qualité par rapport au confort sera nulle.

Le calcul du nombre de mètres carrés de fondation abîmée résulte du cumul beaucoup plus simple des mètres carrés de dégradations dont l'origine est attribuée à la fondation. Le même procédé est utilisé pour les dégradations à origine inconnue et de surface. Le caractère primordial de la phase de recherche de l'origine d'une dégradation peut ici être constaté puisque c'est elle qui permet de faire les calculs indiqués.

14. Outre le fait que cette étape nous a été demandée par l'expert qui souhaite ainsi pouvoir constater l'influence des paramètres stratégiques, elle nous semble indispensable pour pouvoir procéder à une première validation du raisonnement du SE (cf. 4.1.2).

15. Celles dont les importances sont notées "dépend".

b - Fonctionnement de la tâche

La tâche *Diagnostic* utilise les spécialistes décrites ci-dessus de façon à fournir aux autres tâches des informations suffisamment complètes pour que celles-ci puissent achever le travail de l'expert en voirie urbaine.

Elle cherche tout d'abord à conclure rapidement par la spécialiste *Sp-fond*. Si cela se révèle impossible, elle demande à la spécialiste *Sp-recherche-causes* d'examiner les dégradations ambiguës les unes après les autres, jusqu'à ce qu'on en ait vu suffisamment pour conclure. Si *Sp-recherche-causes* en a besoin, la tâche donne le contrôle à la spécialiste *Sp-réseaux*. Après chaque analyse de dégradation effectuée par *Sp-recherche-causes*, la tâche fait appel à la spécialiste *Sp-synthèse* qui tente de conclure avec les informations dont elle dispose. Si la spécialiste ne peut pas le faire, il faut alors envisager d'étudier une nouvelle dégradation. Le processus recommence jusqu'à ce que *Sp-synthèse* puisse conclure et tant qu'il reste des dégradations à traiter. *Sp-synthèse* est donc la spécialiste qui termine le raisonnement de la tâche *Diagnostic*, illustré sur la figure 3.12

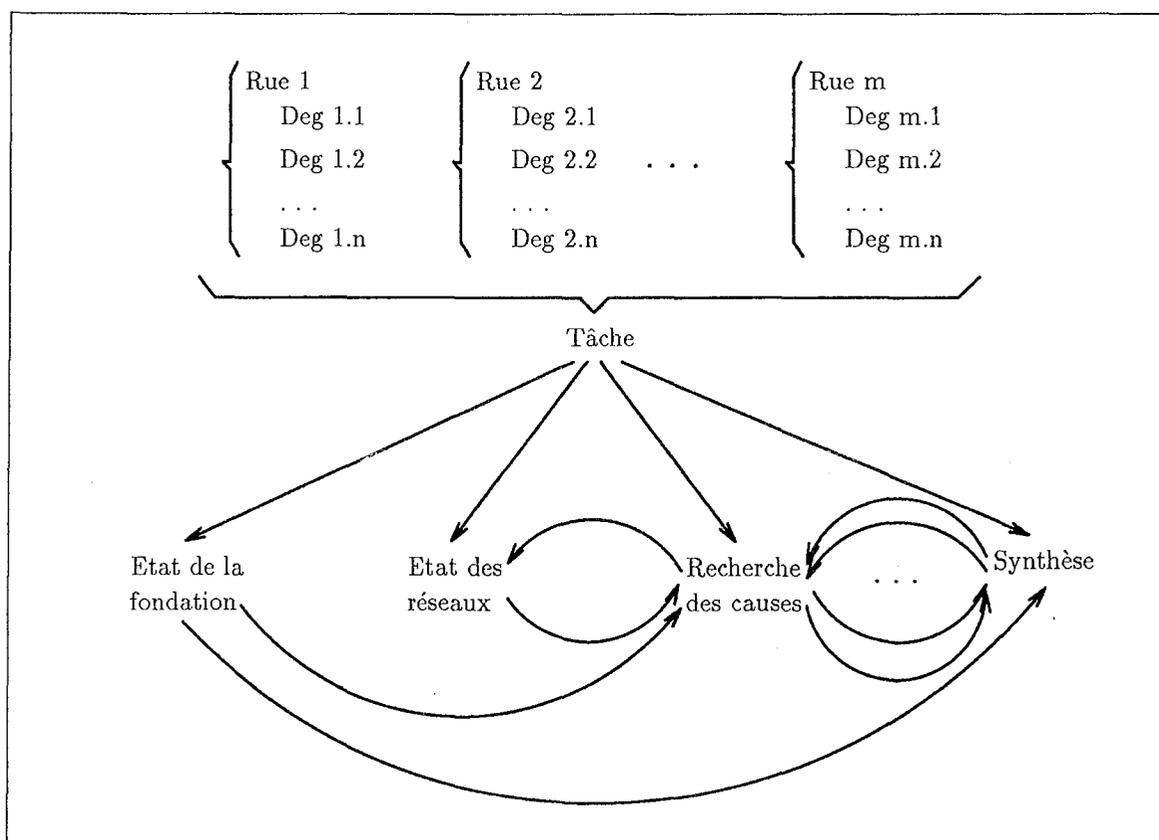


Figure 3.12. Fonctionnement de la tâche *Diagnostic*.

Ce fonctionnement n'est pas valable pour des chaussées où des aménagements programmés sont prévus. Le traitement de ce type de chaussée se résume à un travail restreint de *Sp-synthèse* (seules les diverses qualités sont mesurées, dans la limite des informations disponibles).

4

Le système vu a posteriori

Ce chapitre fait le point sur la situation actuelle du SE ROSY. Il envisage également les évolutions futures qui pourront être réalisées dans le système lui-même ou autour du système. Enfin, il rassemble les réflexions que nous avons menées a posteriori sur les intérêts de la construction du système ROSY.

4.1 Le point sur le système ROSY et développements futurs

4.1.1 La situation actuelle

La première constatation que nous pouvons faire est que les blackboards sont dans un état beaucoup plus avancé que ne l'est le raisonnement. Même en axant l'acquisition des connaissances sur un point particulier, il n'est pas possible de la restreindre au seul diagnostic. L'expert a pu faire allusion à d'autres compétences, explicitant ainsi des connaissances dont nous avons hérité. Cela explique la présence dans les blackboards d'attributs ou de liens, voire de niveaux complets, qui ne sont pas utilisés pour le moment. Citons, à titre d'exemple, le cas du niveau *Aménagements-programmés* du blackboard RUE, qui répertorie les aménagements dont nous avons parlé en 2.2.2. Il sera utilisé ultérieurement dans le traitement des chaussées, en intervenant dans les tâches de choix des modes de réfection.

Cette situation a été accentuée pour le SE ROSY, étant donné l'influence des préoccupations premières de l'expert sur le processus d'acquisition des connaissances (cf. 2.1.2, partie III). Nous avons ainsi identifié de très nombreuses données, qui ont servi à la définition des structures des blackboards (niveaux, attributs et liens). Ces données sont en partie destinées aux versions futures du système.

La seconde constatation est que le SE ROSY, tel qu'il est actuellement défini, pose certains problèmes. Tout d'abord, la représentation des données visuelles, même si elle permet aux différents spécialistes de raisonner, ne nous satisfait toujours pas. Nous souhaiterions en effet modéliser des choses telles que des hiérarchies d'objets, qui ne peuvent pas l'être avec ce qu'ATOME propose actuellement pour les blackboards.

Nous verrons dans la partie IV les solutions successives que nous avons envisagées pour tenter de représenter ces données et ce qu'il est possible d'envisager, en agissant sur les potentialités de représentation des données des blackboards du générateur.

Ensuite, le moteur de ATOME ne permet pas toujours de reproduire fidèlement le raisonnement expert (cette situation a, par exemple, pu être constatée dans la spécialiste *Sp-fond*, où les règles testant sur la fondation sont considérées, que celle-ci soit connue ou pas). Ce problème est résolu dans ce que nous proposons dans la partie V. Cette partie montre les nouvelles fonctionnalités que nous avons développées dans ATOME de façon à augmenter le potentiel de représentation des raisonnements du générateur.

Enfin, le fait que les opérations de relevé des informations sur le terrain et de diagnostic soient dissociées, contrairement à ce que fait l'expert, oblige à répertorier un nombre important de données dans les blackboards. Cela pose actuellement, outre le problème de la collecte de ces informations, celui de leur *rentabilité* et de leur *pertinence* par rapport au cas à traiter :

- il peut sembler paradoxal de se poser le problème de la rentabilité des informations à fournir au système pour qu'il puisse raisonner. Toutes les informations retenues suite au transfert d'expertise sont en effet utilisées par l'expert au cours de son raisonnement et l'on ne voit pas comment le système pourrait s'en passer. Le problème réside dans le fait que l'interprétation de ces données se fait en différé. Si l'expert peut sélectionner les informations qui lui sont nécessaires pour conclure parce qu'il se trouve sur le terrain, le système ne peut, quant à lui, pas présupposer des informations qui lui seront nécessaires. La description de l'état de dégradation d'une chaussée doit donc comporter tous les renseignements susceptibles de servir et ceci, bien qu'un nombre non négligeable de ces informations ne soit utilisé qu'exceptionnellement. Nous sommes ainsi sûrs que le système ne manquera de rien pour conclure. En contrepartie, chaque rue pouvant être considérée comme un cas particulier, on en arrive rapidement à une inflation d'informations.
- la pertinence des données saisies découle, elle aussi, de cette interprétation en différé. Dans certaines situations, certaines informations à fournir deviennent non pertinentes pour le cas à traiter. Par exemple, si les profils sont déformés sur une chaussée, bon nombre d'attributs concernant les dégradations ne seront plus pertinents pour le problème en cours et n'auront plus besoin d'être renseignés, une partie du raisonnement étant supprimée.

Il y a donc un décalage important entre la quantité de données stockées et la quantité de données effectivement utilisées. L'idéal consisterait à "décentraliser" le diagnostic en incluant une part d'expertise dans ce qui va gérer le relevé de dégradations. Il s'agirait alors de faire un relevé guidé, en fonction des premières conclusions du diagnostic. Cela nécessiterait d'avoir sur place un matériel suffisamment conséquent pour "raisonner" ou encore de disposer de liaisons mobiles permettant de communiquer avec un tel matériel (installé cette fois-ci à la mairie). La technique ne nous semblant

pas encore adaptée à ce genre de situation, il nous semble préférable d'opter pour une collecte systématique de l'information, tout en cherchant à la faciliter.

Cette collecte se fait en effet pour l'instant "à la main", à l'aide de documents élaborés à partir des structures de données retenues. Il s'agit d'un travail long et laborieux, qui mériterait d'être automatisé. A défaut, nous craignons que cela ne crée un rejet de l'utilisation du système expert lui-même. Nous avons songé à un système de relevé de dégradations par des dessins qui, s'il n'automatise pas complètement la tâche, présente au moins l'avantage de la rendre plus aisée. Nous en disons quelques mots au paragraphe 4.1.3.

4.1.2 La validation du système

La tâche *Diagnostic* arrivant à terme, il nous faut maintenant la valider. Il s'agit non seulement de valider le raisonnement de cette tâche mais aussi l'ensemble du système actuel, procédant ainsi à une validation globale. Nous sommes conscients du fait qu'il s'agit d'une phase décisive dans la construction d'un système expert et pensons pouvoir la réaliser dans le cadre de cette thèse. Elle a été retardée, et l'est encore, car il nous faut aller loin dans la modélisation du raisonnement pour pouvoir l'entreprendre. Le seul moyen que nous envisageons actuellement est de pouvoir comparer les scores des différentes chaussées traitées. Ces scores étant le résultat de la combinaison des importances par rapport aux diverses qualités, cela revient en fait à vérifier que la liste des chaussées classées par ordre de priorité que le système obtient est conforme à celle que l'expert établirait à partir de ces mêmes chaussées. La même vérification est à faire pour les modes de réfection attribué par le système.

Il est communément admis qu'il faut présenter à l'expert un résultat sous une forme qui lui est habituelle pour qu'il puisse en juger. Par exemple, dans ABYSSE¹ [Chevrier *et al.* 90], les résultats fournis par le système reproduisent des graphes que l'expert du domaine a l'habitude de manipuler; de même dans CAVCAV² [Chouvet et Haton 91] où des dessins reproduisant des vues de crâne, de profil ou de face, et des coupes transversales de crâne, avec les limites des zones à irradier, sont présentés aux experts. Dans le domaine de la voirie urbaine, le seul document que nous ayons vu est la liste définitive des chaussées à réparer (liste de noms de rues). Il nous faudrait donc attendre la tâche *Thérapie-choix politiques*, si ce n'est la tâche *Budget*, chargée d'établir une telle liste, avant de pouvoir valider tout raisonnement. Nous pensons cependant pouvoir déjà procéder à une première validation en établissant, au niveau de la tâche *Thérapie-choix physiques*, une première liste de rues. Cette liste ne prendra pas en compte les paramètres stratégiques et économiques mais il nous semble que l'expert sera à même de juger uniquement de l'état des chaussées, en faisant abstraction de ces données.

Il nous faut donc attendre la tâche *Thérapie-choix physiques* pour faire une pre-

1. Système expert d'aide à la planification de programmes de mesures sur des bâtiments de la marine, développé au CRIN en collaboration avec le GERDSM.

2. Système expert d'aide à la conception des plans de traitement en radiothérapie, développé au CRIN en collaboration avec le centre de lutte contre le cancer ALEXIS-VAUTRIN de Nancy.

mière validation globale du système et, plus particulièrement, une validation du diagnostic. Cette dernière est d'autant moins envisageable, à l'heure actuelle, que nous avons ajouté à l'expertise un processus rationnel de décision. Chaque rue est affectée de coefficients mesurant ses qualités en matière de confort, sécurité, pérennité et esthétique. De même, on distingue les mètres carrés de dégradations de fond, de surface et ceux d'origine inconnue (cf. *Sp-synthèse* au paragraphe 3.2.2). L'expert n'utilise pas de tels coefficients et pourtant il est capable d'estimer qu'une chaussée est plus abîmée qu'une autre. Lui présenter ces résultats tels quels ne l'inspire pas (nous en avons déjà fait la tentative); ils n'ont à ses yeux aucune valeur intrinsèque. En revanche, se servir de ces coefficients pour trier les chaussées des plus abîmées aux moins abîmées ou pour distinguer les quatre catégories dont nous avons parlé en 3.2.2 permettra de faire des comparaisons entre chaussées. Nous pourrions alors revenir, en "chaînage arrière", sur les conclusions fournies par les diverses spécialistes de la tâche *Diagnostic*.

Notons qu'il est déjà possible de comparer des chaussées sur un unique critère de qualité (par exemple, le confort). Les tentatives que nous avons faites à ce sujet ne sont pas encore suffisamment nombreuses pour qu'il soit possible d'en tirer des conclusions.

Cependant, si une validation globale n'est pour l'instant pas possible, nous avons déjà procédé à des validations locales sur les données et les connaissances répertoriées, cela lors de l'acquisition des connaissances. Il nous semble en effet que les deux processus (acquisition et validation) sont étroitement liés, surtout pour ce qui est de la cohérence des données ou de la "justesse" de chaque règle prise individuellement. Nous verrons, dans la partie III, les techniques que nous avons utilisées pour valider localement les connaissances acquises.

4.1.3 Les évolutions futures

a - Poursuite du développement du SE

Il nous faut maintenant poursuivre par le développement des autres tâches, notamment celui de la tâche *Thérapie-choix physiques* qui nous permettra de débiter une première validation de l'ensemble du raisonnement du système. Nous pourrions ainsi compléter les blackboards par les données qui ont pu nous échapper et vérifier la cohérence et la pertinence des connaissances au sein des diverses sources de connaissances. Notons qu'une bonne partie de l'expertise nécessaire aux autres tâches a déjà été acquise (nous sommes en effet capables de décrire l'ensemble de la démarche experte et avons déjà donné, en 3.2.2, une première esquisse de ce que peut être la tâche *Thérapie-choix physiques*). Il reste cependant à formaliser ces connaissances.

Il nous semble également opportun, dans un avenir plus lointain, de revenir sur de nombreuses pistes qui ont été abandonnées. Initialement, le système devait, par exemple, non seulement s'occuper des chaussées mais aussi des trottoirs, ce qui explique la présence du lien *Contient-trottoirs* au niveau *Tronçon* du blackboard RUE. Cette option a été laissée de côté dans tout ce que nous avons développé. Elle est à ranger dans les perspectives d'avenir.

b - Réalisations autour du SE

Ce qu'il nous faudra tout d'abord faire lorsque le système arrivera à terme consistera à l'intégrer dans son environnement et, notamment, prendre en compte les fichiers de voirie urbaine existants ou en cours d'élaboration. Les ingénieurs de la mairie de Nancy travaillent actuellement à l'élaboration d'une banque de données urbaines. A plus longue échéance, il serait souhaitable que le SE puise une partie des informations dont il a besoin dans cette banque.

Un relevé détaillé de l'état de détérioration de chaque chaussée à analyser n'en restera pas moins à faire, que les renseignements correspondants soient stockés dans la banque de données urbaines ou non. Il faudrait donc penser à un moyen aisé d'effectuer ce relevé. A défaut de pouvoir disposer d'un relevé automatique via une caméra³ et à une transformation de ces données de façon à les mettre sous la forme voulue par le SE, nous avons songé à la réalisation d'une interface graphique permettant de décrire schématiquement l'état d'une chaussée, d'enregistrer les dégradations y apparaissant. Les moyens nécessaires consisteraient en :

- un plan digitalisé des rues de Nancy. Le "releveur" pourrait alors sélectionner la rue qu'il traiterait. Notons qu'un projet de digitalisation des plans de rues est en cours à la mairie de Nancy depuis 1988. Les plans résultant de ce travail pourraient alors servir de support au relevé de dégradations ;
- un écran tactile muni d'un crayon optique, permettant de saisir des données.

Le principe du relevé est alors fondé sur le dessin. Le plan de la chaussée à traiter s'afficherait sur l'écran, par portions ou dans son ensemble. L'utilisateur pourrait ainsi faire un dessin de ce qu'il voit, schématiser les diverses dégradations et les positionner sur l'écran à l'aide de différents repères préenregistrés sur le plan digitalisé (numéros des maisons, bouches d'égoûts, plantations, ...). Dans un premier temps et pour faciliter le développement de l'outil, il serait possible d'envisager non pas le plan digitalisé mais un simple fond schématique de rue, les divers repères y étant reportés. L'outil qui est ici envisagé (cf. figure 4.1) doit d'une part permettre de dessiner et de visualiser, avec toute la complexité qu'il est possible d'imaginer (zoom sur une portion de chaussée, déplacement le long de la rue, superposition des différentes dégradations enregistrées, superposition d'un nombre limité de ces dégradations, ...). Il lui faut d'autre part non seulement enregistrer les données saisies (dessinées) mais aussi interpréter le schéma obtenu de façon à le traduire sous la forme des données symboliques ou numériques attendues par le SE. Nous avons examiné chacun des attributs des niveaux décrivant les dégradations sur le terrain de manière à voir comment une telle traduction pourrait se faire. Nous n'en donnons pas les détails ici mais il va sans dire que la tâche est complexe.

Les techniques utilisées en vision seraient à la base de cet outil. Leur étude permettrait de juger de la faisabilité de cette approche dont l'intérêt pour le relevé des dégradations est facilement imaginable :

3. Des études à ce sujet sont actuellement en cours [Hajek et Haas 88].

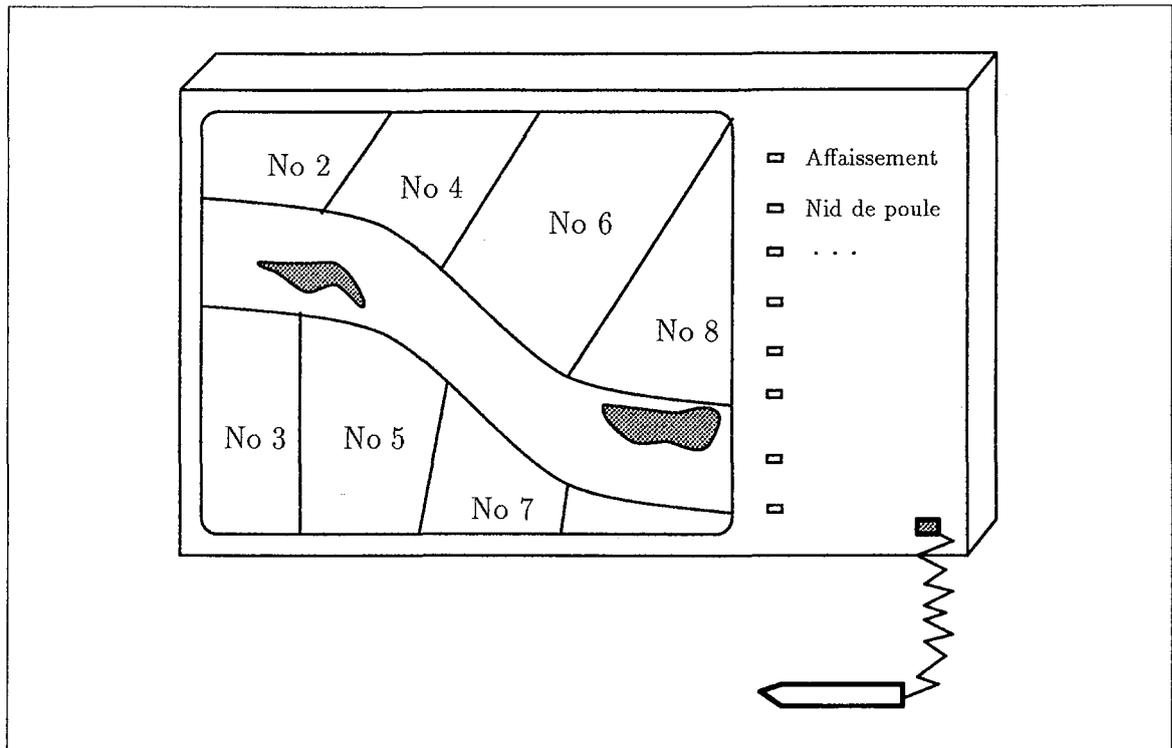


Figure 4.1. Un outil de relevé de dégradations par une interface graphique.

- relevé *sous une forme naturelle*, qui est parfois utilisée par l'expert lorsqu'il nous expose un problème particulier ;
- relevé *moins subjectif* que si l'on demande, par exemple, de statuer sur la proximité de deux dégradations ou encore de qualifier la répartition d'une dégradation sur l'ensemble de la chaussée. Il est ainsi possible de limiter l'influence, sur les données relevées, de la perception qu'a le releveur de l'état de la chaussée et de l'interprétation qu'il en fait. Cela revient à limiter son initiative personnelle.

Cet outil faciliterait la tâche du releveur en lui permettant de retranscrire directement ce qu'il voit, sans avoir à passer par des symboles ou des chiffres. Il ne résout cependant pas le cas d'attributs typiquement symboliques tels que la *gravité* d'une dégradation. Il faudrait alors songer (ce que l'expert souhaite) à associer des valeurs numériques à ces symboles. L'outil permettrait de rappeler ces valeurs et d'aider ainsi le releveur à attribuer le symbole correspondant à ce qui est observé.

Notons, en dernière remarque, que ce projet comporte deux facettes qui peuvent être dissociées : l'une concerne tout ce qui est dessin (saisie, visualisation, stockage des données, restitution de ces données, ...) ; l'autre correspond à l'interprétation de ces dessins. Un développement en parallèle pourrait donc être envisagé.

4.2 Intérêt d'un tel travail

Ce que nous avons réalisé dans le cadre du SE ROSY consiste non seulement en un travail d'acquisition des connaissances et de modélisation d'une expertise mais aussi en une exploitation des données acquises pour définir et mettre au point un processus rationnel de décision. Des critères de comparaison entre chaussées ont ainsi été définis, ainsi que des méthodes rationnelles permettant de les évaluer (cf. la spécialiste *Sp-synthèse* en 3.2.2). Cela explique que le raisonnement du système diffère parfois de celui de l'expert et que nous ayons eu du mal à le formaliser. Malgré toutes les difficultés rencontrées, la réalisation d'un tel système a été très enrichissante à plus d'un titre. Elle présente un intérêt pour les trois parties impliquées :

- tout d'abord, *pour la mairie de Nancy*.

Nous avons formalisé et rassemblé une connaissance experte, un savoir-faire inédit, sauvegardant ainsi un patrimoine précieux. Les bénéfices de l'approche "système expert" que nous avons mentionnés au chapitre 1 sont donc en partie réalisés. Le côté "diffusion de la connaissance experte", auquel nous avons également fait allusion, demeure, pour l'instant, dans le domaine des perspectives d'avenir. Il est cependant tout à fait envisageable de donner une orientation pédagogique au système ;

- ensuite, *pour l'expert*.

Son savoir-faire s'est en effet affiné, renforcé par la réflexion forcée que la construction du système lui a imposée. Loin d'être propre au domaine de la voirie urbaine, ce phénomène a pu être constaté dans d'autres systèmes, notamment [Chouvet et Haton 91]. Nous avons de plus pu voir une évolution dans son attitude tout au long de notre travail en commun. Initialement, il hésitait à émettre des avis sur les connaissances formalisées (les règles de production) que nous lui présentions, par crainte de fournir des "règles fausses" probablement mais aussi parce qu'il souhaitait nous aider et qu'il ne savait et ne voyait pas comment exprimer sa connaissance. Il aurait souhaité pouvoir comparer ce qu'il faisait avec d'autres experts du domaine, de façon à dégager sa façon de faire. Il lui arrivait même de nous demander "comment nous faisons", c'est-à-dire comment le système se comportait dans pareil cas, comment nous avons modélisé pareil cas. Puis, au fur et à mesure de nos rencontres, il s'est affirmé et a fini par décréter que le système devait faire comme lui faisait.

- enfin, *pour nous*.

L'élaboration du système ROSY nous a conduits à travailler dans de nombreux domaines (acquisition des connaissances (cf. partie III), représentation des connaissances (cf. partie IV) et modélisation du raisonnement) où nous avons mené des réflexions passionnantes. Certaines ont abouti ; d'autres (principalement en représentation des connaissances) sont encore du domaine du futur. Nous avons ainsi pu décrire un processus d'acquisition des connaissances dans

le cadre de système multi-agents (cf. partie III, chapitre 3), faire évoluer et enrichir le générateur ATOME (cf. partie V) en fonction des raisonnements experts que nous avons rencontrés et acquérir une expérience en acquisition des connaissances.

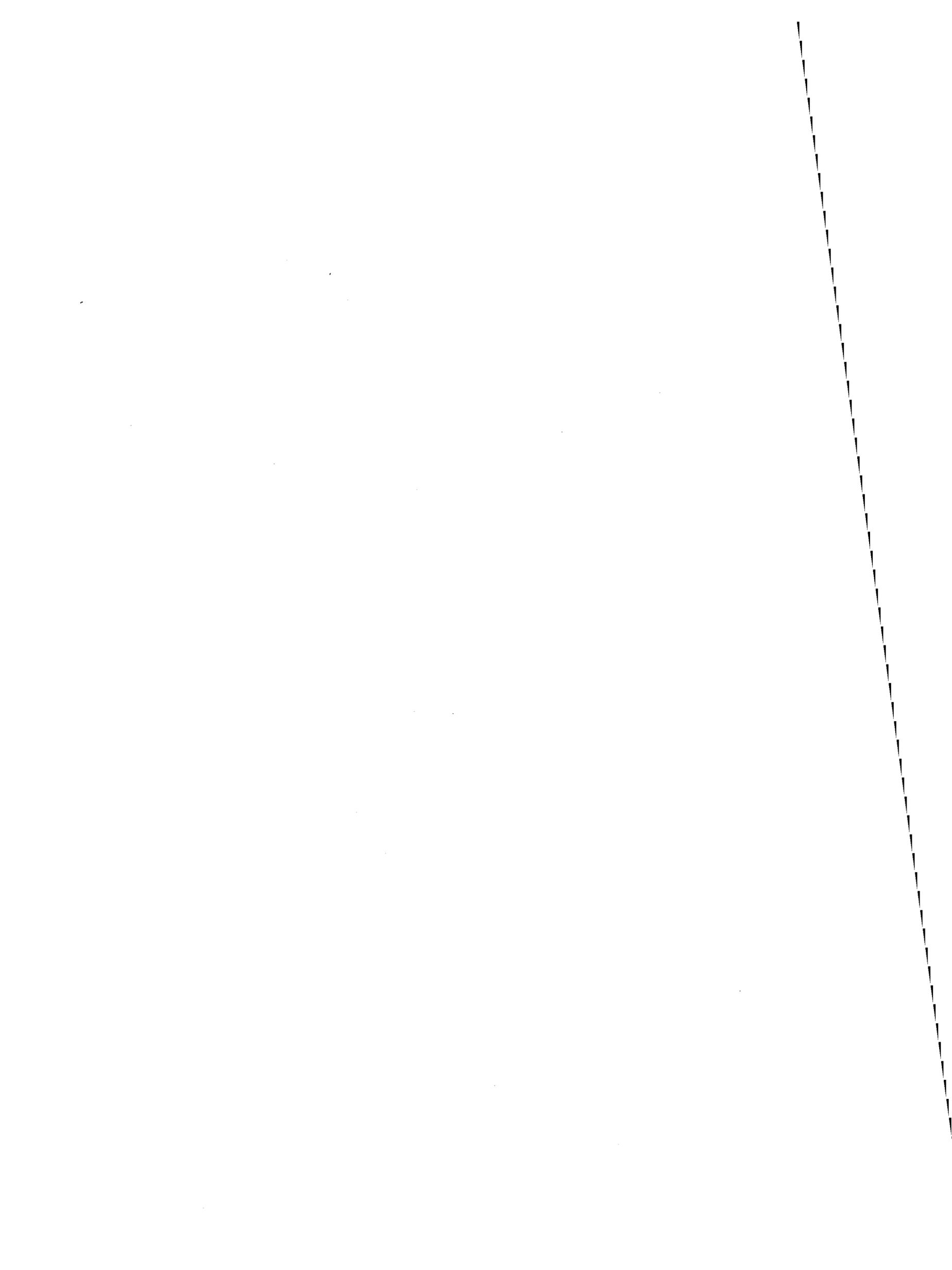
Nous tenons ici à plébisciter la démarche de recherche qui consiste à avoir un côté applicatif. Il est ainsi beaucoup plus facile de se rendre compte des problèmes potentiels. Cela évite de se poser des questions sans objet, dénuées de sens. C'est ainsi que nous avons pu proposer une amélioration de modèles théoriques tels que les événements de ATOME (cf. partie V, chapitre 3).

Cette partie a été pour l'essentiel descriptive. Elle fait état du développement actuel du SE ROSY, issu de l'analyse de la démarche experte et de l'acquisition des connaissances expertes. Nous allons voir, dans celle qui suit, comment cette acquisition s'est déroulée, les moyens que nous avons utilisés pour mettre ces connaissances en lumière et les méthodes que nous avons suivies dans ce but.

Nous abordons le problème de l'acquisition des connaissances dans un cadre général, avant de le centrer sur le SE ROSY et de l'élargir ensuite à tout système multi-agents.

PARTIE III

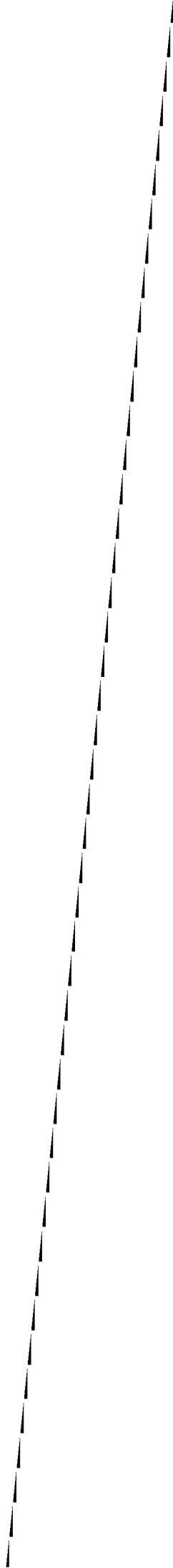
Acquisition des connaissances et systèmes multi-agents



L'acquisition des connaissances consiste à prendre en compte, structurer et formaliser le savoir-faire d'un domaine auquel on accède à travers un spécialiste. Elle est considérée comme la phase la plus coûteuse et la plus délicate de la construction d'un système à bases de connaissances ou d'un système expert. La preuve en est que le terme de goulot d'étranglement fait l'unanimité dans la communauté scientifique pour la qualifier. Il est en effet reconnu que de tels systèmes n'acquièrent leurs lettres de noblesse que grâce à la qualité (nature et pertinence) des connaissances acquises. Les performances de ces systèmes experts naissent de cette qualité, ce qui conditionne le fait que ceux-ci soient utilisés. Il est donc important d'attacher un soin particulier à cette étape dans la construction d'un système expert.

La phase d'acquisition de connaissances fait généralement appel à deux catégories de personnes : les experts et les cognitivistes. Les premiers sont la source de l'expertise et les seconds sont en quelque sorte les catalyseurs qui vont faciliter l'identification, la mise en lumière des connaissances expertes du domaine. Lorsque les cognitivistes sont aussi des informaticiens, ce qui est en général le cas et nous semble souhaitable, leur rôle consiste également à coder la connaissance recueillie sous une forme exploitable par un ordinateur. Dans le projet ROSY, nous nous sommes constituée en cognitiviste et avons essentiellement travaillé avec un expert du domaine, parfois deux, voire trois.

Cette partie présente l'acquisition des connaissances que nous avons menée dans le cadre du système ROSY. Nous nous plaçons tout d'abord sur un plan général et rappelons les difficultés qui sont inhérentes à cette phase ainsi que les techniques et méthodologies manuelles ou informatisées qui sont à la disposition du cognitiviste. Nous entrons ensuite dans le vif du sujet en décrivant la façon dont nous avons procédé avec l'expert en voirie urbaine. Nous insistons notamment sur la phase de familiarisation, présentons les techniques et outils que nous avons nous-mêmes utilisés, en dégageons les intérêts et concluons sur les enseignements que nous avons pu tirer de notre expérience. En prenant du recul à partir de cette expérience, nous avons identifié, dans notre façon de procéder, une interaction (ou boucle d'action mutuelle) entre acquisition et architecture logicielle du système en cours de construction. Cela nous a conduit à tracer la première ébauche d'une démarche en acquisition des connaissances dans un système multi-agents hiérarchique. Nous avons alors travaillé sur cette ébauche et avons ainsi défini une méthode systématique d'acquisition dans de tels systèmes, fondée sur la notion de constructeurs, qu'il nous semble possible de généraliser à tout système expert d'aide à la décision. Nous terminons en présentant les avantages et inconvénients de cette méthode et voyons comment il pourrait être possible de l'améliorer.



1

Acquisition des connaissances

Ce chapitre montre les difficultés auxquelles se heurte le cogniticien lors de la phase d'acquisition des connaissances, qu'elles soient inhérentes à cette phase elle-même ou provoquées par l'intervention du cogniticien. Il fait également un tour d'horizon (non exhaustif) des techniques manuelles qui sont proposées pour faciliter la tâche du cogniticien et se termine par une présentation des principaux outils informatiques développés dans ce même but. Les méthodologies sous-jacentes à ces outils seront succinctement décrites.

1.1 La problématique de l'acquisition des connaissances

1.1.1 Difficulté de par la nature même de la tâche

La nature même de la tâche est en cause. Il s'agit en effet de donner au système son intelligence en lui fournissant l'ensemble des connaissances sur lequel et grâce auquel il raisonne. Il faut donc mettre à jour le mécanisme selon lequel un expert raisonne c'est-à-dire un "processus mental humain". Ces trois mots résument toute la difficulté. Le fonctionnement d'un cerveau humain dépasse en effet de beaucoup l'entendement humain lui-même. Aussi la personne détentrice de l'expertise est-elle incapable d'expliquer comment elle procède, en partie parce qu'elle a du mal à exprimer sa connaissance mais surtout parce qu'elle ne sait pas comment elle fait.

Cette première difficulté en amène immédiatement une seconde. Dès lors que l'expert a du mal à décrire ou ne peut pas décrire sa façon de procéder, se pose le problème de savoir comment il est possible de l'amener à expliciter sa connaissance. Le cogniticien se trouve alors dans la même situation qu'un psychologue qui tente d'expliquer un comportement humain par ses manifestations extérieures, celles qu'il est possible d'observer, à la différence près que l'objet de l'étude est l'activité mentale humaine et que celle-ci n'est pas observable. Aussi se rapproche-t-il davantage du psychologue cognitiviste dont le but est principalement d'élucider les phénomènes susceptible de rendre compte de l'élaboration de comportements par un sujet [Caverni et Bastien 88]. Nous verrons d'ailleurs que les méthodes et techniques d'acquisition des connaissances en IA empruntent beaucoup à la psychologie cognitive (de nombreux auteurs ont mentionné

l'intérêt d'avoir une approche pluridisciplinaire dans ce domaine. Voir, par exemple, [Kayser 85], [Aussenac 89]).

Une telle tâche est ainsi la phase critique [David et Krivine 88] de la réalisation d'un système expert.

1.1.2 La nature et le type des connaissances

Peu de connaissances sont directement explicitables par l'expert. La majeure partie correspond en fait à des connaissances implicites, ou assimilées à de telles connaissances [Berry 87]. Les premières correspondent à des savoirs que l'expert s'est forgés tout au long de sa pratique, qu'il utilise sans même s'en rendre compte. Elles sont difficilement accessibles et communicables. Si le cogniticien pose une question à l'expert à leur sujet (à supposer qu'il ait pu les identifier), ou bien celui-ci ne saura pas répondre, ou bien il fournira une réponse incomplète, voire inexacte.

Les secondes sont parfois confondues avec les premières parce qu'elles sont rarement exprimées. Il s'agit de connaissances non explicites habituellement mais qui peuvent être rendues explicites car il est possible d'y accéder verbalement. Les connaissances de base, ou génériques, font partie de cette catégorie. Elles correspondent aux connaissances propres à un univers, qui paraissent évidentes à toute personne plongée dans cet univers et qui ne sont répertoriées dans aucun livre [Kayser 85]. Or, si ces connaissances semblent banales à un spécialiste du domaine, elles sont indispensables au raisonnement. Il faut donc prendre conscience de leur existence, de leur importance et encourager l'expert à les formuler.

Nous venons de voir que le simple fait qu'une connaissance soit explicite ne suffit pas à la rendre facilement exprimable. Un autre exemple en est que certaines de ces connaissances ne peuvent être transcrites par des mots. Il est parfois plus facile de montrer comment on fait quelque chose que de l'expliquer. D'autres connaissances présentent souvent la caractéristique d'être "compilées" et, de ce fait, ne donnent pas une image complète du raisonnement expert. Cela ajoute aux difficultés que nous avons déjà évoquées en 1.1.1.

La variété des connaissances impliquées est également une source de difficulté. Dans un unique domaine expert, se trouvent des connaissances de toutes sortes. Poussés par un besoin d'identification et de structuration de ces connaissances, les chercheurs en IA proposent diverses classifications, en se référant à des critères tirés de leur propre discipline ou d'autres disciplines :

- ainsi, D. Kayser discerne différents types de connaissances en fonction de leur niveau logique, c'est-à-dire de la capacité que l'on a à déterminer leur valeur "vrai" ou "faux". Il distingue les connaissances de définition (faits certains et toujours vrais), évolutives, incertaines, vagues, typiques et ambiguës [Kayser 85] ;
- la linguistique propose une distinction épistémologique de la connaissance : il existe des types génériques de connaissances, qu'il est intéressant de pouvoir discerner et qui sont organisés en différents niveaux d'abstraction

[Wielinga et Breuker 84]. Cette classification est à l'origine des premiers travaux de B.J. Wielinga et J.A. Breuker sur la définition d'un processus d'interprétation de données verbales, travaux qui ont abouti au développement de la méthode KADS ;

- une autre distinction issue de la linguistique est celle qui est à la base de la méthode KOD [Vogel 88]. Trois catégories de connaissances, correspondant aux modèles "représentation", "action" et "interprétation", y sont utilisées. Il s'agit là de différencier les objets du monde réel, les actions qui vont être menées sur ces objets et les inférences qui font progresser le raisonnement ;
- d'un point de vue plus informatique, il est possible de distinguer les connaissances en fonction de leur niveau de structuration. J.-L. Laurière définit ainsi toute une gamme d'entités, allant des éléments de base (les objets du monde réel) aux méta-connaissances et connaissances de classification [Laurière 82b].

La difficulté réside dans le fait que des connaissances aussi variées ne peuvent être acquises à l'aide d'une unique méthode. Avoir recours à des techniques qui ne tiennent pas compte de cette variété et ne sont pas adaptées au type des connaissances à recueillir peut conduire l'expert à faire des impasses sur des cas particuliers, à fournir un savoir plus théorique que pratique. Il s'agit donc, dans un premier temps, de reconnaître l'existence de diverses formes de connaissances, ce qui constitue, selon [Berry 87], un premier pas vers une acquisition effective des connaissances. Une étape antérieure d'identification de ces différents types est alors à prévoir. Dans un second temps, il faut aller prospecter du côté des sciences de la cognition et faire preuve d'imagination de manière à associer à chaque type de connaissances une méthode d'acquisition appropriée.

1.1.3 Le paradoxe de l'acquisition des connaissances

Le paradoxe lié au processus de l'acquisition des connaissances provient du fait que le cognitifien est dans une "perpétuelle ignorance" :

- au début, il ne connaît pas ce qu'il cherche à acquérir. Il lui faut donc se former au domaine, ce qui prend un certain temps ;
- plus tard, il ne sait pas si les connaissances obtenues sont pertinentes pour le problème à modéliser ;
- enfin, il ne sait pas déterminer le moment où il pourra s'arrêter d'acquérir des connaissances.

Nous exagérons évidemment en prétendant que le cognitifien ne sait pas ou ne connaît pas. Nous cherchons ainsi à faire ressortir le fait que le cognitifien a du mal à savoir et à connaître.

Cette difficulté est d'autant plus importante, dans le cas de la pertinence des connaissances acquises, que les connaissances nécessaires au système expert pour raisonner ne correspondent pas exactement à celles qui sont utilisées par l'expert. Il ne s'agit en effet pas de répertorier toutes les connaissances utilisées par l'expert pour raisonner mais seulement celles qui suffisent au système pour aboutir à des conclusions semblables. Cette situation est paradoxale puisque l'on cherche à reproduire une démarche experte en la prenant comme modèle mais en utilisant moins de données et des raisonnements parfois différents que ceux qu'elle-même utilise. Nous avons déjà fait allusion à un tel paradoxe dans la partie II, à travers l'exemple de la spécialiste *Sp-recherche-causes*. Lors de l'élaboration de cette spécialiste, le fait de penser que toutes les connaissances issues de la phase d'acquisition de l'expertise devaient être formalisées et codées dans ROSY (cf. le cas de la recherche des causes qui est présenté dans la partie II, en 3.2.2, page 73) nous a ainsi fait passer près d'une année à recueillir des données et un raisonnement dont nous n'utilisons actuellement qu'une partie.

1.1.4 La réticence de l'expert

Le simple fait de se trouver dans une phase d'acquisition des connaissances peut introduire un biais. L'expert est en effet dans une situation où il lui est demandé d'explicitier sa façon de faire, dans des conditions différentes de celles qui lui sont habituelles, ne serait-ce que par la seule présence du cognitifien. Il peut alors être réticent à cette acquisition parce qu'on lui demande de procéder différemment, parce qu'il se sent "espionné" dans son domaine ou parce qu'il a l'impression qu'il va devoir justifier systématiquement une démarche intuitive et les choix qu'il fait. Il peut également tout simplement agir différemment sans même s'en rendre compte, perturbé par l'inconnu qui est à ses côtés, qui peut lui avoir été imposé et qui l'observe constamment. Le cognitifien doit alors faire en sorte que l'expert ait confiance en lui et lui assure sa collaboration, ce qui se décide lors de l'étape de familiarisation. Nous y reviendrons en détail au paragraphe 2.2.

1.1.5 Distorsions des connaissances expertes

Les risques de distorsions de la connaissance experte peuvent être dus au cognitifien lui-même mais aussi au formalisme imposé par la façon dont les connaissances sont représentées.

Le cognitifien s'attaque à un domaine nouveau, qui lui est en général totalement inconnu, qu'il connaît de mieux en mieux au fur et à mesure que la construction du système expert avance mais qu'il ne maîtrise jamais parfaitement. Il peut alors se créer un décalage involontaire entre les connaissances de l'expert et celles implantées du fait de l'incompréhension du discours de l'expert, de pertes ou de déformations d'informations lors de la transmission du savoir-faire au cognitifien. Du fait des problèmes d'incompréhension qui peuvent se poser et des répercussions sur l'expertise acquise, il nous semble préférable qu'une même personne cumule les deux fonctions de cognitifien et de réalisateur du système expert : il n'y a ainsi qu'un seul transfert à effectuer et

pas un transfert "expert - cogniticien" puis "cogniticien - informaticien", ce qui limite les risques de déformation.

Cette situation peut également découler du fait que le cogniticien utilise un formalisme particulier pour représenter la connaissance experte. Il peut alors être tenté de la déformer de façon à ce qu'elle se prête mieux au formalisme sous lequel elle doit être codée.

Le formalisme peut également agir à la source, sur les connaissances qui sont fournies par l'expert lui-même. Une opinion couramment répandue qui est que l'expert exprime naturellement ses connaissances sous la forme de règles "si ... alors ...", (forme généralement utilisée pour représenter les connaissances heuristiques dans les systèmes experts), nous semble en effet totalement fausse. En nous fondant sur ce que nous avons pu constater dans le cas de la voirie urbaine, nous pouvons dire que l'expert ne sait généralement pas comment exprimer sa connaissance. Il décrit sa façon de procéder de manière très libre et pas du tout formalisée, en utilisant le langage naturel. Il n'a recours à un formalisme rigide que lorsque le cogniticien le lui impose involontairement, c'est-à-dire lorsqu'il lui présente des connaissances acquises antérieurement et déjà mises sous un format particulier. Cela est flagrant dans le cadre du SE ROSY. Nous avons utilisé deux formalismes de représentation de la connaissance experte : les règles de production ("si *condition* alors *action*") et les règles graduelles ("plus X, plus Y"). Chaque fois que nous présentions des connaissances sous l'une ou l'autre forme à l'expert pour validation, toute nouvelle bribe de savoir qu'il pouvait alors proposer était immanquablement exprimée dans le formalisme de la dernière règle qu'il avait eue sous les yeux.

L'expert se plie en fait à un formalisme donné parce que, dit-il, "il aimerait bien nous aider mais il ne sait pas comment s'y prendre". Opter pour le formalisme sous lequel la connaissance va être codée lui semble ainsi être une aide précieuse pour le cogniticien : ce dernier n'a alors pas à retravailler les verbalisations et les protocoles obtenus pour en extraire la connaissance et la mettre sous une forme exploitable par le système expert. Le désir de respecter un formalisme peut alors le contraindre dans sa façon de penser et risque de le pousser, tout comme le cogniticien, à déformer inconsciemment sa connaissance, à l'adapter ou à ne l'exprimer que partiellement pour qu'elle puisse se mouler dans le formalisme voulu. Il y a alors risque de biaiser la connaissance experte : une expression telle que "si x alors y " peut en effet avoir une sémantique totalement différente d'une personne à l'autre, d'un exemple à l'autre. Ce qu'elle signifie pour l'expert ne correspond pas forcément à ce qu'elle peut signifier pour le cogniticien. Seule une bonne familiarisation avec le domaine (cf. 2.2) peut permettre au cogniticien d'identifier de tels biais dans la connaissance.

Le processus d'acquisition des connaissances comporte donc de nombreuses difficultés dont trois majeures : la nature de la connaissance à recueillir, la méthode à adopter pour faire expliciter cette connaissance à l'expert sans introduire de biais et le moment à partir duquel le cogniticien peut considérer que le système comporte des connaissances et des raisonnements suffisants à reproduire le raisonnement expert. De

nombreux chercheurs, que ce soit en IA ou en psychologie cognitive, se sont penchés sur le problème. Ils proposent des méthodes et outils, prodiguent des conseils, indiquent des directives à suivre dans un même but: faciliter le travail du cogniticien. Quelques-unes des techniques manuelles proposées, ainsi que des réalisations informatiques d'aide à l'acquisition des connaissances, sont présentées dans la suite de ce chapitre.

1.2 Techniques, méthodes et outils proposés

Plusieurs approches sont mises à la disposition des cognitiens. Deux sont communément distinguées : les approches manuelles (ou "cognitiennes") et les approches automatisées. Les premières sont essentiellement fondées sur la compétence d'un médiateur humain : le cogniticien [Boy *et al.* 88]. Elles regroupent des techniques directement issues de la pratique de l'acquisition des connaissances en IA (les techniques heuristiques) ou des techniques plus élaborées issues de la psychologie cognitive. M. Musen et T. Gruber font remarquer à juste titre dans [Musen et Gruber 91] que le fait que ces techniques ne soient pas automatisées ne signifie pas qu'elles soient sans principe. Elles sont de plus systématiquement à la base des méthodes automatisées. Ces dernières ont pour but d'assister le cogniticien dans le processus d'acquisition. Il s'agit donc bien d'aides à l'acquisition des connaissances et pas d'outils autonomes d'acquisition. Elles font l'objet du second paragraphe.

1.2.1 Techniques manuelles

J. Reitman Olson et H. Rueter [Olson et Rueter 87] s'attardent sur les méthodes pratiques d'investigation. Ils distinguent entre deux catégories de méthodes : directes et indirectes. Les méthodes directes se rapportent aux connaissances que l'expert peut directement exprimer. Elles incluent les interviews, les questionnaires¹, l'observation toute simple de l'expert lors d'une résolution de problème, l'analyse de protocole (qui est une méthode à la fois directe et indirecte), ... Des conseils sont prodigués quant à l'utilisation de ces techniques. Il est notamment conseillé, lors des interviews, d'enregistrer le discours de l'expert (nous discutons les intérêts de l'enregistrement en 2.3.1). De même, le cogniticien doit s'assurer de la coopération de l'expert, dont nous expliquons l'importance au chapitre suivant en voyant le rôle joué par la phase de familiarisation dans ce but (cf. 2.2.2).

Au contraire, les méthodes indirectes consistent à analyser un comportement de l'expert, un document ou une réponse fournis par l'expert de façon à en déduire les connaissances qu'il a dû mettre en jeu pour se comporter, rédiger ou répondre comme il l'a fait. Elles comprennent l'échelonnement multi-dimensionnel, la méthode d'analyse des grilles répertoires issue de la "personal construct theory" de J. Kelly, etc.

Chacune de ces méthodes est destinée à révéler les différentes sortes d'informa-

1. Les questionnaires ont ici un sens différent de celui que nous leur donnons en 2.3.2. Nos questionnaires ne portent pas sur la description d'un concept, comme c'est ici le cas.

tions (objets, relations, règles d'inférence) et de structures (listes, tables, hiérarchie, réseaux, ...).

Le cogniticien peut également intervenir dans le processus d'acquisition pour le faciliter lors de réunions avec l'expert, bien qu'il lui faille veiller à ne pas imposer son point de vue. Des techniques d'intervention sont proposées dans [Mahé et Vesoul 87] :

- la reformulation, qui consiste à réexprimer ce qu'a dit l'expert. Le cogniticien peut alors s'assurer qu'il a fait une bonne interprétation des propos de l'expert et qu'il n'entâche pas la connaissance de biais. Dans pareil cas, l'expert interviendra dans la reformulation pour la préciser ou la corriger ;
- l'appel à explication, lorsque l'expert a de bonnes capacités à expliquer ;
- la contradiction, volontaire ou à partir d'un lapsus de l'expert. Elle est destinée à faire réagir l'expert à des propos contradictoires et à recueillir ainsi ses réactions et verbalisations.

Nous reviendrons de façon plus détaillée sur certaines de ces techniques au chapitre 2 où nous présentons notre expérience dans le cadre de la voirie urbaine. Nous y expliquons en quoi elles nous ont été utiles pour l'acquisition des connaissances de l'expert. Nous y décrivons également les techniques propres au domaine (notamment à l'expertise visuelle) qu'elles nous ont inspirées et montrons les connaissances que ces techniques propres nous ont permis d'acquérir.

1.2.2 Techniques et méthodes informatisées

Nous ne souhaitons pas ici détailler l'ensemble des outils informatiques qui ont été développés dans le but d'aider au développement de systèmes à base de connaissances et, plus particulièrement, à l'acquisition. Il s'agit plutôt de donner un aperçu des outils existants en nous référant principalement à [Musen et Gruber 91] et [Nwana *et al.* 91].

Les méthodes et outils que nous présentons ici considèrent le processus d'acquisition des connaissances comme un problème de modélisation. Ils sont fondés sur l'analyse au niveau de la connaissance (*knowledge level analysis*), processus permettant de modéliser un comportement intelligent. Les principaux moyens de prendre en compte cette analyse consistent à :

- utiliser un langage de modélisation. Nous pouvons alors citer :
 - l'analyse ontologique [Alexander *et al.* 87], qui propose un langage pour modéliser la connaissance indépendamment de la forme terminale que celle-ci prendra dans le système à bases de connaissances à développer,
 - les graphes conceptuels de Sowa [Clancey 85a], qui permettent de représenter l'expertise sous la forme de diagrammes. L'expert et le cogniticien travaillent alors sur ces graphes jusqu'à obtenir une représentation de l'expertise qu'ils jugent satisfaisante,

- les réseaux SGN (Systemic Grammar Network) qui constituent une représentation médiane entre les données verbales de l'expert et le formalisme d'un système d'IA. Ils offrent ainsi la possibilité de modéliser conceptuellement une expertise, sans avoir recours à un langage de représentation formel (règles de production ou autres).

Notons que le système MACAO [Aussenac et Soubié 89] fournit également une telle représentation. Il a de plus recours à un modèle cognitif de l'expert ;

- utiliser un modèle prédéfini de méthodes de résolution de problèmes (implicite ou explicite). Ces méthodes peuvent être combinées de façon à reproduire un raisonnement dans le cadre d'une application particulière de système expert. C'est dans ce but que B. Chandrasekaran a introduit les *generic tasks* [Chandrasekaran 87], qui se rapprochent de la distinction entre deux catégories principales de méthodes que W. Clancey propose [Clancey 85b] :
 - la classification. Le raisonnement consiste alors à choisir une solution parmi un ensemble de solutions prédéfinies. Il y a abstraction de données, appariement heuristique et affinement de la solution ainsi retenue,
 - la construction. La solution est ici construite et affinée au cours de la résolution.

Ces travaux ont grandement influencé le développement d'outils d'aide à l'acquisition. Une classification de ces outils (cf. figure 1.1) peut alors être établie en fonction de la méthode de résolution de problème à laquelle ils font référence.

Nous reprenons des exemples des outils ci-dessus dans ce qui suit après avoir traité le cas des méthodes d'acquisition des connaissances.

a - Les méthodes

Nous nous attardons ici sur les méthodologies KADS et KOD qui font actuellement référence, en France et en Europe, en matière d'acquisition des connaissances. KADS a recours à un modèle hiérarchique d'interprétation des données [Wielinga et Breuker 84] qui est à la fois proche des modèles cognitifs et des modèles de résolution de problème. Il favorise un recueil méthodique des connaissances. Son architecture comprend quatre niveaux d'abstraction (cf. 1.1.2), modélisés sur la figure 1.2.

Contrairement à la plupart des systèmes et méthodes d'acquisition des connaissances, il permet une modélisation du problème indépendamment du domaine. Appliqué à un domaine particulier, ce modèle générique permet de construire un modèle conceptuel de l'expertise en tenant compte des niveaux où se situent les connaissances à modéliser. Le concepteur utilise pour cela un ensemble de primitives prédéfinies, qui servent à modéliser les connaissances des niveaux *inférence* et *tâche*. Il s'agit alors d'interpréter les protocoles verbaux des experts et de les faire coïncider avec l'une de ces primitives. La méthode suggère une analyse descendante des connaissances expertes, aux différents niveaux successivement. Nous verrons au chapitre 3 de cette partie que la méthode que nous proposons comporte également une telle analyse.

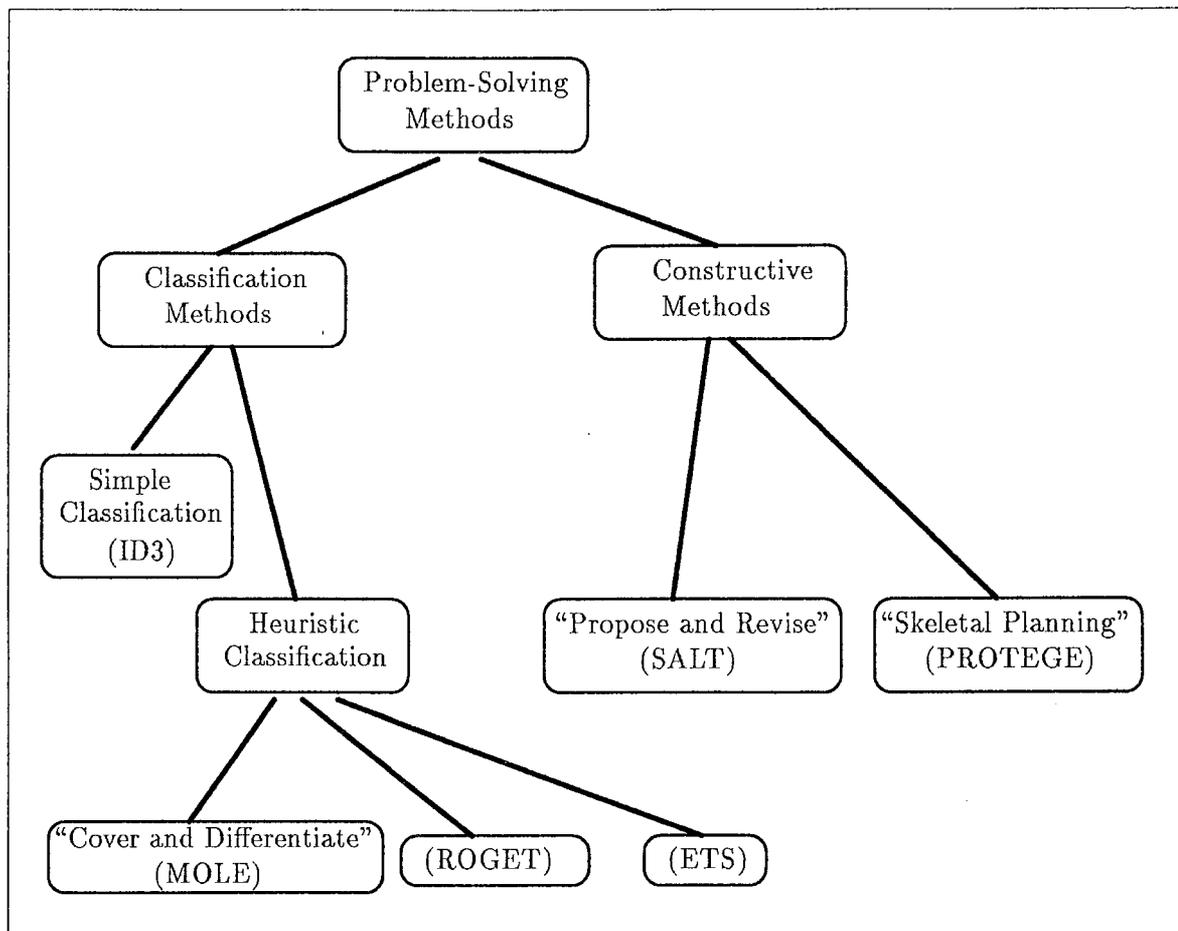


Figure 1.1. Outils d'aide à l'acquisition dans lesquels une méthode de résolution de problèmes est sous-jacente (d'après [Musen et Gruber 91]).

Cette méthodologie a été informatisée dans l'atelier SHELLEY, qui propose notamment des éditeurs de protocoles verbaux, une analyse lexicale de ces protocoles, la visualisation graphique des relations entre concepts, un accès aux modèles d'interprétation (les primitives ci-dessus), ...

La méthode KOD, pour sa part, consiste en la définition de trois modèles eux-mêmes centrés sur les paradigmes de représentation, action et interprétation :

- le modèle *pratique*, très proche du discours de l'expert et des sources documentaires, se fonde sur la distinction de trois modes de langage. Le statif ("être, avoir") fait référence au paradigme de représentation, le factif ("faire") à celui d'action et le déclaratif ("dire") à celui d'interprétation. Le but du modèle pratique est de déterminer, à partir de la collecte des connaissances de l'expert, les taxèmes, actèmes et interprétations qui correspondent aux différences linguistiques que nous avons mentionnées et, au-delà, aux trois paradigmes ;

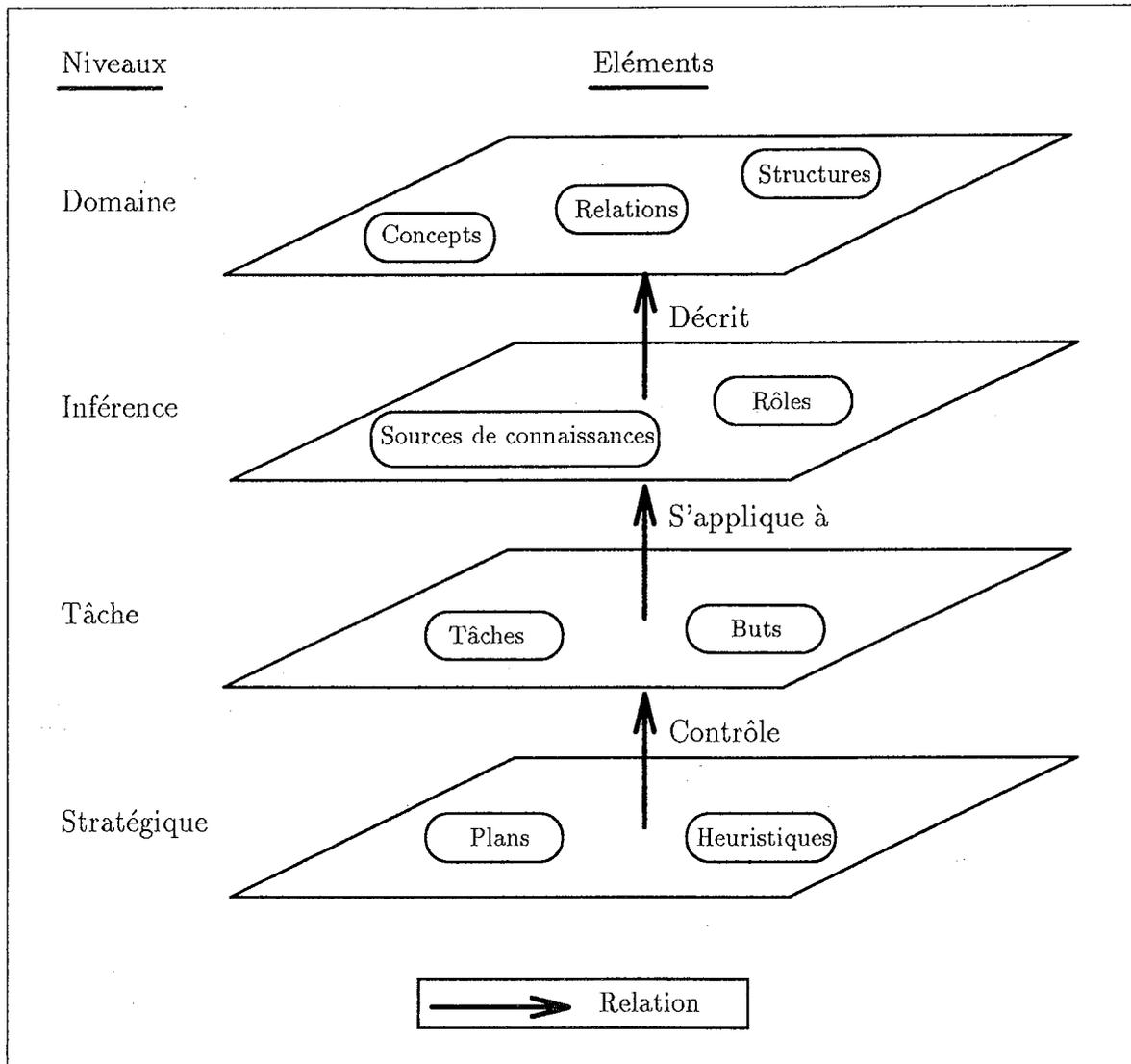


Figure 1.2. Les niveaux d'abstraction dans la méthodologie KADS.

- le modèle *cognitif* structure les données de l'expert en "connaissances". Il se situe dans une position intermédiaire entre le discours de l'expert et le langage informatique de modélisation. Il est construit à partir du modèle pratique et d'interviews supplémentaires de l'expert. Les trois paradigmes sont définis, à ce niveau, par les notions de taxinomie, d'actinomie et de schéma. La première regroupe les taxèmes sur la base des relations qui les lient (création de classifications), la seconde reflète les enchaînements des actions de l'expert alors que la troisième regroupe les inférences liées à un contexte (correspondant aux connaissances compilées de l'expert) ;
- le modèle *informatique* décrit les techniques d'implantation choisies.

KOD souhaite rester le plus près possible du discours de l'expert, facilitant ainsi la

validation de chacun des modèles obtenus. Cette méthodologie est implantée dans la KOD-station développée par ILOG qui comporte principalement :

- des éditeurs des protocoles de l'expert. Il est alors possible de manipuler le texte saisi à la manière des hypertextes et d'en dégager les concepts, objets, relations, ... qui viennent enrichir les divers dictionnaires et lexiques ;
- des éditeurs graphiques spécialisés, permettant de visualiser les classifications ;
- la gestion de pointeurs entre texte d'origine et représentations partiellement formalisées.

Notons enfin que cette méthode a été étendue aux phases de développement de systèmes experts en aval dans le cadre d'une collaboration avec France Telecom [Cormier *et al.* 91]. La méthode résultante, baptisée KODMS, comporte notamment deux phases de conception, l'une globale, l'autre détaillée. Les phases ascendantes et descendantes que nous proposons au chapitre 3 s'en rapprochent.

b - Les outils

Il existe de nombreux outils d'aide à l'acquisition des connaissances, bien que la plupart ne soient que des prototypes. Nous les répartissons en quatre catégories suivant qu'ils sont spécifiques d'une tâche, spécifiques d'une méthode de résolution², fondés sur la méthode des grilles répertoires, ou généraux :

- les outils spécifiques d'une tâche (ou "orientés tâche").

Il s'agit d'outils disposant d'un modèle général de la tâche. Le recueil des connaissances a lieu à un niveau beaucoup plus proche du domaine. Définir une application revient alors à appliquer les termes et les relations explicites du modèle général à une de ses instances. Nous pouvons citer :

- OPAL [Musen *et al.* 87] qui acquiert de nouveaux plans de traitement de cancer par le biais de graphiques destinés aux experts du domaine. Il a été réalisé pour aider au développement de la base de connaissances de ONCOCIN. Il crée des extensions du modèle générique de la tâche ;
- PROTEGE qui se place à un niveau "méta" en aidant à la définition d'un modèle conceptuel de tâche. Il permet ainsi de construire des outils d'acquisition de connaissances "orientés tâche" (du même type que OPAL) sur mesure. Il agit donc en tant que générateur d'outils d'aide à l'acquisition des connaissances ;
- SMAC est destiné à l'acquisition de connaissance dans le cadre d'une activité de conception. Il a recours à une représentation intermédiaire des connaissances s'appuyant sur un outil hypertexte pour en favoriser une

2. A ne pas confondre avec le modèle de résolution de problèmes auquel la plupart des outils cités ici font appel (cf. 1.3).

structuration arborescente en fonction de leur signification ou de leur rôle [Moulin 90];

- les outils spécifiques d'une méthode de résolution.
 - TEIRESIAS [Davis 79] détecte les erreurs et les éventuelles omissions de la base de connaissances de MYCIN. Il fournit alors une aide interactive à l'utilisateur pour placer de nouvelles règles dans la base ou pour modifier des règles existantes. Il opère à l'aide de modèles de règles d'une méthode de résolution implicite : la classification heuristique. Son utilisation nécessite de la part de l'utilisateur une bonne connaissance des mécanismes des systèmes experts, ce qui explique qu'il n'ait que très peu été utilisé par les experts auxquels il était destiné;
 - SALT [Marcus et McDermott 88] repose sur un modèle de type essai/erreur. Il est destiné à fournir des bases de règles au format OPS5;
 - ROGET [Bennett 85], tout comme TEIRESIAS, mène un dialogue avec l'utilisateur à propos de diagnostic médical. Il est destiné à guider l'organisation de l'expertise en fournissant un graphe composé de catégories abstraites du domaine (buts, faits et inférences);
 - MOLE et son prédécesseur MORE [Kahn *et al.* 85] se réfèrent à la forme spécialisée de classification heuristique appelée *cover-and-differentiate*;

- les outils fondés sur la méthode des grilles répertoires.

Ces outils utilisent en fait un modèle de résolution de la tâche implicite. Le plus souvent, il s'agit de la classification heuristique. Les plus connus de ces outils sont certainement ETS [Boose 84] et son successeur AQUINAS [Boose et Bradshaw 87]. Ils automatisent la méthode de la "Personal Construct Theory". En exploitant les grilles répertoires qu'ils acquièrent auprès d'experts du domaine, ils construisent un graphe qui révèle la distance sémantique entre les concepts et des relations d'implication possibles. D'autres systèmes, tels que PLANET, KITTEN [Shaw et Gaines 87] ou MACAO ont également recours à cette méthode;

- les outils généraux.

Il s'agit d'environnements logiciels complets qui tentent de fournir une aide maximale au cognicien dans le processus d'acquisition. L'atelier SHELLEY (méthodologie KADS) et la KOD-station font notamment partie de cette catégorie.

Une autre classification de ces outils est entreprise dans [Musen et Gruber 91]. Les outils y sont différenciés selon que leur but est de formuler des modèles ou de construire des systèmes à base de connaissances. La première catégorie comprend les éditeurs hypertextes ou encore l'atelier SHELLEY. La seconde distingue à nouveau plusieurs types d'outils en fonction de leur principe de base, ce qui est résumé sur la figure 1.3. Ces outils, dont l'utilité et l'efficacité est incontestable lorsqu'ils sont utilisés pour les classes de problèmes pour lesquelles ils ont été définis, sont paradoxalement eux-mêmes la cause de difficultés dans le processus d'acquisition lorsqu'ils sont utilisés à

	Name	Applicable to tasks	Problem solving method
Symbol-level	KB editors	Depends on formalism	None
	TEIRESIAS	Diagnosis	Implicit
Method-oriented	ROGET	Classification	Heuristic classification
	SALT	Configuration, Scheduling	Propose and revise
	PROTOS	Classification	Case-based reasoning
	ETS	Classification	Classification (implicit)
Task-specific	OPAL	Cancer therapy	Implicit
Acquires-method	ASK	Reactive planning	Propose, filter, select
Generates tool	PROTEGE	Skeletal planning	Skeletal-plan refinement

Figure 1.3. Les outils de constructions de systèmes à bases de connaissances (d'après [Musen et Gruber 91]).

tort. Cette utilisation abusive provient du fait qu'il n'existe actuellement que très peu de guides indiquant quelle méthode choisir et quand l'appliquer. Nous reviendrons sur ce phénomène au chapitre suivant, lors de la présentation de la méthode que nous proposons. Auparavant, nous décrivons les techniques que nous avons nous-mêmes utilisées.

2

L'expérience de la voirie urbaine

2.1 Les difficultés liées au problème de la voirie urbaine

Comme toute acquisition de connaissances, celle que nous avons menée et continuons à mener dans le cadre du SE ROSY est une tâche difficile. Outre les difficultés d'ordre général qui font partie de ce que nous avons présenté en 1.1, des problèmes particuliers à la voirie urbaine se posent. Ils ont trait à la nature de la connaissance et aux préoccupations premières de l'expert.

2.1.1 Une expertise visuelle

Nous avons pu constater, lors de la description de la démarche experte dans la partie II, que le domaine de la voirie urbaine comporte une large part de visuel. C'est en observant les chaussées que l'expert va diagnostiquer leur état, les comparer et attribuer à chacune un mode de réfection approprié. Or les connaissances visuelles, tout comme les connaissances spatiales ou kinesthésiques, sont particulièrement difficiles à acquérir. Il est en effet ardu d'identifier les éléments que l'expert a pris en compte pour conclure, ceux qu'il a retenus parmi la quantité énorme d'informations visuelles qu'il capte et de les modéliser ensuite sous une forme symbolique ou numérique. Cela est d'autant plus difficile que l'observation d'une chaussée peut se faire à plusieurs niveaux de détail et que nous ne disposons pas d'appareil permettant d'analyser le mouvement des yeux de l'expert.

En fait, cette dernière technique ne nous semble pas applicable au domaine de la voirie urbaine. Les exemples que nous avons pu rencontrer dans nos lectures [Levy-Schoen 88] ne portent que sur un champ de vision relativement délimité, l'observation pouvant se faire alors que l'expert est assis à un bureau. Dans le cas de la voirie urbaine, l'échelle nous semble trop importante et l'environnement trop bruyé (il y aurait en effet de nombreux mouvements d'yeux non dus à la résolution de problèmes, ne serait-ce que pour traverser la rue en toute sécurité) pour qu'il soit possible d'utiliser une telle technique. Qui plus est, il faudrait la combiner à une analyse du mouvement de l'expert le long de la chaussée.

Une composante nouvelle dans la variété des types de connaissances est ainsi présente : la forme des connaissances. Il faut alors en tenir compte dans la façon d'acquérir les connaissances.

2.1.2 Les préoccupations de l'expert

L'expert est essentiellement préoccupé par le choix du mode de réfection, puisque ce choix correspond au but à atteindre. Cela s'est répercuté sur la façon dont le savoir-faire a été transmis. L'ensemble des analyses de protocoles, questionnaires, interviews, ... a très souvent eu comme sujet la recherche du mode de réfection adéquat. Inconsciemment, nous avons nous-mêmes proposé de tels sujets. *A posteriori*, nous voyons deux raisons à cela :

- tout d'abord, les premières séances d'acquisition (correspondant à l'étape de familiarisation) avaient été laissées à l'initiative de l'expert. Il en était en effet le principal acteur vu qu'il lui fallait nous faire découvrir son domaine. Toutes ces séances eurent pour sujet la détermination du mode de réfection ;
- ensuite, nous sentions l'expert beaucoup plus à l'aise lorsque nos rencontres portaient sur ce sujet que lorsque nous lui demandions de travailler sur un point particulier de son domaine, sur une des composantes de l'ensemble de son expertise.

Aussi les différentes étapes qui conduisent au choix du mode de réfection et les connaissances impliquées dans ces étapes ont-elles été, en majeure partie, identifiées à travers l'analyse de l'ensemble de la démarche experte, ce qui nous a demandé de scruter davantage les données que nous pouvions recueillir pour en extraire la démarche experte.

Une certaine variété dans les sujets des séances d'acquisition ne fut introduite que lorsque toutes les compétences intervenant dans l'expertise furent identifiées. La préférence de l'expert allait toujours, cependant, aux séances traitant de son sujet de prédilection. Aussi ces séances furent-elles toujours beaucoup plus bénéfiques que d'autres. Cela nous mettait alors dans une situation délicate où nous avions à faire face à un conflit : la diversification des sujets nous semblait obligatoire mais fallait-il la poursuivre sachant que nous obtenions de moins bons résultats ?

2.1.3 Un expert plus "pratique" que "théorique"

L'inégalité dans les résultats obtenus d'une séance d'acquisition à une autre est due non seulement au sujet qui a été choisi mais aussi au fait de faire référence à du concret ou à de l'abstrait. Nous avons en effet pu constater que l'expert raisonne beaucoup plus facilement sur des exemples concrets que sur l'entité abstraite dénommée "rue" sur laquelle nous lui demandons de raisonner. Une tendance naturelle le pousse à traiter des cas réels, à prendre de nombreux exemples pour illustrer ses propos. Des connaissances peuvent alors venir s'immiscer dans le raisonnement et échapper au cognicien, sans qu'il le soupçonne :

- lorsqu'il lui est demandé de travailler dans le cas général (sur de l'abstrait donc), l'expert peut alors songer à un ou plusieurs cas particuliers sur lesquels il appuiera son raisonnement sans y faire allusion explicitement ;
- lorsqu'il travaille sur un cas particulier, il peut de même utiliser implicitement des données liées au cas à traiter, sans mentionner leur utilisation. Le cogniticien n'en a pas connaissance.

N'ayant que peu d'expérience dans le domaine, le cogniticien peut difficilement connaître le domaine de validité de la connaissance ainsi recueillie et savoir si celle-ci est complète ou éventuellement erronée : est-elle limitée au cas particulier que l'expert évoquait ? N'est-elle valable que dans des conditions particulières qui n'ont pas été explicitées ? ...

Le phénomène que nous soulignons ici (qui n'est pas propre à la voirie urbaine) nous a gênés pendant une bonne partie de la phase d'acquisition des connaissances, jusqu'à ce que nous nous rendions compte qu'il s'agissait d'une attitude normale pour un expert (c'est en effet de son expérience, donc du fait de traiter de nombreux cas, que l'expert acquiert son statut d'expert) et de bénéfique pour l'acquisition. Nous reviendrons sur cette constatation dans le paragraphe traitant des enseignements que nous avons tirés de notre expérience en acquisition des connaissances (cf. 2.4).

2.2 L'étape de familiarisation

La familiarisation constitue l'entrée en matière d'une phase d'acquisition des connaissances. Elle permet tout d'abord de déterminer les limites du problème, de voir ce que le futur utilisateur souhaite et ce qu'il est envisageable de faire. Elle vise ensuite l'objectif que chacune des deux parties en présence, personne qui acquiert et personne qui fournit la connaissance, entre dans le monde de l'autre, s'imprègne du domaine de l'autre. Cognition et expert ont en effet à faire des efforts, tout au long de la phase d'acquisition, pour une bonne compréhension mutuelle. Enfin, c'est lors de cette phase que s'élaborent les futurs rapports entre expert et cogniticien. Un premier contact est établi, qui conditionne toute la suite du travail d'acquisition.

Aussi la familiarisation nous semble-t-elle être l'étape la plus importante de l'ensemble du processus d'acquisition des connaissances, aussi bien pour le cogniticien que pour l'expert et que pour l'association qui se crée entre les deux. Nous montrons cette importance dans la suite de ce paragraphe, en analysant la façon dont nous avons procédé dans le cadre du projet ROSY. Nous en profitons pour dégager l'intérêt des techniques que nous avons utilisées.

2.2.1 La familiarisation du cogniticien avec le domaine de l'expertise

a - La familiarisation dans le projet ROSY

Notre apprentissage du domaine de la voirie urbaine s'est tout d'abord fait par la consultation d'ouvrages spécialisés en voirie (par exemple, [ENPC 85] ou [Ministère 87]) et par quelques réunions avec les experts, qui précisaient davantage les limites de la réalisation désirée que ce qu'elles présentaient le domaine. Cela constituait une première ouverture sur le monde de l'expert, où il nous était donné d'apprendre ce qu'était un corps de chaussée, le nom des différentes dégradations qui peuvent se former et leur aspect (par quelques photographies dont nous disposions), le nom de certains matériaux, ...

Après les lectures, vinrent les "visites" dans les rues de Nancy. Très rapidement, l'expert nous a conduite sur le terrain pour nous faire découvrir son domaine. Les quelques photographies que nous avons rencontrées dans les ouvrages du domaine ne nous permettait en effet guère de nous rendre compte de ce qu'était la voirie urbaine. La composante visuelle que nous avons mentionnée dans la partie II (cf. 2.2.1) était en effet par trop absente. Or, s'il est difficile de décrire à une personne un objet que l'on voit, quoi de plus simple que de le lui montrer. Des mots qui ne voulaient jusque là rien dire, ou si peu, ont pris des formes, des structures, des dimensions : ils ont été concrétisés par une image. Nous avons ainsi vu ce qu'était un enrobé bitumineux, une pelade, un faïençage, ... Une fois sur le terrain, l'expert entraînait tout de suite dans le vif du sujet et procédait comme il en a l'habitude à une expertise, mais en tenant compte de notre présence. Il se donnait en effet la peine de nommer ce qu'il voyait, de nous expliquer les phénomènes physiques liés au processus de dégradation d'une chaussée, ... : il nous introduisait dans son domaine.

Lors de cette phase d'apprentissage, tout ce qui est dit concernant la façon de résoudre le problème est plus ou moins perdu :

- plus, car nous étions encore trop novice dans le domaine pour parvenir à percevoir les éléments pertinents de l'expertise, l'importance réelle des différents paramètres introduits ;
- plus, car notre attention se focalisait sur tout ce qui était alors nouveau et plus particulièrement l'aspect visuel du problème. Nous ne prêtions qu'une oreille peu attentive à ce qui était dit ;
- moins, car nous parvenions malgré tout à noter le discours de l'expert. Une partie de ce qui était dit était ainsi conservée et pouvait être ultérieurement analysée.

b - Les enseignements à en tirer

Deux composantes ressortent de notre familiarisation au domaine de la voirie urbaine. La première est l'apprentissage du vocabulaire de l'expert. Il est nécessaire que

le cogniticien maîtrise bien ce langage de façon à éviter toute confusion, tout malentendu qui risquerait de l'embrouiller ou de faire naître de fausses idées dans son esprit. Il y a un gain de temps appréciable dans la suite du processus d'acquisition.

Le meilleur moyen de réaliser cet apprentissage nous semble être la lecture d'ouvrages du domaine, point de départ obligé de toute acquisition de connaissances. Bien que de tels livres présentent l'inconvénient d'être par trop spécialisés pour un novice et que le cogniticien n'y apprenne en général rien sur la façon dont l'expert raisonne, il est néanmoins sensibilisé à tout un vocabulaire dont il n'a pas l'habitude. Il acquiert ainsi des réflexes qui le poussent à réagir (en demandant des explications complémentaires, si nécessaire) aux propos tenus par l'expert lorsqu'il entend un mot rencontré dans ses lectures. Il s'agit là d'un bon moyen de se familiariser rapidement avec les objets du domaine, en n'ayant que moyennement recours à l'expert. Le cogniticien modère ainsi la participation de l'expert, se la réservant pour la suite de la phase d'acquisition (où il y fera beaucoup plus appel) et diminuant ainsi les risques de la voir un jour s'annuler.

Cela demande un premier investissement de la part du cogniticien et nécessite un certain temps d'adaptation au cours duquel les concepts manipulés sont identifiés, la connaissance sur le raisonnement est perçue mais en partie perdue. Cependant, cette étape lui permet d'avoir une vaste présentation des différents cas possibles, auxquels il peut faire appel dans la suite du processus d'acquisition des connaissances. Ses souvenirs lui permettront alors de présenter un contre-exemple à ce que l'expert peut décrire comme étant une généralité, de déceler d'éventuelles erreurs ou omissions dans l'expertise qu'il formalise, ... Cette rencontre avec de nombreux cas lui fournit déjà un certain bagage dans le domaine et des références auxquelles se raccrocher dans la suite.

2.2.2 La motivation de l'expert

Nous avons évoqué, au paragraphe 1.1.4, une éventuelle réticence de l'expert à expliciter ses connaissances. Il s'agit d'un problème que nous n'avons pas du tout rencontré dans le projet ROSY du fait de la motivation de l'expert, de son volontariat et des liens de confiance mutuelle qui se sont tissés entre lui et nous.

L'expert partage en effet bien volontiers sa connaissance lorsqu'il est volontaire. Il est impératif qu'un expert soit préparé à participer à un projet de système expert. La réussite de la réalisation du projet dépendant en grande partie de la connaissance qu'il est possible d'acquérir, la personne qui fournit cette connaissance doit être motivée à mener le projet au bout. C'est en effet la condition *sine qua non* pour éviter de se trouver dans une situation où l'expert ne serait pas coopérant.

Le transfert se fait d'autant plus volontiers que l'expert considère le système expert comme un moyen de progresser, d'améliorer son savoir-faire. Recherchant perpétuellement la meilleure maîtrise possible de son domaine, il sera intéressé par l'acquisition et fier de faire partager ce qu'il sait.

C'est au cogniticien que revient la lourde tâche de faire en sorte que l'expert perçoive le SE selon l'optique décrite ci-dessus. Il doit ensuite s'attacher à développer la motivation de l'expert et à l'entretenir. Il lui faut également le responsabiliser en lui

confiant la mission de “communicateur” de l’expertise, et l’encourager à confirmer sa participation [d’Agapeyeff 88].

De façon analogue à ce que l’expert a entrepris avec lui, il lui faut aussi se préoccuper de la formation de l’expert au domaine de l’IA. Cette formation est cependant moins poussée que sa réciproque : c’est en effet principalement du domaine de l’expertise qu’il est question dans toutes les rencontres entre cogniticien et expert. Elle est cependant nécessaire pour la satisfaction de l’expert, pour qu’il n’ait pas l’impression de fournir des connaissances sans savoir comment elles seront utilisées, comment la machine va raisonner, afin qu’il n’ait pas l’impression d’entreprendre un effort qui n’aboutira à rien.

2.2.3 L’association “cogniticien - expert”

Que ce soit du côté de l’expert ou du côté du cogniticien, tout ce qui est appris lors de l’étape de familiarisation sert de base aux rencontres et conversations futures. Il est alors primordial, pour la réussite de la construction du système expert, qu’il y ait une bonne entente entre les deux personnes.

A ce propos, nous pouvons citer l’article de A. d’Agapeyeff qui se place du point de vue du cogniticien et insiste sur les rapports avec l’expert [d’Agapeyeff 88]. Il y est instamment recommandé de ne pas perdre de vue que l’expert est avant tout une personne, un être humain qui n’est nullement obligé de “subir” des interrogatoires et de trouver cela naturel. Le transfert de l’expertise ne doit pas prendre la forme d’une inquisition incessante. L’expert ne doit pas se sentir harcelé mais invité à faire partager son savoir-faire. Le cogniticien doit alors faire preuve de tact, de diplomatie et d’habileté pour amener l’expert à expliciter son savoir. Il faut faciliter au maximum la tâche à ce dernier, en s’accommodant notamment de son emploi du temps et de sa disponibilité de façon à lui éviter toute contrainte. Il doit cependant savoir qu’il y aura beaucoup de temps à passer sur le projet.

Il s’agit donc de former une véritable équipe de travail, unie, qui tirera ses résultats de la synergie entre cogniticien et expert, et pas de se retrouver dans une situation où il y aurait l’expert, détenteur de la connaissance, d’un côté, et face à lui le cogniticien cherchant à lui “arracher” son savoir.

Le but principal d’une étape de familiarisation vient ici d’être mentionné : il consiste à construire une équipe consolidée par la motivation et le volontariat de l’expert et du cogniticien et par des liens de respect et de confiance mutuels. Les échanges entre les deux personnes sont alors fondés sur des bases solides, fondations sur lesquelles toute la suite du processus d’acquisition des connaissances pourra se reposer.

2.3 Notre façon de procéder

Nous tenons ici à rapporter notre expérience en acquisition des connaissances avec l’expert en voirie urbaine au delà de la phase de familiarisation. D’une part, nous

montrons comment se sont déroulées ces séances et comment nous les avons exploitées. D'autre part, nous présentons les techniques que nous avons utilisées en décrivant le type de connaissances qu'elles nous ont permis de découvrir. Il ne s'agit pas d'être exhaustif quant à ces techniques mais de présenter uniquement celles qui nous semblent intéressantes à mentionner et qui, nous l'espérons, inspireront d'autres cognitivistes.

2.3.1 Le déroulement et l'exploitation des rencontres avec l'expert

Les séances de travail avec l'expert ont eu lieu ou bien dans son bureau, ou bien sur le terrain (quelque part dans les rues de Nancy) ou encore, mais rarement, au laboratoire, où nous pouvions alors disposer de l'exécution en direct du raisonnement sur ordinateur. Après une période de rôdage, nous avons abouti à une démarche assez systématique dans le déroulement et l'exploitation des séances de travail. Il s'en dégage quatre étapes :

- le début des séances est occupé par des questions à l'expert sur ce qui s'est dit lors de la séance précédente¹. Il s'agit alors de préciser un concept ou le vocabulaire qui a été employé, une idée qui n'a pas été bien perçue, les préconditions de règles qui ont pu être dégagées lors de la rencontre précédente, ... Le but de ces questions directes est de lever toute ambiguïté qui pourrait s'installer dans l'esprit du cognitiviste. Celui-ci étant l'intermédiaire obligé entre l'expert et le système, il ne faut en effet absolument pas que de fausses idées germent dans son esprit (cela rejoint les problèmes de distorsions de la connaissance experte que nous avons évoqués en 1.1.5) ;
- le thème de la séance du jour est alors abordé. Nous travaillons sur le sujet que nous avons préparé, avec une technique que nous nous efforçons d'approprier aux connaissances que nous souhaitons mettre en lumière (cf. 2.3.2) ;
- lors de ces séances, nous procédons à un enregistrement sur cassettes des propos de l'expert, que nous retranscrivons par la suite sur papier, totalement ou en partie ;
- nous effectuons alors une analyse systématique du résultat de la retranscription, ce qui revient à faire une analyse de protocole. Nous en dégageons de nouveaux concepts et raisonnements, ainsi que les ambiguïtés qui feront l'objet des questions de la séance suivante.

Ce processus s'est petit à petit mis en place, au fur et à mesure des difficultés que nous rencontrions lors des séances d'acquisition. L'enregistrement par magnétophone s'est par exemple imposé suite aux problèmes que nous posait la prise de notes lorsque nous suivions l'expert cheminant d'un bout à l'autre d'une chaussée. Il résolvait ainsi

1. Cette première étape demande un environnement calme. Aussi n'a-t-elle pas lieu lorsque la séance se déroule sur le terrain.

les problèmes matériels et nous permettait de consacrer toute notre attention à ce que disait ou faisait l'expert.

Outre l'aspect pratique, l'avantage d'une telle technique réside dans le fait que d'une part rien de ce qui est dit ne peut nous échapper et que, d'autre part, il est possible de réécouter les bandes. Cela évite tout d'abord d'avoir à faire une retranscription sur papier de la totalité du discours de l'expert. Un tel travail demande en effet beaucoup de temps. Si initialement nous procédions systématiquement à une telle retranscription, nous nous sommes vite contentée de ne relever par écrit que ce qui nous semblait pertinent ou nouveau, ou ce qui offrait matière à discussions. Le fait de disposer de la totalité du discours est alors rassurant et il est toujours possible de s'y reporter en cas d'ambiguïté. De plus, ces protocoles écrits ou oraux constituent des archives d'informations précieuses, conséquentes et utilisables à tout moment dans le processus d'acquisition des connaissances. Le cognicien peut y retrouver la trace de nombreux cas traités ou de discussions sur un sujet dont il ne s'était pas préoccupé alors et sur lequel il cherche actuellement à expliciter des connaissances. Il peut alors puiser largement dans ces protocoles archivés.

Ensuite, un enregistrement sur cassettes permet de discerner des petits détails qui passent inaperçus *a priori* alors qu'ils peuvent parfois révéler de grandes idées. Des contradictions peuvent être identifiées, des explications complémentaires à un problème rencontré antérieurement trouvées, etc. De plus, nous obtenons des renseignements non seulement par le contenu du discours mais aussi par sa forme. L'intonation de la voix est par exemple une excellente information sur l'importance de tel ou tel argument. Il est ainsi possible de se fonder sur les écoutes pour identifier la connaissance, déceler les points délicats et extraire les questions qui seront posées lors de futures séances de travail.

En contrepartie, l'analyse de la retranscription se faisant en différé, il devient difficile d'apprécier la portée des propos de l'expert. Le cognicien n'est plus en situation, a parfois du mal à se la remémorer et ne sait plus à quel degré il faut prendre les propos de l'expert. Ce dernier s'exprime en langage naturel avec toutes les images et toutes les métaphores que celui-ci comprend. Il utilise également des comparaisons ou des ordres de grandeur pour que ses interlocuteurs se fassent une idée précise de ce qu'il expose. Toute cette dialectique, qui disparaît lorsque des notes sont prises sur le vif, est présente dans les enregistrements. Il s'agit donc de dissocier ce qui traduit vraiment le savoir-faire de ce qui n'est là qu'à titre d'images et de forme.

Des évolutions sont également à constater en ce qui concerne la séance du jour. Initialement, il s'agissait plus de réunions libres pendant lesquelles experts et cognicien dissertaient sur la voirie urbaine que d'entretiens structurés avec un but précis. De même, d'une séance à l'autre, des sujets différents étaient traités : il était une fois question de diagnostic, une autre fois de matériaux, une autre encore de paramètres politiques, avant de revenir au diagnostic. Cela nous obligeait en quelque sorte à mener en parallèle plusieurs acquisitions de connaissances, passant à l'une alors qu'une autre n'était pas achevée. Un net changement s'est fait sentir lorsque nous avons opté pour l'architecture hiérarchique multi-agents de ATOME. Les séances de travail avec l'expert ont alors gagné en cohérence, en structuration et donc en efficacité, nous menant

finalement au processus méthodique que nous décrivons au chapitre 3.

2.3.2 Les techniques et méthodes utilisées

Avant tout, nous tenons à souligner le rôle central de l'analyse du discours de l'expert qui, nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, intervient après toute séance de travail et quelle que soit la technique utilisée. Cette analyse est faite dans le but de déceler les connaissances et les raisonnements que l'expert a dû mettre en œuvre pour dire ou faire ce qu'il a dit ou fait (l'analogie avec la psychologie cognitive est ici parfaite). Nous nous basons pour cela sur les verbalisations que nous enregistrons lors de toute séance de travail.

La validité de ces verbalisations fait l'objet de vives controverses en psychologie cognitive. On leur reproche principalement de modifier l'exécution de la tâche et des performances, de ne pas être exploitables et de ne pas permettre l'accès aux processus mentaux [Caverni 88]. Elles sont de ce fait systématiquement condamnées car elles sont considérées comme non valides dans le cas général. J.P. Caverni montre qu'il existe des cas où de telles objections ne sont pas fondées et que cette technique peut apporter des éclaircissements sur un raisonnement particulier, au même titre que d'autres et même si elle n'est pas valable dans le cas général. Il ne s'agit donc pas de la rejeter de façon systématique mais de l'utiliser dans de bonnes conditions, notamment en comparant les protocoles verbaux à d'autres protocoles de manière à les relativiser. C'est ce que nous avons fait dans le projet ROSY, où la composante visuelle et les observations de l'expert sur le terrain nous permettent de valider ses propos ou d'y déceler une incohérence. Il y aura alors rectification de la connaissance qui a pu en être extraite, conformément à la démarche de l'expert.

Nous avons souvent utilisé des comparaisons entre le discours de l'expert et les nombreux cas que nous avons antérieurement rencontrés, que ce fût lors de la séance d'acquisition elle-même (l'expert était alors placé face à une contradiction apparente) ou lors de l'analyse de ces séances (les incohérences relevées alimentaient alors la liste de questions pour la rencontre suivante). Les autres techniques utilisées peuvent être rangées en deux catégories selon qu'elles font appel ou pas au caractère visuel de l'expertise. Il y a d'une part les techniques "visuelles" avec les questionnaires et les jeux-tests ou l'observation de photographies (les visites que nous avons évoquées au paragraphe précédent en font également partie; nous y revenons dans ce qui suit.). D'autre part, nous avons les entretiens ciblés et ceux de validation des connaissances acquises. Nous présentons ces techniques dans la suite de ce paragraphe en les définissant, lorsque cela est nécessaire, et en montrant les types de connaissances que chacune permet d'explicitier.

a - Visites et verbalisations

De nombreux déplacements sur les lieux de l'expertise furent indispensables pour véritablement percevoir le raisonnement expert. Nous avons la chance de pouvoir observer l'expert à l'œuvre dans son domaine, en situation réelle. Nous avons donc

visité les rues de Nancy lors de l'étape de familiarisation, certes, mais aussi dans la suite du processus d'acquisition. Nous avons demandé à l'expert de procéder à des verbalisations lors de l'observation des chaussées, verbalisations que nous souhaitions très libres. Seules quelques contraintes s'imposaient lorsque nous intervenions nous-mêmes pour poser une question précise. L'expert, très à l'aise dans son domaine, discourait alors sur ce qu'il voyait, sur ce que cela lui inspirait. Si, lors de la phase de familiarisation, il avait tenu compte de notre présence, il considérait dorénavant que nous avions une connaissance suffisante du domaine pour pouvoir le suivre dans son discours. Il se prenait donc au jeu, s'investissait totalement dans l'expertise qu'il entreprenait. Son discours en devenait décousu. Il s'interrompait soudainement au milieu d'une phrase, faisait demi-tour dans la rue pour aller faire une observation, revenait sans mot dire à l'endroit où il se trouvait précédemment et reprenait son discours. Cela ne manquait évidemment pas de susciter notre curiosité et amener des questions.

L'expert avait opté pour des verbalisations à la fois concomitantes et consécutives. La quantité des premières étaient moins importantes que celles des secondes. Nous avons alors deux verbalisations différentes concernant une même tâche, concordantes, complémentaires ou parfois incohérentes. Ces deux points de vue nous permettaient alors de compléter le modèle de résolution que nous avons commencé à construire, l'un garantissant la validité de l'autre et vice-versa.

L'attitude et les propos hachés de l'expert dénotaient le fait que les verbalisations obtenues correspondaient bien à sa performance (son raisonnement) et non à sa compétence [Laske 86]. De plus, il suivait spontanément l'une des consignes données par de nombreux psychologues utilisant la verbalisation comme source d'observables des processus cognitifs (en cas de verbalisations non contraintes) :

“Dites à haute voix ce que vous vous dites en exécutant la tâche, même si cela vous paraît décousu.” [Hoc et Leplat 83].

ou encore :

“N'essayez pas d'expliquer quoi que ce soit à qui que ce soit. Supposez qu'il n'y a personne d'autre que vous-même ici. Ne parlez pas de la solution au problème mais résolvez le problème”.

La première utilisation de la technique des visites verbalisées se fit à un niveau global, c'est-à-dire sur l'ensemble du processus que nous cherchions à expliciter. Elle nous permit de cerner les diverses compétences qui entrent en jeu et les étapes du raisonnement expert, d'identifier les objets manipulés par l'expert. Nous nous en sommes par la suite servi pour déterminer les objets intervenant dans chacune des compétences identifiées. Même si le thème des visites englobait toujours l'ensemble de la démarche experte, l'utilisation qui en était faite était locale à une compétence. Nous portions essentiellement notre attention sur celle qui nous intéressait, contraignant alors quelque peu le raisonnement de l'expert. Il nous arrivait par exemple de faire varier les paramètres du cas à traiter (augmenter le trafic, envisager un autre site, ...) pour voir

quelles en étaient les répercussions sur le raisonnement. Cela nous permettait notamment de “mesurer” l’importance relative des différentes données. Il fallait cependant veiller à ne pas changer trop de paramètres simultanément, le danger encouru étant alors de ramener le cas concret de la rue à traiter à une situation artificielle (ce qui repose le problème que nous avons évoqué en 2.1.3).

Nos visites avaient initialement lieu en domaine connu de l’expert, à Nancy, jusqu’au jour où nous nous rendîmes compte que cela pouvait masquer des connaissances. L’expert connaissait en effet parfaitement les rues nancéennes. Il pouvait donc lui arriver d’utiliser des connaissances sans les exprimer, de façon inconsciente ou parce qu’elles lui semblaient triviales (cf. les connaissances implicites et assimilées du paragraphe 1.1.2). Nous prenions ainsi le risque de passer à côté de notions importantes. Aussi avons-nous décidé d’alterner la pratique de l’expertise en domaine connu avec une pratique en domaine inconnu. Il suffisait, pour cela, de se rendre dans les communes avoisinantes, après avoir pris quelques renseignements auprès des municipalités locales. Des informations qui jusqu’alors n’avaient pas été mentionnées ou dont nous ne mesurions pas encore l’importance émergeaient soudain car elles faisaient défaut à l’expert (par exemple, l’historique des chaussées, l’âge et le type de la dernière réfection, le statut d’une rue au sein de la commune, ...). Un retour au domaine connu nous permettait ensuite de vérifier la validité des connaissances ainsi acquises.

Ces incursions en milieu inconnu nous fournirent également une autre source d’accès au processus cognitif expert. L’expert souhaitait en effet comparer le résultat de ses réflexions avec ceux que nous avions obtenus auprès des experts locaux. Il commentait alors les différences, mettant ainsi en avant certains éléments du raisonnement. Les allers et retours entre domaine connu et domaine inconnu nous permirent de progresser à grands pas dans notre quête.

b - Questionnaires et jeux-tests

Le principe de ces deux techniques est le même : la première étape consiste à partir de la description écrite (questionnaires) ou orale (jeux-tests) d’une chaussée et de demander à un ou plusieurs experts de travailler sur cette description en procédant à tout ou partie de leur expertise, en fonction de ce que le cogniticien cherche à observer ; dans la seconde, le nom de la chaussée qui a fait l’objet de la description est dévoilé, ce qui provoque un commentaire spontané des experts sur leur démarche et les conduit à “re-raisonner”.

Ce principe est issu de la préoccupation suivante : il nous fallait traduire des données visuelles en données symboliques ou numériques ; sachant combien il est difficile de dépendre ce que l’on voit, le mode de représentation choisi pour décrire l’état d’une chaussée devait donc faire l’objet de nombreux tests de validation. Aussi avons-nous songé à placer l’expert dans les mêmes conditions que la machine. Nous l’avons contraint à raisonner en aveugle, c’est-à-dire à utiliser la représentation retenue et non plus ses yeux pour mener son expertise. C’est ce qui nous a conduit à définir la méthode des questionnaires, son but premier étant de valider la représentation des données visuelles. Selon le même principe mais dans un but différent, nous avons alors

songé que le fait de demander à l'expert de raisonner à travers les yeux de quelqu'un d'autre pouvait également être bénéfique pour l'acquisition des connaissances. Nous avons initialement songé à ce que le releveur aille sur le terrain et lui transmette les informations par téléphone, ou à lui bander les yeux et à le guider le long de la chaussée. Devant le caractère peu pratique de la démarche, nous avons jugé plus raisonnable de procéder à de tels tests dans le bureau de l'expert. Une personne devait alors se charger de faire la description et de la transmettre oralement. Les jeux-tests sont ainsi nés, visant principalement à rechercher les informations pertinentes de l'expertise, leur importance à travers l'ordre dans lequel l'expert y a recours et le cheminement du raisonnement.

Nous distinguons plusieurs variantes de ces techniques en fonction de :

- qui se charge de faire la description (le cogniticien, l'expert lui-même ou un autre expert). Cette personne sera appelée "releveur"² dans la suite de ce paragraphe, de manière à la distinguer de l'expert ;
- comment est faite cette description sur le terrain. Elle peut s'appuyer sur la représentation retenue (en l'occurrence, la description des niveaux des blackboards) ou être libre, ne faisant alors appel en tant que support qu'à un seul papier blanc et un crayon ou à la mémoire du releveur. Nous y ferons référence dans ce qui suit en tant que "support de relevé" ;
- comment elle est ensuite utilisée. Ce dernier critère revient en fait, plus ou moins, à distinguer questionnaire de jeu-test.

Dans le premier cas, il s'agit de transmettre la description sous sa forme écrite aux personnes qui doivent l'exploiter, sans leur fournir d'autres indications que celles portées sur le document. Cela n'est pas toujours facile à mettre en œuvre, le releveur ayant en effet tendance à intervenir oralement pour guider le raisonnement. Si initialement nous nous imposions pour empêcher de telles interventions, cela nous a par la suite conduit à distinguer à nouveau deux variantes de questionnaires en fonction de l'existence ou pas de ces interventions. Elles sont en effet aussi riches en informations sur le raisonnement que ne l'est le questionnaire lui-même.

Dans le second cas, la description est un support servant d'aide-mémoire au releveur qui est chargé de la présenter oralement. Les informations qu'elle contient peuvent alors être fournies spontanément ou uniquement à la demande expresse du ou des experts qui sont chargés de l'exploiter.

Nous avons utilisé plusieurs de ces variantes avec l'expert en voirie urbaine. Toutes mènent à des connaissances différentes ou qui se recoupent, permettant ainsi d'identifier ou de valider ces connaissances. Nous en décrivons quelques-unes dans la suite de ce paragraphe, en présentant le type de connaissances auquel chacune permet d'accéder. Il est alors possible de constater que l'intérêt de ces tests ne réside pas uniquement

2. Ce terme provient de ce que la personne en question est en fait chargée de "relever" les défauts et d'autres informations apparaissant sur une chaussée.

dans l'exploitation qui est faite de la description mais également dans la description elle-même.

Questionnaires.

Nous avons débuté l'utilisation de ces techniques par un questionnaire que nous avons nous-mêmes rempli. Notre préoccupation première étant de vérifier l'adéquation des données des blackboards à la pratique de l'expertise, nous avons utilisé la structure des blackboards comme support de relevé, en ne nous servant que des valeurs des attributs définies à partir de l'expertise. Nous avons transmis le résultat de la description à l'expert qui devait en déduire le type de réfection à entreprendre sur la chaussée en question.

Nous pensions tirer des enseignements de la façon dont l'expert feuilleterait le document qui lui avait été remis pour en extraire des informations primordiales à ses yeux. Or il ne le feuilleta pas et se contenta de le lire séquentiellement, à notre grande déception. Le document constituait en fait un bloc rigide qui avait une certaine autorité dans sa forme et qui poussait à une lecture séquentielle. De plus, la description de la chaussée était présentée dans un ordre correspondant à plusieurs niveaux d'abstraction (la chaussée dans son environnement, ses caractéristiques, son aspect général, le détail des dégradations), qui était similaire à l'ordre dans lequel l'expert découvrait une chaussée en situation réelle. Peut-être cet ordre convenait-il tout à fait au raisonnement expert. Nous ne pouvons actuellement pas en juger. Il aurait fallu, pour cela, présenter les informations dans un ordre différent et sous une forme supprimant la contrainte de lecture séquentielle. Nous avons songé à inscrire les données sur des cartes que nous aurions éparpillées sur son bureau. Les inscriptions auraient été faites de telle sorte que l'expert aurait été obligé de prendre les cartes en main, l'une après l'autre, et de les retourner pour les consulter. Le côté visible aurait par exemple porté une indication (ex : trafic, dégradation, ...) sur les informations se trouvant sur le côté caché. Nous avons alors trouvé plus simple d'avoir recours à une description orale qui n'imposait aucun ordre dans la transmission des données du problème. Mais gageons qu'une telle technique aurait porté ses fruits (nous laissons au lecteur le soin de l'essayer³).

Revenons à notre préoccupation principale : vérifier la complétude des données répertoriées dans les blackboards pour le raisonnement. L'expert, à la seule consultation du document, devait pouvoir se faire une idée de la chaussée et en tirer des conclusions. Il n'y parvint pas car notre description n'était pas de bonne qualité. N'étant pas spécialiste du domaine, il nous était difficile de déterminer les valeurs à affecter aux divers attributs et les nombreux "moyen" que notre description comportait pour qualifier la pente de la rue, son profil ou la gravité d'une dégradation n'étaient pas faits pour plaire à l'expert. De plus, de nombreux renseignements nous manquaient (passé de la rue, mesure du trafic, ...). Il fut décidé, ce jour-là, que lui-même se chargerait d'établir une description de la chaussée, qui serait ensuite soumise à ses collègues. C'est ce qui se passa quelque temps après. Nous pûmes ainsi compléter la structure des blackboards

3. L'utilisation d'enveloppes portant mention des informations qu'elles renferment devrait se révéler plus commode.

par les informations qui avaient été demandées en plus à l'expert-releveur. Il fut également possible de vérifier que, moyennant ces quelques modifications, la représentation leur permettait de raisonner et d'aboutir à une conclusion qu'ils entérinaient une fois le nom de la chaussée révélée.

Nous pouvons ici noter les différences entre les deux situations que nous venons de décrire. Dans la première (celle où le cogniticien fait le relevé), la description n'est pas complète et le cogniticien a du mal à fournir des renseignements complémentaires. Elle présente cependant l'avantage d'être fidèle à la structure et aux valeurs proposées dans les blackboards, le cogniticien n'utilisant que ces données. Leur validation est donc plus correcte que dans la seconde situation où l'expert-releveur, malgré toutes nos recommandations, a parfois tendance à s'écarter de la représentation initiale. De plus, alors que le cogniticien est muet pendant la résolution du problème, l'expert-releveur a tendance à être loquace et à orienter les déductions de ses collègues. Si la validation en pâtit, l'explicitation du raisonnement y gagne. Aussi nous semble-t-il intéressant de mêler les deux types de tests pour en obtenir des optimaux dans lesquels :

- les questionnaires seraient remplis par le cogniticien avec l'aide d'un expert (pour qu'ils soient de bonne qualité tout en étant limités à la représentation des connaissances retenue) ;
- ils seraient ensuite présentés aux autres experts, parfois sans intervention de l'expert-releveur, d'autres fois avec.

De même, l'intervention du cogniticien en tant que releveur unique de l'information est à déconseiller au début de la phase d'acquisition des connaissances, surtout lorsqu'un document écrit est remis à l'expert. Il est préférable de la conserver pour plus tard, lorsqu'il est davantage familier avec le domaine et pour une présentation orale (un jeu-test). Il peut alors rapprocher une donnée qu'il n'a pas su apprécier (par exemple, le trafic), de la même donnée dans une autre rue similaire et décrire plus précisément à l'expert, en ayant recours à des croquis si besoin est. Nous nous sommes ainsi chargée de nombreuses description de chaussées, plus tard dans le processus d'acquisition, de manière à débarrasser l'expert de cette corvée. Cette technique est certes très intéressante pour l'acquisition des connaissances mais elle présente l'inconvénient de demander beaucoup de temps pour effectuer la description. Aussi est-il accommodant que ce soit le cogniticien qui s'en charge, quitte à ce qu'un expert la reprenne et la complète par la suite.

Jeux-tests

Les descriptions des chaussées des premiers jeux-tests étaient établies par un expert. Lors du tout premier de ces tests, nous avons demandé à un expert-releveur de préparer une telle description pour un autre expert et de se servir de la structure existante des blackboards en tant que support de relevé. Il l'avait annotée en indiquant les valeurs des attributs. Il devait procéder à une description orale de la chaussée objet

du test et avait pour consigne de ne fournir une information que si celle-ci lui était explicitement demandée par l'expert. Ce dernier ne disposait pas de la structure des blackboards. Cette première tentative, qui visait à atteindre le but premier du jeu-test (identification de l'ordre dans lequel les éléments interviennent dans le raisonnement, de son déroulement) fut un échec par rapport à cet objectif. Il n'avait en effet fallu que quelques renseignements à l'expert pour qu'il devinât de quelle rue il s'agissait, ce qui rendait le test nul. Nous en avons cependant tiré un profit : la description établie par le releveur nous permettait de dégager d'autres informations sur la représentation des données dans les blackboards. Nous pouvions en effet voir, en la consultant, quel était le format que le releveur avait choisi pour noter telle ou telle information, ce qu'il avait noté en plus, le support de relevé (en l'occurrence, les blackboards) ne lui proposant pas un cadre satisfaisant pour pouvoir indiquer une information importante, ... Nous avons ainsi pu déceler :

- l'absence de certains attributs utiles dans les niveaux des blackboards ;
- l'absence de certaines valeurs d'attributs ou le fait que les valeurs proposées n'étaient pas valides (elles ne correspondaient pas à ce que le releveur aurait aimé trouver),
- le côté non significatif pour le releveur du nom de l'attribut ou de l'attribut lui-même ;
- la non coïncidence de la représentation d'un attribut avec celle que le releveur s'en fait. Un attribut peut par exemple ne pas être structuré comme le releveur le souhaiterait. Celui-ci note alors les choses différemment dans la marge du support de relevé ;
- l'inadéquation du type d'un attribut. Ce problème survient essentiellement avec les données visuelles. Il s'agit alors de savoir si un vocable convient, si une mesure numérique est préférable, si telle mesure convient mieux que telle autre, etc.

Notre première tentative ne nous ayant pas permis d'atteindre l'objectif que nous nous étions fixé, une autre fut entreprise dans les mêmes conditions. L'expert-releveur avait alors opté pour la description de chaussées plus anonymes que la première. Outre le fait de continuer à exploiter les renseignements que la description elle-même nous fournissait, il nous était alors possible d'observer la pratique de l'expertise en aveugle. Nous pûmes alors voir quelles étaient les informations que l'expert demandait, quel en était le niveau de détail, ce sur quoi il insistait (il lui arrivait de revenir plusieurs fois sur une même information pour demander des précisions), ... L'expert-releveur était alors qualifié pour lui fournir les informations manquantes en faisant parfois appel à ses souvenirs, les informations en question n'apparaissant pas dans la description (sauf si lui-même avait jugé bon de les y ajouter).

De même, il nous semblait que cette technique nous permettrait de suivre le cheminement du raisonnement en fonction de l'ordre dans lequel les informations seraient demandées. Dans le cas de la voirie urbaine, cet ordre n'était pas vraiment significatif.

Nous n'avions pas donné de consignes particulières à l'expert quant à la façon de procéder lors de l'exploitation de la description. Aussi avait-il opté pour ce qu'il préférait : collecter l'ensemble des informations et les noter⁴, résoudre le problème au cours de cette collecte et opérer ensuite à une verbalisation.

Dans ce cas particulier, la seconde étape du test fut très enrichissante, l'expert ayant introduit une variante dans le schéma type de ces tests (cf. principe de ces tests page 115). Plutôt que le nom de la rue ne lui soit tout de suite dévoilé, il avait préféré discuter avec le releveur pour savoir comment ce dernier aurait résolu le problème. Nous nous trouvions alors dans une situation où deux experts discutaient de leur résolution, l'un en toute connaissance de cause et le second ne disposant que des informations qu'il avait demandées. L'expert-releveur indiquait ce dont l'expert ne s'était pas enquis et qui lui semblait important. Hésitant quant à la solution finale alors que l'expert avait été catégorique, il faisait ressortir les éléments qui provoquaient son hésitation ; il essayait de pousser l'expert à revenir sur son raisonnement et à rejoindre le sien. Chacun tentait de convaincre l'autre du bien-fondé de sa solution, l'expert demandant davantage de renseignements au releveur pour entériner son raisonnement. Les arguments avancés de part et d'autre, ainsi que les renseignements complémentaires demandés, furent d'une grande utilité pour comprendre le processus de décision. Les discussions se poursuivirent activement lorsque le nom de la rue fut révélé. L'expert commentait alors le raisonnement qu'il avait mené, le faisait évoluer et expliquait les éventuelles divergences d'un raisonnement à l'autre. Nous intervenions alors pour lui demander ce que lui apportait une information qu'il avait demandée et que nous n'avions pas répertoriée, revenions sur les "oubliés" que l'expert-releveur avait mentionnés, ... La séance fut animée et riche en retombées sur la modélisation du raisonnement et du processus de décision.

Nous voulons mentionner, en dernier lieu, le cas d'autres jeux-tests où nous avons procédé à la description de plusieurs chaussées. travaillant alors à expliciter les connaissances de la spécialiste *Sp-fond* (qui tente de conclure sur l'état d'une chaussée au premier coup d'œil), nous avons introduit une contrainte supplémentaire : l'expert devait tâcher de parvenir à une solution en demandant le moins d'informations possible. Nous pensions ainsi identifier les raccourcis de raisonnement et les ensembles minimaux de données nécessaires. Ayant déjà une première idée sur ces raccourcis, nous avons soigneusement choisi les rues à traiter : certaines avaient des caractéristiques qui, nous semblait-il, permettraient de conclure rapidement ; d'autres étaient proches des premières par leur aspect mais sans ces caractéristiques ; d'autres encore devaient être examinées dans le détail pour pouvoir conclure. En travaillant sur ces diverses descriptions, l'expert nous fournit de nouveaux éléments de raisonnements courts, confirma ou infirma ceux que nous avions pressentis. Dans la seconde étape, il commenta ses raisonnements et compara notamment deux descriptions correspondant à des chaussées d'aspect assez proche à nos yeux, pour lesquelles il n'était pas parvenu aux mêmes conclusions. Il fut ainsi possible de mettre en lumière ce qui faisait

4. Il serait peut-être intéressant de coupler ce test avec l'observation du mouvement des yeux de l'expert sur sa feuille de notes. Nous avons essayé de le faire *de visu*, ce qui s'est révélé impossible : un appareillage spécialisé est indispensable.

que, pour l'une, un raisonnement détaillé était obligatoire alors que, pour l'autre, peu d'éléments suffisaient à la résolution.

Citons, avant de passer à la technique de l'observation de photographies, le fait que l'expert appréciait beaucoup ces jeux-tests⁵ et les trouvaient très divertissants (c'est d'ailleurs pour cette raison que nous les avons baptisés "jeu"). Cela nous assurait son entière collaboration.

c - L'observation de photographies

Nous avons initialement proposé à l'expert de raisonner à partir de photographies de chaussées inconnues, ce qui n'a pas donné de résultat. Les photographies, aussi bonnes que fût leur qualité, ne contenaient pas une information suffisante pour qu'une expertise soit pratiquée. L'expert se plaignait de ne rien y voir. Nous songions à abandonner cette technique lorsqu'un jour il nous a lui-même spontanément présenté son album. Celui-ci répertoriait les photographies de chaussées dont il avait entrepris la réfection dans l'année, dans leur état avant et après rénovation. L'expert faisait alors appel à ses souvenirs pour commenter chaque chaussée refaite. Le commentaire résultant était court et assez décousu, tout comme lors des visites. L'expert n'évoquait que des éléments qui lui avait paru essentiels, ceux dont il se souvenait encore après plusieurs mois, et parlait en termes de "je me suis dit ...", "je me souviens que cette rue était comme ci.", ... Par exemple, une des photographies observées avait soulevé le commentaire suivant :

"Gros désenrobage dans cette rue ... Il y a un faïencage très, très large mais là, c'est ... heu ... Rue Thierry Solet, ça avait quel âge? ... 26 ans. C'était très vieux. Là aussi, trafic nul."

Ce type de verbalisation nous paraissait très intéressant car l'expert ne se remémorait que ce qui avait motivé sa décision. Il dépouillait ainsi l'étude de cas d'une immense quantité de données dont nous ne parvenions pas à cerner l'importance des unes par rapport aux autres. Là, seuls les "mots-clés" étaient prononcés. Nous pouvions ainsi suivre le cheminement de sa pensée, ces mots-clés en indiquant les différentes étapes. Dans l'exemple précédent, nous avons déduit que le faïencage était une dégradation qui inquiétait l'expert quant à la pérennité de la chaussée et qui le poussait d'ordinaire à refaire une fondation. Nous pouvions également y constater l'influence de paramètres tels que l'âge de la chaussée et le trafic sur le choix du mode de réfection : malgré la présence du faïencage, l'expert optait pour une réfection de moindre importance. Ce choix n'étant pas conforme au cas général, aux éléments qu'il nous avait dit être la "vraie" connaissance (à savoir que le faïencage entraînait toujours une réfection en fondation), il le justifiait alors (le "*mais là*" de son discours) par d'autres paramètres.

Nous ne comprîmes pourquoi cette technique n'avait pas fonctionné avec des photographies de chaussées inconnues que plus tard. Ce n'était en fait pas tant l'information que les photographies véhiculaient qui était en cause (l'expert disait lui-même qu'on ne

5. Lors d'une séance où nous disposions de plusieurs descriptions, lui-même nous avait demandé d'en faire une autre et avait dit, entre deux cas traités : "c'est drôle, ce jeu".

voyait pas grand-chose sur ses propres photographies) mais le fait qu'elles induisaient une régression dans le temps et le ramenaient, en pensée, dans une situation passée qu'il avait vécue. Elles faisaient appel à ses sens : il se souvenait de ce qu'il avait fait, de comment il avait procédé, de ce qu'il avait regardé à tel ou tel instant, de ce qu'il s'était dit, ... Les photographies le replongeaient dans la tâche qu'il avait alors exécutée et qui était inscrite dans des sensations particulières qu'il avait éprouvées. L'expert procédait ainsi à une verbalisation rétrospective sur une action antérieure, au travers de laquelle il nous était possible de percevoir un processus cognitif. Cela n'était pas le cas pour des photographies inconnues car elles n'éveillaient aucune sensation chez l'expert, ne faisant référence à aucune situation vécue.

Cette observation de photographies pouvait alors être rapprochée de la technique de verbalisation particulière proposée par P. Vermersch dans [Vermersch 89] : l'entretien d'explicitation. Le but de cette technique est de fournir à l'observateur les moyens d'accéder aux connaissances implicites d'un opérateur. Ce dernier n'en a en effet pas conscience et ne les verbalise donc pas spontanément. Le principe de cet entretien consiste à le questionner *a posteriori* sur une tâche qu'il a effectivement effectuée. L'observateur lui demande de se rappeler ce qu'il a fait pour reconstituer aussi soigneusement que possible le déroulement de l'action telle qu'il l'a vécue. P. Vermersch insiste sur le fait que les questions doivent porter sur une exécution de tâche qui a eu lieu, et pas sur une exécution en théorie, pour qu'il soit possible de les exprimer en des termes sensoriels. Cette seconde condition lui semble en effet essentielle pour que l'opérateur fournisse des connaissances sur sa façon de procéder (à travers la description de comment il a procédé dans une situation particulière) et pas une conception intellectuelle de sa tâche.

Cette technique présente deux points communs avec l'expérience que nous avons décrite auparavant : d'une part, il s'agit de verbaliser sur "du vécu" ; d'autre part, elle se place dans un contexte sensoriel. Ce rapprochement et les résultats que nous avons obtenus lors de cette expérience nous permettent de penser, à l'heure actuelle, que l'observation de photographies est une technique intéressante pour l'acquisition de connaissances implicites lorsque l'expertise est à forte composante visuelle. Elle ne peut cependant être utilisée qu'à la condition expresse que les photographies se rapportent à un raisonnement que l'expert a eu à mener. Il faut alors l'entreprendre selon les consignes fournies dans [Vermersch 89].

d - Entretiens ciblés et entretiens de validation

Les entretiens dont nous parlons dans ce paragraphe correspondent à des discussions sur un thème précis que nous fixions à l'expert lorsque nous prenions rendez-vous avec lui. Dans le cas des entretiens ciblés, il s'agissait de travailler certes à l'acquisition de connaissances mais aussi à la représentation des informations nécessaires au raisonnement. Nous formions alors une équipe de réflexion avec l'expert, dont le but était de se charger d'un point précis de la représentation d'une donnée (principalement visuelle). Par exemple, nous réfléchissions à la façon de représenter la répartition d'une dégradation sur une chaussée, la proximité de deux dégradations, etc. Le résultat de ces réflexions était alors de bien meilleure qualité que lorsque le cognitif était seul

à traiter le problème.

L'intérêt de cette technique pour le processus d'acquisition lui-même résidait essentiellement dans le fait de pouvoir expliciter des éléments de connaissance profonde et de définir les instanciations des niveaux des blackboards. C'est par exemple ainsi que nous avons déterminé les associations entre causes et dégradations, ainsi que les circonstances dans lesquelles une cause était responsable d'une dégradation. De nombreuses réunions avaient eu lieu sur le sujet. De l'une à l'autre, l'expert, désireux de transmettre la "vraie" connaissance, songeait à certains cas de chaussées, en dégageait les causes associées (non encore répertoriées) sans pour autant qu'il fût possible d'explicitier des connaissances permettant de désigner la cause responsable parmi toutes les autres dans une situation particulière. Nous avons donc tendance à enrichir la base de connaissances en y ajoutant des causes potentielles associées aux différentes dégradations envisagées.

Cela constitue un des dangers de ces entretiens. Le thème en est si prépondérant qu'il en devient le but premier et que l'on en oublie ce qui les a motivés (la modélisation de l'expertise dans son ensemble). Nous en étions arrivé, avec l'expert en voirie urbaine, à vouloir dresser une liste exhaustive de l'ensemble des causes possibles d'une dégradation, sans même chercher à savoir si cette liste serait utile, si l'expert lui-même utilisait de tels renseignements. Il s'agit alors de prendre garde à ce phénomène et d'avoir constamment en mémoire le but initial de ces entretiens.

Les entretiens de validation visent, pour leur part, à valider et confirmer tout ce qui a été modélisé dans le système expert en cours de développement. Ils se placent sur un plan global ou local (cf. partie II, 4.1.2) selon ce que l'on cherche à valider. Sur un plan global, il s'agit de vérifier que les diverses compétences entrant en jeu dans le raisonnement ont toutes été identifiées. Dans le cas de ROSY, cela revenait à soumettre à l'expert le découpage en sources de connaissances (tâches et spécialistes) que nous avons effectué, à lui présenter le raisonnement sous-jacent (l'enchaînement des diverses sources de connaissances) et à observer sa réaction par rapport à cela. S'il lui était difficile de nous dire que le raisonnement présenté correspondait bien à sa démarche, il pouvait cependant indiquer ce qui lui semblait étrange, ce qui ne lui convenait pas, nous permettant déjà d'avoir une réaction à nos propositions et d'axer les prochaines séances d'acquisition sur les points qu'il avait soulevés. Nous n'avons fait que débiter la validation du raisonnement pour les raisons que nous expliquons dans la partie II, en 4.1.2. Néanmoins, nous avons soumis à l'expert quelques résultats d'exécution du SE pour tenter de les vérifier. Il s'agissait principalement de voir si les mesures fournies par la spécialiste *Sp-synthèse* étaient correctes. Nous avons déjà évoqué l'embarras de l'expert face à ces mesures (cf. partie II, 4.1.2) et seule une comparaison entre les mesures obtenues pour plusieurs chaussées pouvait constituer un bon critère de validation. Sur les quelques comparaisons qui furent entreprises (qui nous permettaient de classer les chaussées en fonction des divers critères de sécurité, pérennité, confort ou esthétique), l'expert et le système ROSY obtenaient le même classement. Le nombre de ces comparaisons n'est cependant pas suffisant pour que nous puissions dire qu'il y a eu validation du raisonnement de la tâche *Diagnostic*.

Sur un plan local, il faut valider les règles heuristiques (règles de production et règles graduelles) qui ont été identifiées lors des séances d'acquisition. D'une part, il s'agit d'apporter des précisions sur la signification, la portée et l'étendue de certains vocables employés dans ces règles ainsi que de vérifier que la partie "condition" de la règle est complète. D'autre part, se pose le problème de l'adéquation de la traduction en code informatique à ce qui a été dit verbalement. Aussi avons-nous procédé à une validation en deux étapes. Toutes deux consistent à construire des règles et à les présenter à l'expert pour validation. En général, nous avons toujours transmis les documents comportant les règles à valider à l'expert avant notre rencontre, pour qu'il ait le temps de les étudier.

- Première étape.

Lors de nos rencontres avec l'expert, nous avons acquis des connaissances heuristiques sous une forme ou une autre. Ces connaissances ont alors été analysées de façon à produire des règles, règles de production ou règles graduelles, mais aussi des règles au formalisme totalement différent et reprenant la syntaxe de l'expert (par exemple, "quand il y a ceci, c'est qu'il y a eu cela").

Ces règles sont alors présentées à l'expert qui doit indiquer si elles lui semblent correctes, s'il ne manque pas quelque élément. Hormis le formalisme choisi, elles sont encore relativement proches de l'expression orale de l'expert, employant notamment le même vocabulaire. Cette première validation nous a permis de supprimer des règles qui n'avaient pas lieu d'être (certaines étaient redondantes ; d'autres étaient en fait une généralisation de plusieurs autres règles existantes ; d'autres encore ne semblaient pas pertinentes à l'expert, correspondant par exemple à des cas particuliers très rares ; enfin, il arrivait que certains éléments aient été associés dans des règles par une relation qui ne correspondait pas celle qui les reliait véritablement), d'en compléter certaines, d'en faire ressortir d'autres, l'expert étant intrigué de ne pas trouver une connaissance qui reliait deux éléments qu'il citait.

- Deuxième étape.

Il s'agit alors de coder les règles de production validées dans la première étape. C'est à ce moment-là que le cogniticien se rend compte que, malgré la validation, tout n'a pas été dit et précisé. Il se pose alors de nombreuses questions :

"Comment vais-je traduire cela ?"

"Je ne dispose pas de telle information dans la représentation de mes données. Puis-je la déduire ou faut-il l'ajouter ?"

"Si je l'ajoute, comment puis-je la représenter et qu'est-ce que cela change pour la connaissance qui est déjà en place ?"

"Dans cette règle, l'attribut en question a pour valeur "moyen". Or, cet attribut est de type numérique. A quelles valeurs correspond ce "moyen" ?"

“Qu’a voulu dire l’expert en parlant de “trafic lourd”, sachant que le trafic se décompose en une mesure mais aussi en “trafic poids lourds”, “trafic véhicules légers” et “trafic bus” ?”

Nous avons alors choisi de traduire à notre façon les règles dont nous disposions, en envisageant éventuellement une modification de la représentation des données dans les blackboards, et de les soumettre à l’expert sous leur forme décodée. Nous insistions alors sur celles pour lesquelles il y avait eu un problème au moment du codage, ce qui conduisait l’expert à les corriger. Par exemple, la règle :

Si chaussée âgée alors ... ,

issue de la première étape de validation, avait été codée par la règle :

Si âge de la chaussée > 10 ans alors ...

Celle-ci avait alors été soumise à l’expert et, après correction, était devenue :

Si âge de la chaussée > 20 ans alors ...

En cas de plus grandes difficultés de représentation d’une donnée, le problème était alors examiné lors d’un entretien ciblé.

Cette validation en deux phases fait intervenir trois niveaux de règles :

- la règle *origine*, qui est issue de l’analyse du discours de l’expert et qui est ensuite validée. Il s’agit de celle que l’on obtient à la fin de la première étape de validation ;
- la règle *traduite*, résultat du codage de la règle origine. Le cogniticien produit cette règle en faisant coïncider le contenu de la règle origine et le contenu des blackboards. Dans la mesure du possible, il se restreint à ce dernier contenu pour représenter la règle ;
- la règle *traduite corrigée*, qui est le résultat de la critique de l’expert et qui est ensuite recodée. C’est elle que l’on trouve, en définitive, dans l’ensemble des connaissances d’une spécialiste-ATOME.

Plusieurs intérêts s’en dégagent. Tout d’abord, il est possible de déceler très tôt une mauvaise interprétation de la connaissance experte. Avant même que celle-ci ne passe au stade de règle traduite, il est déjà possible de traquer les erreurs et d’éviter de les propager. Le processus de codification n’en sera donc que plus efficace. Ensuite, le fait d’utiliser une règle traduite sous son aspect décodé permet de la préciser en agissant sur les valeurs des attributs qui y apparaissent. Cela évite de faire des interprétations abusives de ce qu’a dit l’expert. Le risque de distorsions de la connaissance experte (cf. 1.1.5) est ainsi diminué. Dans le même ordre d’idée, une sémantique correcte est attribuée aux symboles utilisés par l’expert en fonction de la représentation dont le SE

dispose. Si celle-ci se révèle insuffisante, il est alors possible de la faire évoluer simplement, en ajoutant une valeur d'attribut ou un attribut, ou, de façon plus importante, en remettant en cause le découpage en niveaux dans les blackboards.

Le fait de procéder en deux étapes garantit d'obtenir une bonne validation des connaissances granulaires. Le biais qui pourrait être introduit lors du codage est en effet considérablement réduit par ce double contrôle. Celui-ci présente malheureusement l'inconvénient de donner l'impression que le même travail est fait deux fois, ce qui peut présenter le danger de lasser et de démotiver l'expert. Ce risque est cependant nettement amoindri si le cogniticien prend la précaution d'espacer suffisamment la première étape de validation de la seconde et insère, entre les deux, des séances plaisantes. De plus, la bonne entente qui règne entre les deux acteurs du processus d'acquisition fait que l'expert, informé par le cogniticien du pourquoi de la tâche, prend généralement son mal en patience en attendant de voir ce que cela donnera.

2.3.3 Récapitulatif des techniques et méthodes utilisées

Nous souhaitons ici fournir un récapitulatif des techniques et méthodes employées en présentant leurs avantages et leurs inconvénients, en indiquant les connaissances auxquelles elles permettent d'accéder et le moment où leur utilisation est possible. Le tableau de la figure 2.1 présente ces diverses informations de façon synthétique, de manière à pouvoir être facilement utilisé par tout cogniticien qui souhaiterait s'en inspirer pour une expertise présentant des caractéristiques similaires (notamment une forte composante visuelle).

2.4 Les conclusions que nous avons tirées

Ce paragraphe répertorie les enseignements que nous avons tirés de l'expérience en acquisition des connaissances dans le domaine de la voirie urbaine. Il s'adresse à toute personne qui souhaiterait entreprendre une acquisition d'expertise. Nous indiquons en effet ce qu'il nous semble souhaitable de faire ainsi que les erreurs (à éviter) que nous avons nous-mêmes commises. Nous terminons par les impressions qu'a un cogniticien face au processus d'acquisition.

2.4.1 Une ligne de conduite générale pour le cogniticien

Il est possible de dégager un processus général de l'acquisition des connaissances que nous avons menée. Celui-ci comporte trois étapes (cf. figure 2.2). Nous voulons ici insister sur ce cycle de base. Il nous semble en effet primordial que le cogniticien le suive rigoureusement. Principalement, il lui faut systématiquement "proposer pour ensuite valider", comme nous le voyons dans la suite de ce paragraphe.

Techniques et méthodes	Conditions d'utilisation	Connaissances acquises	Avantages	Inconvénients
Visites en domaine connu		Objets. Les diverses compétences. Instanciations de ces objets.	Expert à l'aise.	Passer à côté des connaissances implicites.
Visites en domaine inconnu	Etre un peu familier du domaine.	Importance d'une donnée dans le raisonnement. Connaissances implicites. Connaissances générales (de bon sens).		Expert moins à l'aise que précédemment.
Questionnaires	Etre familier du domaine. Avoir défini la structure des données à représenter.	Concepts pas encore identifiés. Pertinence des attributs.	Pouvoir valider la représentation des connaissances. Pouvoir la compléter.	Forme rigide du document. Préparation longue.
Jeux-tests	Etre familier du domaine. Avoir défini la structure des données à représenter.	Concepts pas encore identifiés. Représentation des attributs. Domaine de valeurs des attributs. Importance des informations dans le raisonnement. Raccourcis de raisonnement. Cheminement du raisonnement.	Optimise la représentation des connaissances. Expert détendu. Peu contraignant. Entretient la motivation de l'expert.	Préparation longue.
Observation de photographies	Etre familier du domaine pour une meilleure exploitation. Des photographies qui font référence à une résolution du problème.	Connaissances implicites. Cheminement du raisonnement.	Simplification des cas traités.	Risques de biais à l'interprétation si le cognicien n'est pas familier du domaine.
Entretiens ciblés		Connaissances profondes. Instanciation des structures de données. Relations et règles.	Simple. Recueil de connaissances sur un point précis de l'expertise.	Trop de détail, des connaissances parfois inutiles à l'ensemble de l'expertise.
Entretiens de validation	Avoir modélisé la connaissance.	Règles heuristiques. Identification de nouvelles connaissances.	Validation des connaissances avant et après codage. Validation du découpage en agents.	Impression de travail fait deux fois: risques de lassitude de l'expert.

Figure 2.1. Techniques et méthodes particulières utilisées dans le cadre du SE ROSY.

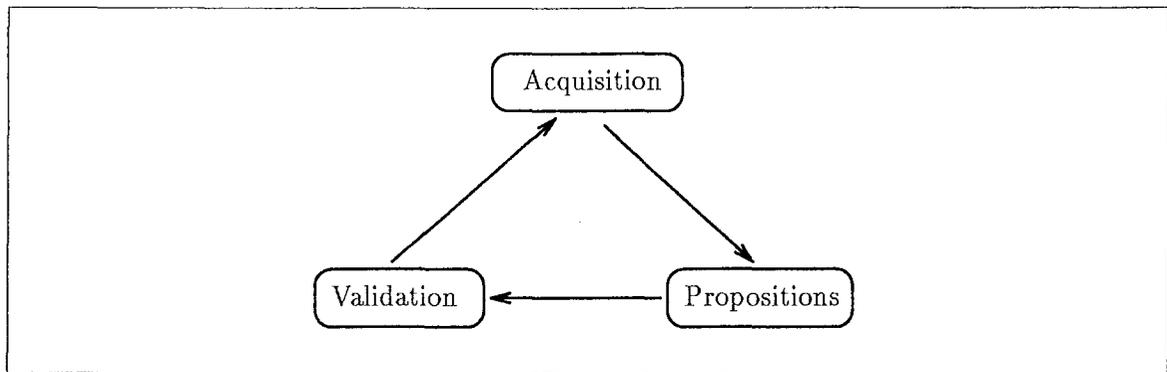


Figure 2.2. Les trois étapes d'un processus d'acquisition des connaissances.

a - Proposer

L'étape de proposition consiste à modéliser les concepts et les compétences qui ont été identifiés lors des séances d'acquisition. Un document est alors rédigé, répertoriant le résultat de ces modélisations. Aussi délicate soit-elle, cette phase nous semble être un point de passage obligé. Il faut faire des propositions. En effet, c'est l'expert qui fournit initialement les plus gros efforts en détaillant son domaine pour le cogniticien. Ce dernier doit en faire autant en s'efforçant, lui aussi, de proposer des modélisations réfléchies de ce dont l'expert a parlé. L'effort doit être également partagé si l'on ne veut pas aboutir à une démotivation puis à un désengagement de l'une ou l'autre des parties.

Cette étape est donc d'une part nécessaire pour entretenir la motivation de l'expert, d'autre part importante car expert et cogniticien vont pouvoir disposer d'un support de travail. Etant donné qu'il est impossible de fusionner leurs représentations mentales, le fait de partager au moins une description de cette expertise fournit une première aide. Tous deux discuteront des mêmes objets, porteront un jugement sur les mêmes éléments. Les problèmes de communication sont ainsi amoindris.

b - Valider

L'expert intervient alors pour critiquer ce qui a été fait : c'est la phase de validation. Une discussion s'engage entre le cogniticien et l'expert sur le modèle proposé de façon à le réajuster. Le cogniticien doit alors savoir suggérer et non imposer. Il lui faut de plus faire attention à ne pas prendre inconsciemment la place de l'expert.

Afin de repérer les éventuelles distorsions de la connaissance experte, nous proposons de procéder à une validation en deux étapes, telle que nous l'avons décrite au paragraphe 2.3.2 dans la partie traitant des entretiens de validation.

2.4.2 Les tentatives infructueuses : analyse et leçons

Quel que soit le domaine dans lequel un travail est entrepris, il se heurte, à un moment ou à un autre, à des erreurs. Il faut alors savoir analyser ces erreurs et en tirer des conclusions qui permettront de ne pas les renouveler et de progresser. C'est ce que nous faisons dans ce paragraphe pour l'acquisition des connaissances entreprise dans le cadre du SE ROSY, en nous appuyant sur des exemples issus du système.

a - Planifier le processus d'acquisition des connaissances

Considérons le cas de la spécialiste *Sp-recherche-causes*. Nous avons déjà évoqué le fait que nous avons travaillé exhaustivement à la recherche des causes des dégradations pour finalement n'utiliser qu'une partie de la connaissance ainsi acquise. La première raison à cela, nous l'avons vu (cf. partie II, § 3.2.2, page 73), réside dans le fait que nous n'avons pas tenu compte de la différence qui pouvait exister entre les connaissances utilisées par l'expert et celles nécessaires au SE. La persévérance de l'expert à rechercher systématiquement la cause d'une dégradation nous avait alors d'autant plus induite en erreur.

Face à une telle situation, le cogniticien doit alors avoir le courage de ne pas avoir une attitude "métaphysique", c'est-à-dire de supprimer la connaissance codée à tort dans le SE. Cette connaissance ne sert en effet pas au raisonnement. Elle ne pourrait éventuellement être utilisée que pour fournir des informations supplémentaires et intermédiaires à l'utilisateur du SE. Ces informations ne concernant pas directement la résolution du problème, il ne semble donc pas justifié de conserver la connaissance qui en est à l'origine. Néanmoins, le cogniticien peut vouloir la garder, pensant que la satisfaction de l'utilisateur du SE peut être un atout considérable dans l'acceptation du système, qu'elle permettra de lui apporter des explications sur le domaine de l'expertise, qu'une autre spécialiste y aura peut-être recours, ... Le discours que nous venons à l'instant de tenir montre bien la réticence qu'a le cogniticien à se séparer d'une connaissance si difficilement acquise.

En approfondissant encore l'analyse du cas de la spécialiste *Sp-recherche-causes*, nous pouvons constater que, outre la première erreur, nous en avons commise une seconde : celle de nous focaliser au hasard sur une des spécialistes que nous avons identifiées pour en expliciter la connaissance (nous avons en effet commencé par cette spécialiste). Or nous verrons dans le chapitre 3 que, d'une part, le cogniticien doit se fixer des buts successifs dans le processus d'acquisition (se focaliser sur chaque source de connaissances identifiée) et que, d'autre part, il faut judicieusement choisir la source de connaissances par laquelle débiter ce processus. Il s'agit ici d'agir pour des raisons d'efficacité, pour éviter de perdre du temps, comme ce fut le cas avec la spécialiste *Sp-recherche-causes*.

b - Des connaissances qui viennent de l'expert

Notre choix s'était porté sur cette spécialiste car elle nous semblait la plus simple à expliciter. En fait, nous avons cette impression de simplicité car nous avons un

schéma mental tout fait de cette compétence. Déterminer quelle pouvait être la cause d'une dégradation donnée ne pouvait se faire que comme dans la plupart des systèmes experts de diagnostic : le SE disposait de liens préétablis entre causes et pannes (les dégradations, dans notre cas) ; il les exploitait en attribuant à chaque cause un coefficient d'incertitude (de vraisemblance dans ATOME) qui variait en fonction des symptômes pour finalement désigner la cause coupable. Nous avons donc voulu appliquer ce modèle à la spécialiste *Sp-recherche-causes*. Nous avons tout de même cherché à savoir si cela convenait à l'expert, en lui décrivant le processus envisagé et en lui parlant de coefficients de vraisemblance qu'il devrait nous fournir. L'expert réagissait parfois en acquiesçant, et nous considérons alors qu'il nous donnait carte blanche, parfois par un mutisme absolu, la perspective d'avoir à déterminer de tels coefficients le laissant perplexe.

Nous songions donc à introduire des coefficients modélisant de l'incertitude dans les associations entre causes et dégradations et dans les règles qui concluaient sur ces associations. Il nous fallait alors expliciter ces coefficients, ce qui fut un échec. Nous y voyons trois raisons :

- la première fut d'avoir imposé notre propre vision des choses à l'expert, de façon inconsciente. Nous ne voyions en effet pas comment faire autrement que d'affecter des scores aux diverses causes de dégradations. La réaction de l'expert à nos propositions n'avait été guidée que par le fait qu'il ne voyait pas comment le SE pouvait bien raisonner, que cette idée de mettre des coefficients lui semblait bonne et surtout modélisable sur un ordinateur ;
- la seconde est liée à la réaction de l'expert vis-à-vis des coefficients. Il ne parvenait pas à les déterminer car cette notion lui était totalement étrangère et abstraite : il ne voyait pas en quoi des chiffres pouvaient représenter une certitude. Nous avons également essayé en des termes symboliques tels que ceux utilisés dans [Godo *et al.* 88], mais cette tentative n'avait guère eu plus de succès. Peut-être avons-nous commis l'erreur de ne pas suffisamment le préparer à cette notion lors de la phase de familiarisation. Outre cette raison, nous pouvons aussi mettre en avant le fait qu'explicitier de tels coefficients n'a rien de facile car ils ne se raccrochent à rien de similaire dans le domaine d'expertise. L'expert doit donc inventer de telles valeurs, ce qu'il n'apprécie guère ;
- enfin, nous pensons ne pas avoir suffisamment insisté sur l'explicitation de ces coefficients lors des réunions avec l'expert. Sachant que cela le mettait mal à l'aise, nous avons eu tendance à éviter d'aborder le sujet et leur avons nous-mêmes attribué des valeurs intuitives. Nous avons rencontré ici une des difficultés⁶ liées au "métier" de cognicien : celle d'être par trop compréhensif [Vermersch 89]. Nous pensions revenir sur ces coefficients lors de la validation du raisonnement. Finalement, ces coefficients ont été abandonnés et la spécialiste *Sp-recherche-causes* ne dispose plus maintenant que de règles sûres.

6. L'autre difficulté mentionnée est de trop parler et d'imposer ainsi son propre modèle.

La conclusion principale que nous tirons de cette tentative est que toute notion mais aussi tout terme qui sont appelés à être inclus dans un SE doivent venir de l'expert et ne pas lui être imposés. Il faut le familiariser suffisamment avec le domaine de l'intelligence artificielle pour qu'il en vienne, de lui-même, à avoir recours aux diverses potentialités de la discipline. Cela peut paraître contradictoire avec ce qui a été dit en 2.4.1 où nous insistons sur l'importance de la proposition. Il n'en est rien puisqu'il s'agit de ne proposer, sous une forme différente, que ce que l'expert a par ailleurs exprimé. De plus, la validation doit être menée de façon rigoureuse, ce que nous n'avons pas fait sur l'exemple des coefficients de vraisemblance par crainte de mettre l'expert mal à l'aise.

2.4.3 Raisonner sur des cas particuliers

Ce que nous présentons ici vient en réponse aux questions soulevées au paragraphe 2.1.3. Nous y avons mentionné le fait que l'expert préfère raisonner sur des cas concrets plutôt que sur un cas général abstrait et qu'il avait recours à de nombreux exemples. Nous ne sommes pas intervenue pour essayer de limiter cette utilisation de cas réels car nous sentions l'expert beaucoup plus à l'aise lorsqu'il travaillait sur de tels cas. Il était déjà confronté au problème de l'expression de sa connaissance, qu'il s'efforçait d'exprimer clairement. Aussi nous semblait-il préférable de ne pas lui imposer davantage de contraintes. Les séances d'acquisition correspondantes étaient alors beaucoup plus bénéfiques en matière de connaissances identifiées, même s'il fallait prendre garde au fait qu'il s'agissait de cas particuliers. A force d'envisager de tels cas, nous étions parvenue à un stade où il nous était possible, probablement pas toujours mais souvent, de détecter une incohérence dans ses propos et de lui rappeler un exemple qui semblait les contredire. Nous n'avions initialement pas cette possibilité, ce qui nous rendait très prudente par rapport au discours de l'expert.

Cela va dans le sens de ce que nous avons dit au paragraphe 4.2 de la partie II : l'expert souhaite exprimer un savoir "vrai", qui ne soit pas entaché d'erreurs. Aussi, lorsqu'une question générale lui est posée, a-t-il tendance à chercher une réponse en envisageant des situations semblables, plus ou moins proches, qu'il a pu rencontrer. Le danger est finalement plus grand que de travailler explicitement sur un cas particulier. Le risque de passer à côté d'une partie du raisonnement ou de données impliquées ne peut en effet qu'être encore plus important puisque le cognicien ne connaît pas les exemples que l'expert peut avoir en tête, peut même ne pas les soupçonner. Il lui devient alors impossible de se rendre compte de la portée et de la validité de l'information qu'il vient d'obtenir. Avec un cas réel, il a au moins la possibilité de se renseigner sur le sujet au préalable (ou *a posteriori*, si l'expert envisage des cas particuliers de façon inopinée) et de participer à la séance de travail avec l'expert en terrain conquis.

Certains psychologues définissent d'ailleurs des techniques d'accès aux connaissances implicites fondées sur des résolutions vécues de problème. C'est notamment le cas de P. Vermersch qui propose ainsi les entretiens d'explicitation [Vermersch 89] dont nous avons parlé au paragraphe 2.3.2, page 122. Notamment, il insiste sur le fait que

les questions posées doivent être exprimées en des termes sensoriels de façon à faire appel aux souvenirs qu'a l'opérateur de la tâche qu'il a effectuée. Il suggère d'éviter les "pourquoi" qui ont trait à une conception intellectuelle de la tâche à exécuter. Il mentionne d'ailleurs le fait que, dans la pratique, les questions commençant par des pourquoi ou bien ne trouvent pas de réponse ou bien engendrent un discours plus général et complètement déconnecté de ce que l'opérateur a effectivement fait.

Nous avons pu constater la même situation avec l'expert en voirie urbaine. Aussi tenons-nous ici à plébisciter les séances d'acquisition des connaissances dans lesquelles un cas particulier est traité. L'expérience prouve en effet que placer l'expert dans un situation artificielle n'est pas concluant. Bien souvent, la réponse à une question dans un tel environnement est : "Je ne sais pas, il faudrait voir.". Il faut cependant toujours garder en mémoire le fait que les connaissances recueillies ne sont peut-être pas universelles et que d'autres peuvent ne pas avoir été explicitées.

2.4.4 Des techniques d'acquisition adaptées à l'expert

Nous avons souvent évoqué, dans ce qui précède, le fait que l'expert soit à l'aise ou pas lors des séances d'acquisition : il préfère travailler sur des cas particuliers ; il est à l'aise au cours des visites ; il apprécie les jeux-tests, ... Ce critère nous semble essentiel pour le processus d'acquisition. Il faut certes adapter les méthodes et techniques d'acquisition au type de connaissances à acquérir mais aussi à l'expert lui-même. Il est en effet beaucoup plus motivé lorsque le cogniticien opte pour une méthode qui lui convient tout à fait. Son attitude est totalement différente en fonction du type de technique utilisée. Par exemple, lorsqu'une séance a trait à des éléments abstraits, l'expert hésite. Ces séances sont ponctuées de longs silences et la progression dans l'explicitation des connaissances est en général assez faible. Il finit toujours par revenir à des cas concrets et le cogniticien peut alors remarquer à quel point il s'enflamme lorsqu'il parle de "ses rues". Les résultats n'en sont alors que plus riches, les séances plus efficaces.

De même, il faut prendre en compte la façon dont il préfère transmettre ses connaissances, qui est bien souvent inconsciente d'ailleurs. Dans le paragraphe 4.2 de la partie II, nous avons parlé du fait que l'expert souhaitait avoir un point de comparaison avec d'autres experts et allait parfois jusqu'à demander comment le SE procédait. La raison que nous avons alors évoquée était le souci de ne pas fournir une connaissance "fausse". Sachant que la connaissance codée dans le système ROSY était appelée à avoir une certaine durée de vie, l'expert considérait que le système devait être le symbole de la vérité et reproduire un raisonnement exact. Il avait notamment exprimé ce souhait de comparaison lorsque nous travaillions à expliciter les associations entre causes et dégradations. Nous lui demandions en effet de se prononcer dans l'absolu. Aussi désirait-il comparer avec d'autres sources d'expertise⁷ de manière à progresser lui-même en bénéficiant de ces comparaisons et à en faire profiter le système.

Ce qui nous semblait alors paradoxal était le fait qu'il nous demandait notre propre

7. Dans l'exemple précédent, il se reportait souvent à un manuel répertoriant les dégradations et quelques causes potentielles [Ministère 87].

avis ou la façon dont le SE procédait. En fait, il recherchait de telles comparaisons car il ne savait pas comment expliciter son savoir-faire ou ne parvenait pas à le faire. Une comparaison constituait alors un support sur lequel il pouvait s'appuyer pour transmettre ce savoir-faire, au travers des arguments qu'il fournissait pour justifier les différences ou les points communs avec la source de comparaison. Il était ainsi beaucoup plus à l'aise et la situation avait le mérite de ressembler davantage à un entretien entre un expert et un cogniticien travaillant collectivement à un même but qu'à un cours magistral dont l'expert aurait été l'enseignant et le cogniticien l'élève. Nous en avons conclu que, lorsque l'expert nous demandait comment nous avions fait, il était préférable de lui fournir une réponse, quelle qu'elle soit, aussi erronée soit-elle. Initialement, nous hésitions à fournir de telles réponses, tout d'abord parce que nous ne nous sentions pas suffisamment familier du domaine, puis par crainte d'influencer l'expert en lui présentant la modélisation entreprise dans le SE. En fait, nous ne l'influencions absolument pas puisqu'il nous expliquait pourquoi notre solution ne convenait pas et nos réponses agissaient alors comme un catalyseur sur ses propos.

Le cogniticien a donc tout intérêt à choisir des techniques d'acquisition et à favoriser les modes d'expression qui mettent l'expert à l'aise, la situation de "communicateur" de l'expertise étant déjà par ailleurs suffisamment difficile. En agissant ainsi, il influe sur la motivation de l'expert qui participe alors activement et efficacement au processus d'acquisition.

2.4.5 Impressions du cogniticien face au problème d'acquisition des connaissances

Outre les difficultés que nous avons mentionnées tout au long de ce chapitre, qu'elles soient d'ordre général ou particulières au domaine de la voirie urbaine ou à l'environnement multi-agents, le problème majeur que le cogniticien rencontre dans un processus d'acquisition est la sensation d'être perdu. Au départ, il est un peu perdu car il ne sait pas trop par quoi commencer ni comment commencer, notamment parce qu'il n'a bien souvent pas eu de formation au "métier" de cogniticien et que le domaine lui est inconnu (c'est le paradoxe que nous avons soulevé en 1.1.3). Une étude bibliographique importante est alors nécessaire pour avoir des idées sur ce que peut bien être ce "métier" et sur les méthodes et techniques associées. Ensuite, il est perdu face à la quantité impressionnante de données qui semblent devoir faire partie du SE, qu'il a réussi à mettre en évidence et qu'il va lui falloir traiter. Cette sensation est d'autant plus forte que la connaissance est souvent redondante. En effet, obnubilé par la crainte de déformer le savoir-faire expert, il a tendance à augmenter les tests de validation et à diversifier la façon d'aborder la connaissance. Il est ainsi possible d'aboutir à des connaissances ayant le même contenu sémantique mais pas la même forme, du fait des chemins différents qui ont été empruntés.

Le cogniticien ne sait alors plus ce qui est pertinent, à quelle source de connaissances attribuer telle bribe de savoir, s'il lui faut continuer à acquérir de la connaissance sur tel sujet ou si celle dont il dispose est suffisante, . . . , en bref comment bien organiser et bien représenter toutes ces connaissances. Il souhaiterait être guidé dans sa

tâche. Il semble que ce phénomène soit général à toute acquisition de connaissances. L'acquisition en elle-même est déjà difficile mais la sensation d'être démuni face à la quantité de connaissances à organiser est ce qui handicape le plus les cognitiens [Nwana *et al.* 91]. La méthode que nous avons définie puis suivie présente l'avantage de diminuer cette sensation en fournissant un guide pour l'acquisition des connaissances et leur structuration. Nous la présentons dans le chapitre qui suit.

3

Un processus d'acquisition des connaissances dans le cadre des systèmes multi-experts

Tout processus d'acquisition des connaissances agit sur l'architecture logicielle qui est choisie pour construire un système expert. En effet, les éléments issus de l'acquisition permettent tout d'abord de définir cette architecture, puis de l'affiner. Cela a été le cas dans le cadre du système multi-experts (SME) ROSY, ce qui nous a conduite à opter pour l'architecture de ATOME. En analysant notre façon de procéder au cours de la phase d'acquisition, nous avons pu observer non seulement que le processus d'acquisition influait sur l'architecture du SE ROSY mais aussi que le phénomène réciproque se produisait. L'architecture multi-agents multi-niveaux de ATOME déteignait à son tour sur le processus d'acquisition, transformant ainsi la construction du SE en une boucle entre acquisition et structuration des connaissances. C'est de cette boucle qu'il est question dans ce chapitre, ainsi que de la méthode d'acquisition des connaissances qui y trouve son origine [Ferraris et Haton 91].

Nous mettons tout d'abord en évidence l'interaction entre acquisition et architecture multi-agents multi-niveaux sur l'exemple du SE ROSY. Puis nous décrivons la méthode que nous avons définie, en commençant par les concepts de constructeurs *descendants* et *ascendants*. Nous expliquons ensuite le principe de la méthode et voyons comment ces constructeurs interviennent, avant d'illustrer son utilisation sur le cas du système ROSY. Nous présentons alors les avantages et inconvénients de la démarche proposée et voyons comment il serait possible de la faire évoluer.

3.1 La boucle acquisition - SME multi-niveaux

Ce paragraphe montre tout d'abord comment la nature et le type des connaissances obtenues lors de la phase d'acquisition de l'expertise nous a conduite à choisir l'architecture multi-experts multi-niveaux de ATOME pour développer ROSY avant de mettre en évidence, à l'inverse, l'influence d'une telle architecture sur le processus d'acquisition des connaissances. La boucle entre ce processus et l'architecture SME

multi-niveaux est ensuite mise en évidence et son intérêt pour la construction d'un SME est dégagé.

3.1.1 De l'acquisition des connaissances vers ATOME

Nous ne revenons pas sur ce qui nous a poussée vers un système expert : cela a déjà été détaillé au paragraphe 1.3 de la partie II. Seuls le choix d'une architecture multi-experts, puis multi-niveaux, et le choix du modèle du blackboard sont détaillés.

a - Les composantes "multi-experts" et "blackboard"

L'analyse de la démarche experte nous avait permis d'identifier l'intervention de plusieurs compétences. L'expert passait de l'une à l'autre en fonction du cas à traiter et de l'état de la solution courante. Toutes ces compétences étant assurées par une seule et même personne, le raisonnement expert faisait donc appel à un unique ensemble d'informations qui répertoriait à la fois les données initiales du problème et les données déduites en cours de résolution.

Nous nous trouvions face à une expertise où une composante multi-experts apparaissait. La modélisation de cette expertise devait indubitablement faire appel à une architecture multi-agents, ces agents communiquant par une zone de données commune. Une architecture de type blackboard devait donc être choisie.

b - La composante "multi-niveaux"

Notre choix ne s'est arrêté sur ATOME que lorsque l'aspect multi-niveaux fut mis en lumière. Chez l'expert, comme chez tout être humain, les connaissances sont en effet organisées en couches en fonction de leurs niveaux d'abstraction. Cette classification fut révélée par des travaux en psychologie cognitive et en ergonomie (cf. les travaux de J. Rasmussen présentés dans [Bisseret 86]) qui distinguent trois de ces niveaux dans l'activité mentale humaine :

- au plus bas niveau, l'activité mentale consiste à sélectionner et à activer un schéma de résolution de problème provenant d'un ensemble de schémas pré-instanciés. Cela correspond à peu près à un réflexe répondant à un stimulus donné ;
- au niveau intermédiaire, les données du problème à résoudre conduisent à la sélection d'un ou plusieurs schémas non instanciés puis à leur instanciation. Il s'agit du principal niveau de raisonnement chez un expert, celui qui garantit une efficacité maximale dans la prise de décision et la réalisation d'actions. L'expert sait immédiatement comment réagir, grâce à son expérience ;
- enfin, le plus haut niveau correspond à la démarche de résolution de problèmes. L'expert ne sait pas immédiatement que faire face au problème qui lui est posé. Il a alors recours à des connaissances profondes ou à des méta-connaissances

qui conduisent à la création de nouveaux schémas généraux. Ceux-ci sont alors instanciés en fonction des données du problème.

Une des particularités de ces niveaux est le fait qu'un niveau supérieur peut faire appel à un niveau inférieur, ce qui n'est pas le cas dans la situation contraire. De plus, ils interviennent tous trois dans tout raisonnement expert et permettent de déduire une distinction entre plusieurs degrés d'expertise : le savoir, le savoir-faire et le savoir bien faire [Haton MC 89].

Ces niveaux apparaissent progressivement lors de la phase d'acquisition. Savoir si un diagnostic doit être établi sur une chaussée donnée ne relève pas du même niveau de raisonnement que savoir si une canalisation souterraine peut être la cause d'une dégradation sur la chaussée. Cela fait appel à des compétences et à des connaissances différentes, même si les mêmes concepts sont utilisés. Les trois niveaux correspondent en fait à différents degrés de décision et d'abstraction, le plus haut d'entre eux étant le plus abstrait. ATOME propose pour les sources de connaissances un tel découpage en niveaux d'abstraction et une telle dépendance entre ces niveaux. Contrairement au modèle de Rasmussen et conformément au modèle de l'expertise en voirie urbaine, il permet également de formaliser une certaine communication, bien que non explicite, entre un niveau inférieur et un niveau supérieur. Il offre ainsi la structure la plus à même de pouvoir formaliser le modèle de l'expertise, même si certaines différences avec ce modèle vont apparaître (cf. paragraphe 3.3). Aussi l'avons-nous choisi pour réaliser le SME ROSY.

Nous sommes donc partie de la caractérisation de la connaissance du domaine et de l'observation du raisonnement de l'expert pour parvenir à l'architecture multi-experts multi-niveaux de ATOME, démarche qui est schématisée sur la figure 3.1.

3.1.2 Architecture multi-experts multi-niveaux : guide pour l'acquisition des connaissances

L'architecture de ATOME ayant été retenue, nous avons effectué un premier découpage en sources de connaissances. Chacune de ces sources de connaissances a une compétence propre et ne s'occupe, de ce fait, que d'un domaine bien délimité. Elle ne fait ainsi appel qu'à un nombre limité de données dans les blackboards et ne comporte de même qu'un nombre limité de connaissances. C'est de cette délimitation et de la structuration des connaissances en plusieurs agents que naît le premier intérêt pour l'acquisition des connaissances. Plutôt que de partir dans de multiples directions dans le processus d'acquisition des connaissances en considérant systématiquement l'ensemble de la démarche experte (ce que nous faisons initialement avec le SE ROSY, alors que nous n'avions pas encore identifié la composante multi-agents), le cognicien va pouvoir se centrer sur une des compétences de l'expertise. Il ne travaille alors que sur les données du problème liées à la compétence qu'il a choisi de traiter ; il ne s'intéresse qu'aux connaissances liées à ces données et donc à cette compétence. Ce phénomène se reproduit pour chacune des compétences qu'il envisage, c'est-à-dire pour chacune des sources de connaissances identifiées. Il focalise son attention sur chaque source de connaissances successivement, la compétence associée lui fournissant le focus autour

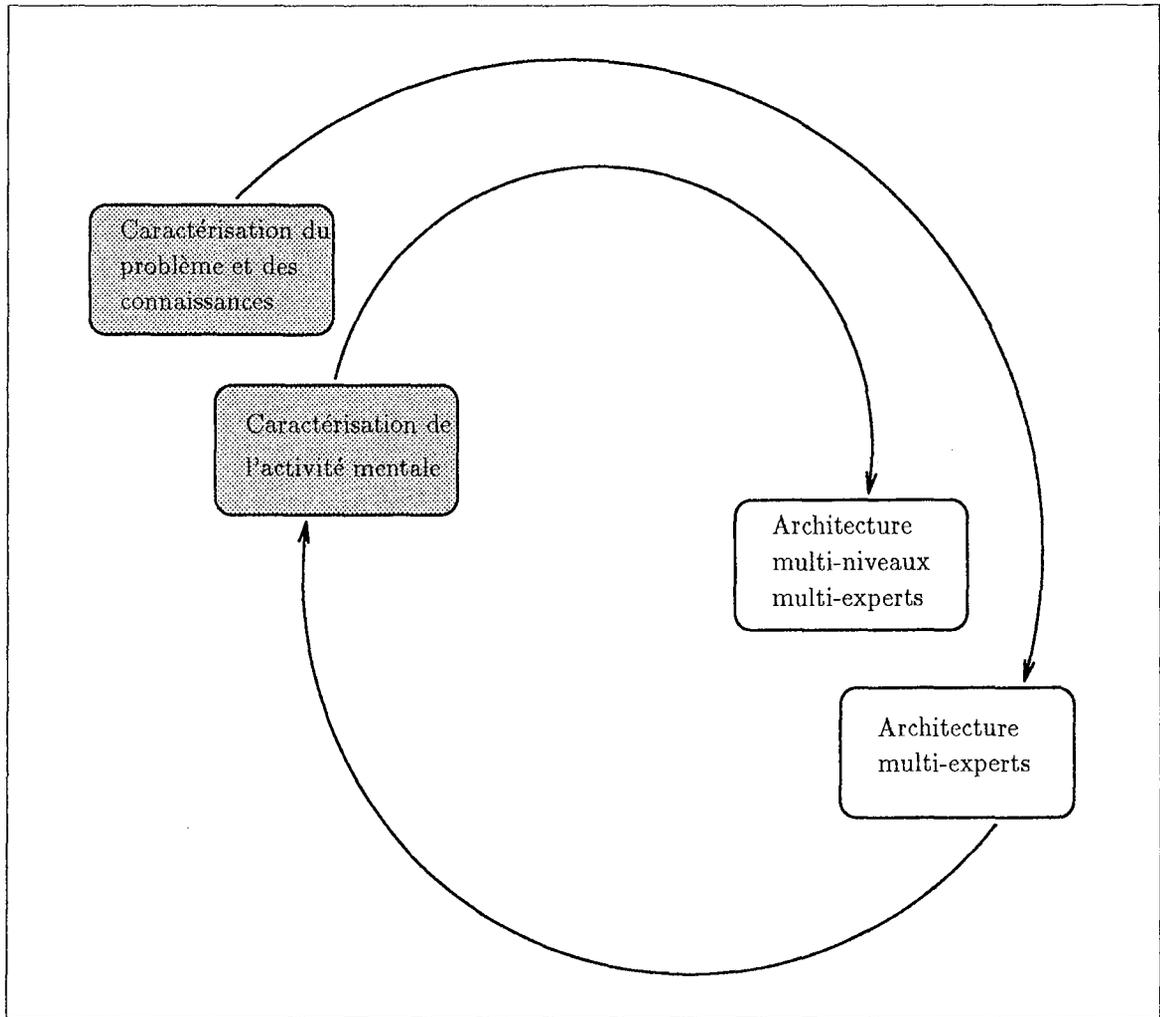


Figure 3.1. Vers la définition d'une architecture multi-experts multi-niveaux.

duquel les séances d'acquisition vont s'organiser. Il peut donc véritablement organiser et planifier le processus d'acquisition qu'il entreprend.

Le second intérêt réside dans l'organisation hiérarchique de ATOME qui permet de distinguer des connaissances de niveaux d'abstraction différents. Une telle répartition de la connaissance dans les trois niveaux d'abstraction qu'ATOME propose nous semble pouvoir être l'épine dorsale du processus d'acquisition de connaissances, tout comme elle l'est déjà pour la méthode KADS (cf. paragraphe 1.2) dont les différents niveaux d'abstraction peuvent de plus être mis en parallèle avec ceux de ATOME :

KADS		ATOME
niveau stratégique	↔	stratégie
niveau tâche	↔	tâches du domaine de l'expertise
niveau inférences	↔	spécialistes
niveau domaine	↔	blackboards de l'application

Ce parallèle ne correspond nullement à une relation d'équivalence entre les niveaux de KADS et ceux de ATOME. Il se traduit en fait par une équivalence entre les connaissances d'un niveau d'abstraction de KADS et celles du modèle de l'expertise en voirie urbaine, puis par une formalisation de ces dernières au niveau correspondant dans ATOME, dans la limite des possibilités offertes par cet outil.

Tout comme B.J. Wielinga et J.A. Breuker ont défini un modèle d'interprétation des données verbales provenant d'un expert en tenant compte des divers niveaux d'abstraction de la connaissance, c'est l'architecture hiérarchique de ATOME qui va en quelque sorte servir de guide et de modèle pour le processus d'acquisition. Certains psychologues soulignent d'ailleurs l'intérêt qu'il y a à tenir compte de ces différents niveaux dès la phase d'extraction [Alengry 88] : l'organisation d'une base de connaissances en couches évite les problèmes liés à la hiérarchisation et à la compréhension d'un grand ensemble de règles de production, tels qu'ils se présentent souvent pour les concepteurs de systèmes experts.

En réunissant les éléments qui composent les deux intérêts que nous venons de présenter, il est alors possible d'en dégager un troisième. Le fait de connaître le niveau d'abstraction de la connaissance à expliciter et de se focaliser à un moment donné sur un domaine de compétence parfaitement délimité, dont les concepts qui interviennent sont cernés, permet au cognitif d'opter pour une technique ou un outil d'acquisition adaptés au niveau et au type de la connaissance qu'il cherche à expliciter. Pour chaque source de connaissances identifiée dans une application développée avec ATOME, il est ainsi possible de choisir une technique adéquate.

L'architecture de ATOME facilite ainsi le processus d'acquisition des connaissances en le faisant bénéficier des retombées de ses deux caractéristiques principales : l'aspect multi-agents et la distinction de plusieurs niveaux d'abstraction. Elle agit véritablement sur ce processus en le structurant à son image (cf. figure 3.2).

3.1.3 Un processus itératif

Nous avons montré, dans ce qui précède, comment la caractérisation de l'expertise en voirie urbaine nous a conduit à choisir une architecture multi-experts multi-niveaux pour développer ROSY et comment cette architecture a, à son tour, rejailli sur le processus d'acquisition des connaissances en le structurant et en fournissant un guide au cognitif. Le processus ne s'arrête pas là. En effet, les nouvelles connaissances acquises vont venir alimenter les blackboards et les sources de connaissances du SE, se contentant parfois de les compléter, les remettant d'autres fois en cause. Il est alors possible de repérer des connaissances mal réparties entre les divers agents¹ (qui n'ont pas leur place dans l'un mais conviendraient tout à fait dans un autre agent, existant ou à créer) ou un agent dont la compétence a été surestimée et qu'il serait bon de dissocier de manière à obtenir une meilleure résolution du problème. Le découpage en sources de connaissances est ainsi révisé, de même que la structuration des niveaux des blackboards. Celle-ci agissant par ailleurs sur les connaissances des agents (cf. les

1. Les termes d'agent et de source de connaissances représentent ici la même entité, "source de connaissances" étant le terme consacré pour ATOME.

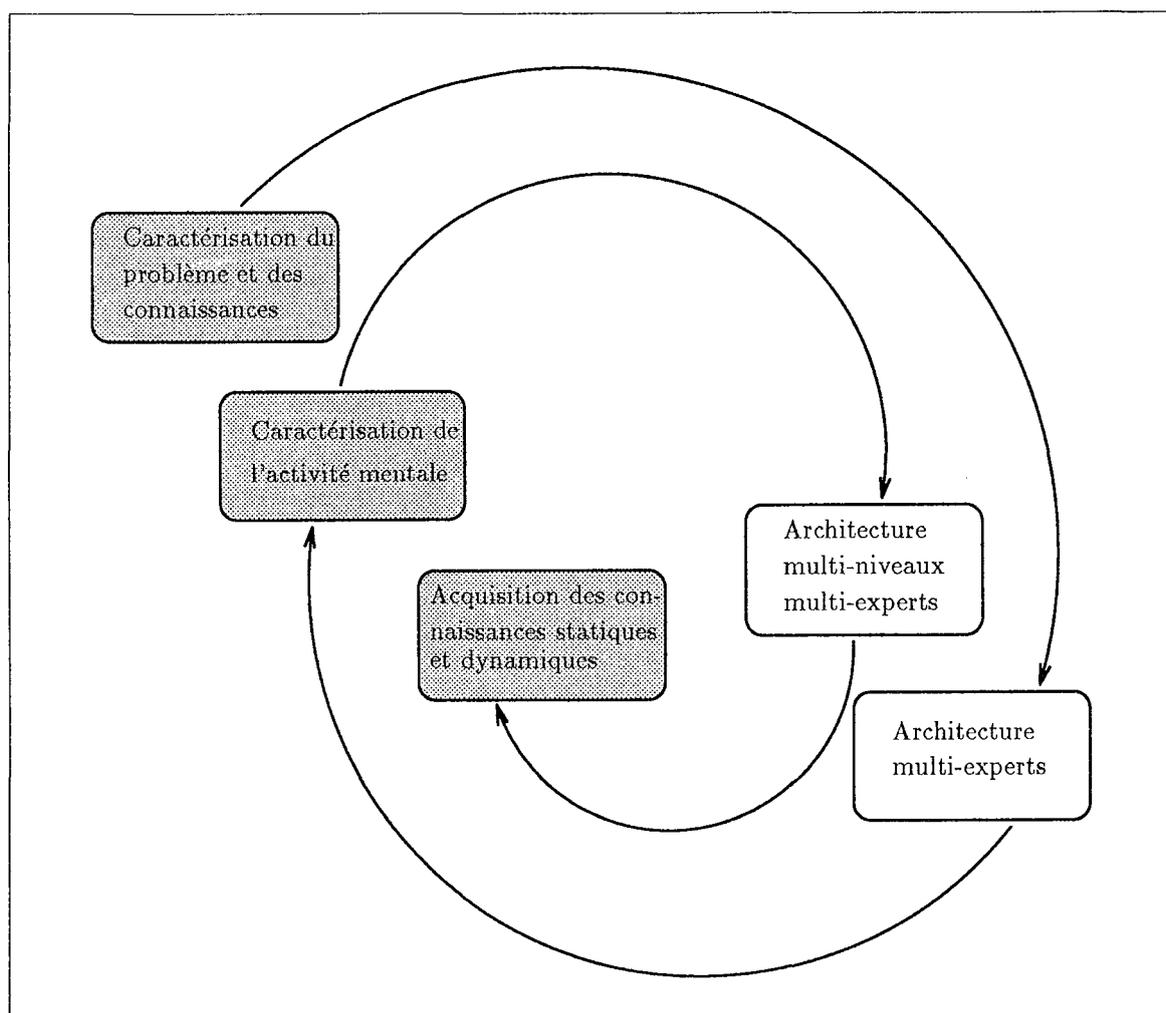


Figure 3.2. Influence de l'architecture multi-experts multi-niveaux sur le processus d'acquisition des connaissances.

entretiens de validation, § 2.3.2), la remettre en cause revient, encore une fois, à revoir le découpage en sources de connaissances. Les compétences et les niveaux de données ainsi identifiés et créés deviennent alors de nouveaux objectifs pour l'acquisition des connaissances et les nouvelles connaissances acquises permettent d'affiner la structure multi-agents multi-niveaux. Le processus itératif ainsi créé (cf. figure 3.3) vise à la définition d'une architecture logicielle pour un SME et à son affinement jusqu'à l'obtention du système complet.

Ce processus peut se résumer à une interaction entre acquisition et structuration de l'architecture logicielle d'un SME. Il suffit pour cela de fusionner tout ce qui concerne l'acquisition d'un côté (en grisé sur la figure 3.3) et ce qui est architecture de l'autre. Le résultat obtenu correspond alors à un processus de construction de SE, la structuration du SE étant le moule dans lequel l'acquisition des connaissances va venir se fondre (cf. figure 3.4). Les intérêts du rejaillissement de l'architecture multi-experts multi-

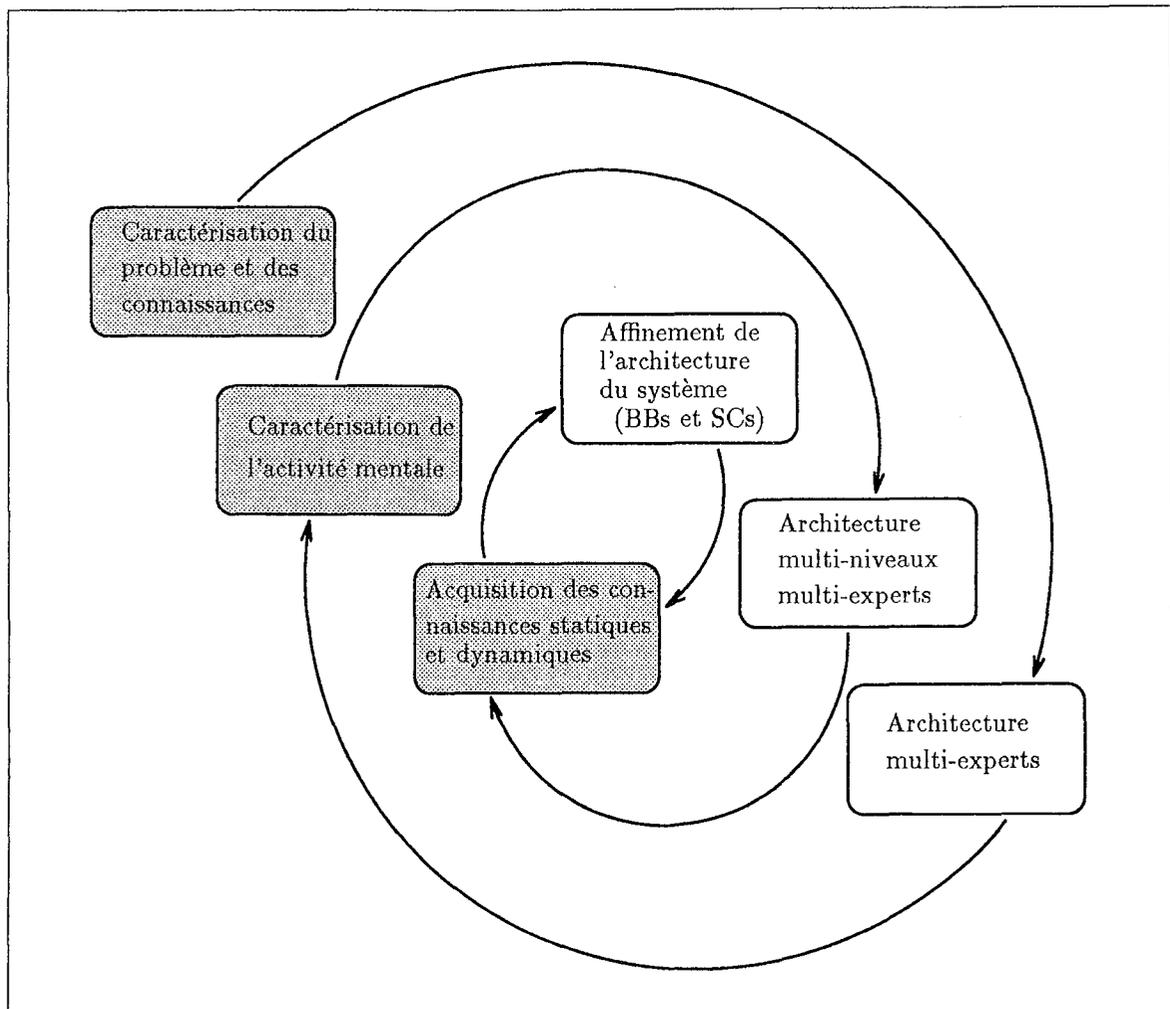


Figure 3.3. La construction d'un système multi-experts multi-niveaux.

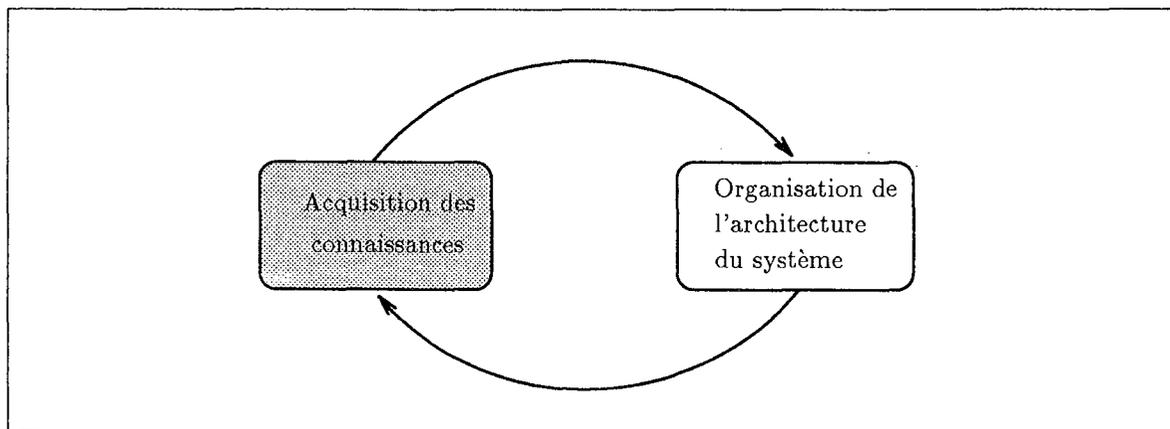


Figure 3.4. La boucle de base du processus de construction d'un SME multi-niveaux.

niveaux sur le processus d'acquisition (cf. 3.1.1) sont ainsi valables tout au long du développement du SE. Le cogniticien disposera donc en permanence d'un guide pour mener à bien la phase d'acquisition.

3.2 Une méthode de développement de SME fondée sur cette boucle

L'interaction entre acquisition et architecture SME multi-niveaux que nous avons fait ressortir au paragraphe précédent est à l'origine de la méthode de développement² du SME que nous présentons ici. Elle fait appel à la notion de constructeurs qui en sont les éléments de base et que nous décrivons en premier lieu.

3.2.1 Les constructeurs de base

Les constructeurs sont des opérateurs de base au sens des types abstraits. Ils sont appliqués sur des éléments provenant de :

- C, l'ensemble des compétences. Une compétence correspond à une source de connaissances identifiée mais dont les connaissances n'ont pas encore été explicitées ;
- S, l'ensemble des sources de connaissances. A la différence de ceux de C, les éléments de S sont complétés par leurs connaissances.

Nous les définissons donc par rapport à leur fonction et à ces ensembles (les éléments de ces ensembles seront tous qualifiés de sources de connaissances dans ce qui suit).

a - Le constructeur descendant

Le constructeur descendant CD est une fonction de profil :

$$CD : C \longrightarrow C^n$$

L'appliquer consiste à considérer une source de connaissances ayant en charge une compétence globale, à diviser cette compétence en plusieurs sous-compétences inter-reliées et à attribuer ensuite ces sous-compétences à des "sous-sources" de connaissances, ou sources de connaissances composantes, qui sont ainsi créées. Un groupe de travail est alors constitué (cf. figure 3.5), dans lequel la source de connaissances qui a été divisée joue un rôle principal : elle gère les interventions des sources de connaissances composantes.

Il ne s'agit que d'identifier les différentes compétences qui sont mêlées dans la source de connaissances principale. La connaissance utilisée par les divers agents associés à

2. Il s'agit à la fois d'une méthode d'acquisition et de développement de systèmes experts multi-agents.

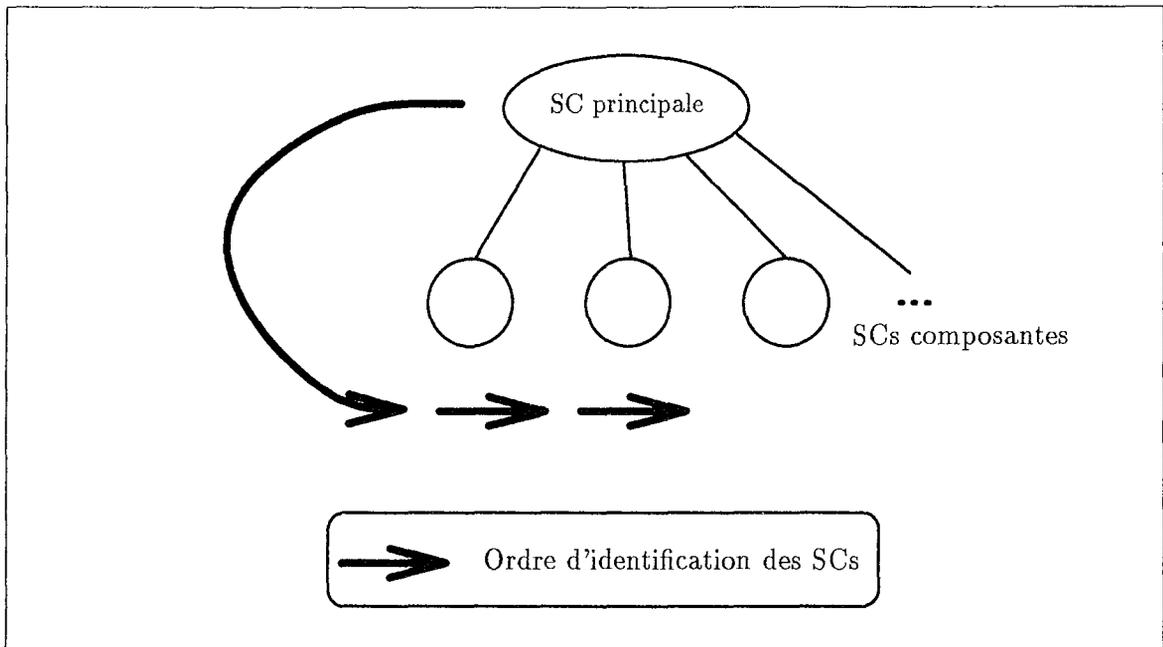


Figure 3.5. Le constructeur descendant.

ces compétences a été cernée mais pas encore détaillée : le but auquel les agents vont œuvrer est connu mais les moyens (données et connaissances) pour atteindre ce but sont encore flous. Cela est indiqué sur la figure 3.5 en représentant les sources de connaissances par des cercles vides.

Le but du constructeur descendant est donc de se focaliser sur la source de connaissances principale de manière à l'éclater en plusieurs autres sources de connaissances. Aussi celle-ci est-elle appelée le *focus* du constructeur.

b - Le constructeur ascendant

Le constructeur ascendant CA (cf. figure 3.6) opère sur un groupe de travail créé par son homologue descendant. Sa fonction est plus complexe que celle du précédent puisqu'il intervient à la fois, dans le groupe considéré, sur chacune des sources de connaissances composantes et sur la source de connaissances principale. Il s'agit d'acquérir la connaissance de chaque source de connaissances composante du groupe de travail avant de décider de façon précise comment la source de connaissances principale gèrera l'ensemble des sources composantes. Ce constructeur combine donc deux fonctions, ce qui lui donne le profil suivant :

$$CA : (C \rightarrow S)^n \otimes (S^n \rightarrow S)$$

La connaissance joue ici le rôle principal. L'attention se porte en effet sur l'ensemble des connaissances manipulées par une source composante. Celui-ci est enrichi au fur et à mesure que de nouvelles connaissances sont identifiées et d'autres modifiées. Une fois

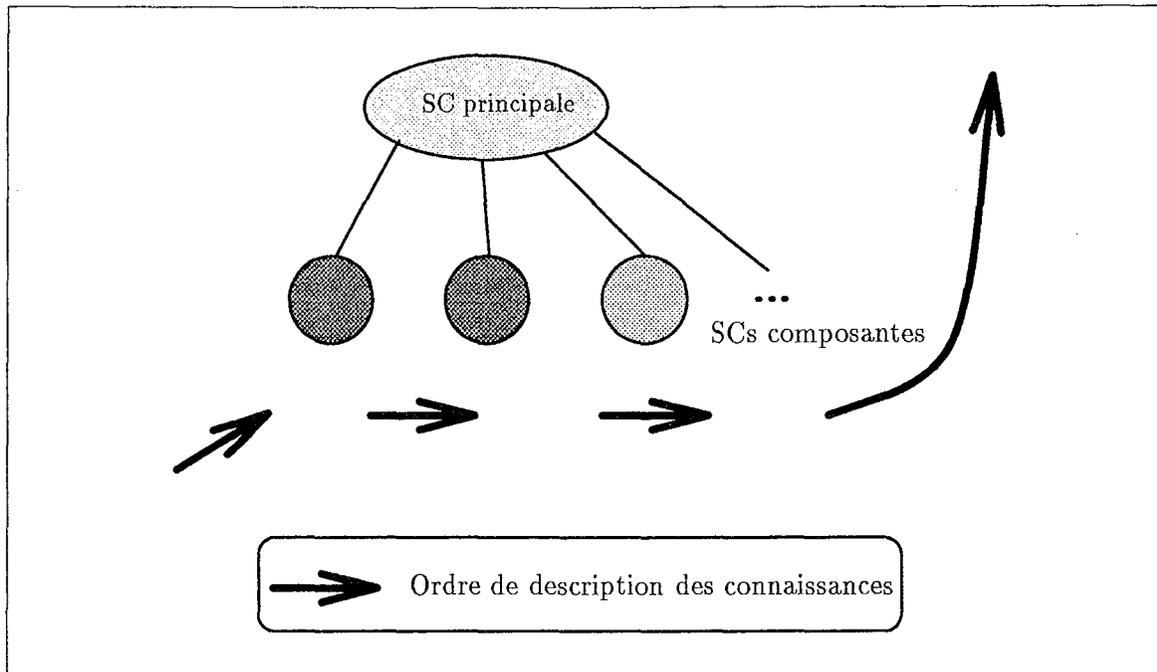


Figure 3.6. Le constructeur ascendant.

ces ensembles stabilisés, il est alors possible d'étudier les mécanismes et procédures à mettre en place pour réaliser un enchaînement correct (correspondant à l'expertise, donc validé par l'expert) des sources composantes. La connaissance de la source principale est ainsi constituée. Cela est représenté par les cercles grisés de la figure 3.6, comme si les cercles vides de la figure 3.5 avaient été remplis de connaissances (plus le fond du cercle est sombre, plus la source renferme de connaissances donc plus on est proche de son état final).

Les diverses sources de connaissances impliquées dans le groupe deviennent, à tour de rôle, focus du constructeur ascendant, le dernier de ces focus étant la source principale. En effet, si les connaissances de cette dernière peuvent être partiellement identifiées à tout moment dans le processus, le cogniticien ne peut les compléter définitivement qu'après avoir analysé toutes les sources composantes.

3.2.2 Principe de la méthode

La méthode que nous proposons est composée de deux processus s'exécutant en parallèle. Le premier concerne le développement des sources de connaissances, le second celui des données des blackboards.

a - Définition des sources de connaissances

Ce processus est fondé sur une application récursive des constructeurs ci-dessus sur l'expertise à modéliser. Il est entretenu jusqu'à ce que le cogniticien obtienne une archi-

lecture satisfaisante (reproduisant fidèlement le raisonnement expert et obtenant des résultats d'expertise équivalant à ceux de l'expert). Nous associons une phase à chacun des constructeurs définis précédemment : la phase *descendante* (par analogie avec une descente dans l'architecture hiérarchique de ATOME) qui a recours au constructeur descendant et la phase *globalement ascendante* (un mouvement général du bas vers le haut de la hiérarchie s'en dégage) qui applique le constructeur ascendant. La méthode peut alors être vue comme un processus itératif fait de plusieurs étapes de base : la concaténation de ces deux phases, qui est modélisée sur la figure 3.7, et des applications isolées des constructeurs (cf. figure 3.6 et 3.5). Nous la présentons dans

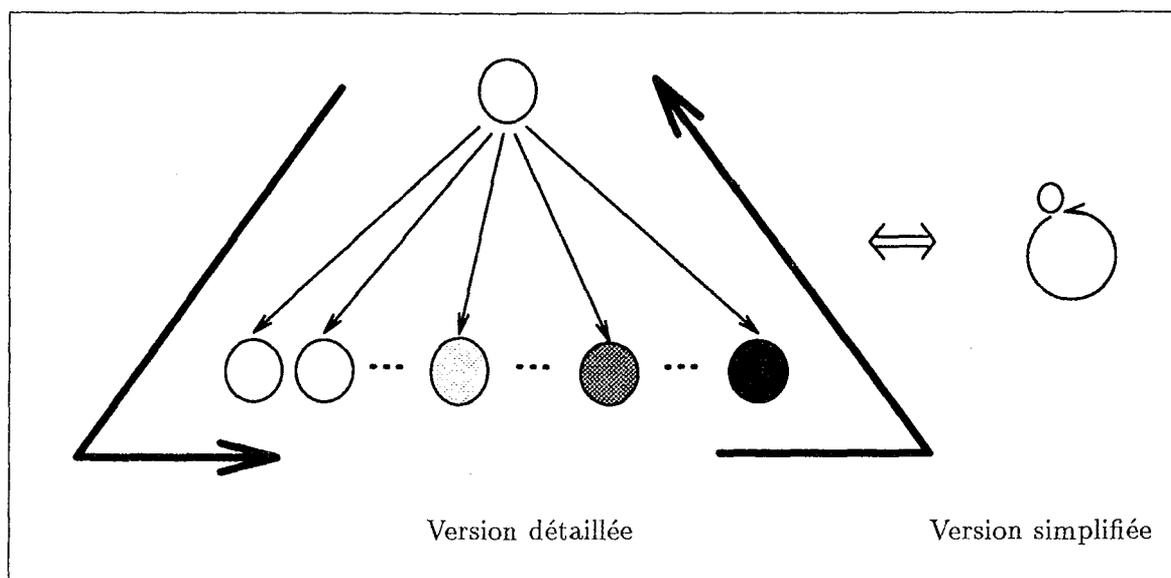


Figure 3.7. Enchaînement des deux constructeurs.

la figure 3.8 sous une forme algorithmique et dans la figure 3.9 sous la forme graphique associée.

Notons que le premier mouvement de la démarche correspond à descendre toute la hiérarchie de ATOME depuis la stratégie jusqu'aux spécialistes d'une tâche. Seuls des constructeurs descendants y étant utilisés, les tâches et les spécialistes créés ne sont définies que sémantiquement : leurs rôles et leurs buts sont globalement connus mais la connaissance associée n'est ni explicitée, ni formalisée. Cela correspond à la phase de familiarisation avec le domaine puis à une caractérisation plus poussée de l'expertise, qui révèle les diverses compétences du domaine (cf. figure 3.10).

b - Construction des blackboards

Nous avons utilisé une méthode de construction de bases de données pour définir la structure des différents blackboards. Il s'agit de la méthode REMORA (voir [Rolland *et al.* 88]) qui se rapproche de la méthode MERISE. Nous avons ainsi établi un premier schéma entités-associations des divers blackboards intervenant dans l'expertise au fur et à mesure que l'architecture logicielle du SE se dégageait et que les

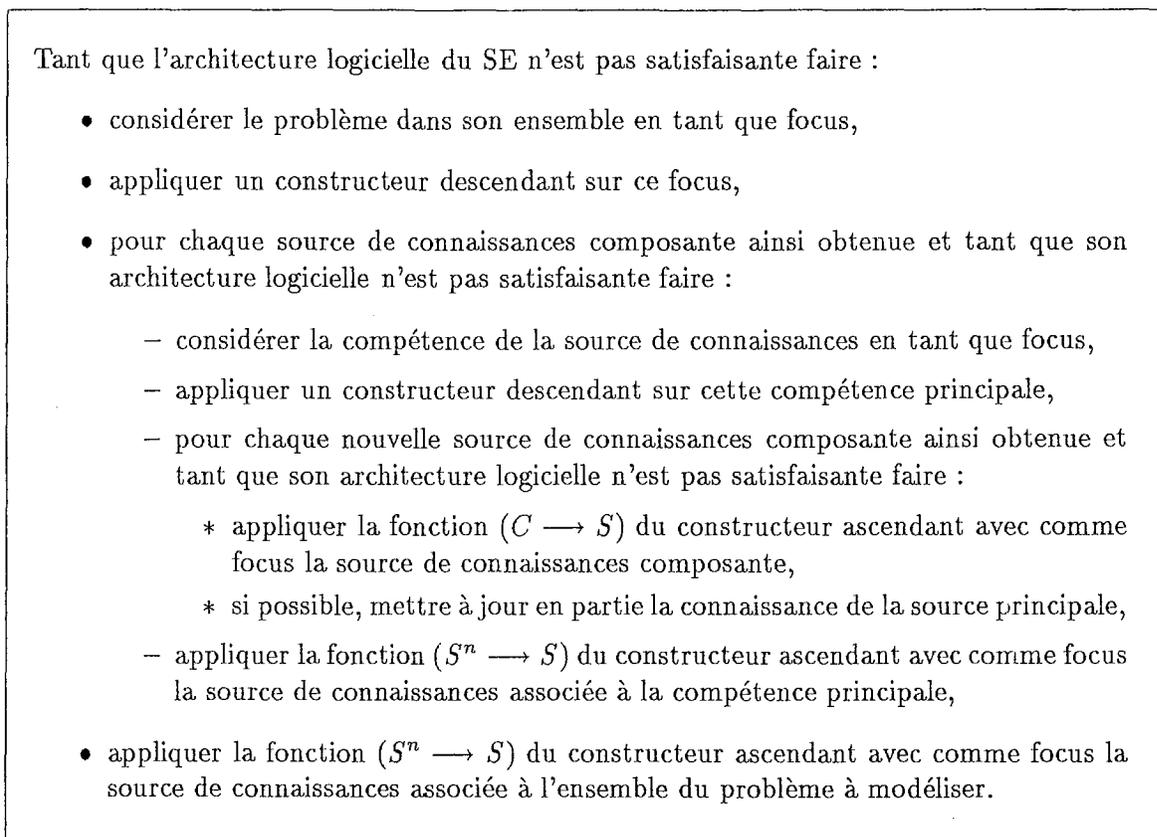


Figure 3.8. La définition des sources de connaissances (forme algorithmique).

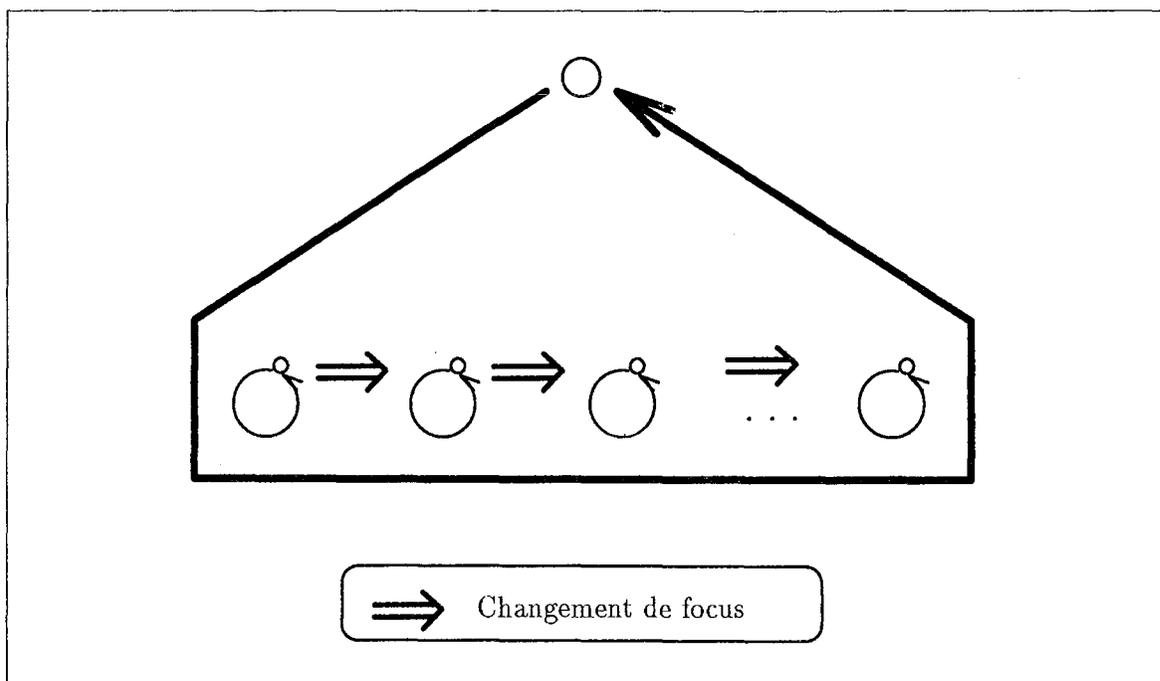


Figure 3.9. La définition des sources de connaissances (forme graphique).

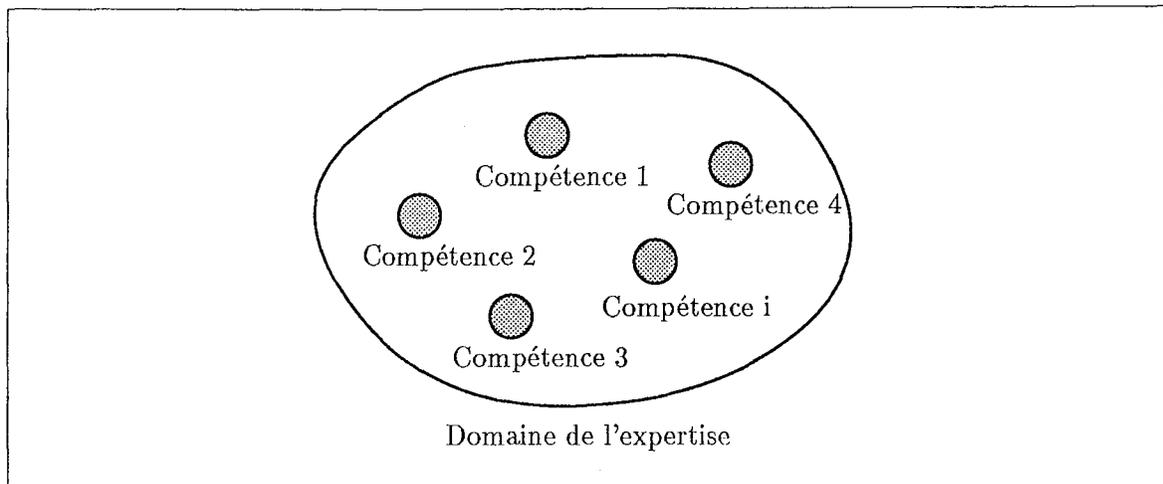


Figure 3.10. Caractérisation du domaine d'expertise.

sources de connaissances étaient identifiées (c'est-à-dire lors du premier mouvement dont nous avons parlé ci-dessus).

Ce schéma fut par la suite enrichi et modifié, voire remis en cause lors de l'application des constructeurs ascendants. Nous avons en effet déjà vu que le fait d'explicitation la connaissance d'une source de connaissances conduit à intervenir sur les blackboards. Ces interventions sont elles-mêmes à l'origine de mise à jour des sources de connaissances et ainsi de suite. Un nouveau cycle entre explicitation des données des blackboards et explicitation des connaissances dans les sources de connaissances vient ainsi se greffer sur l'étape de base du processus de définition de ces sources (cf. figure 3.11).

c - Interaction entre les deux processus : la démarche dans son ensemble

En rassemblant les deux processus que nous venons de décrire, l'ensemble de la démarche de construction de SME (et, au travers, la démarche du processus d'acquisition) apparaît alors. Elle est modélisée sur la figure 3.12.

Nous illustrons l'utilisation de cette méthode sur l'exemple du SE ROSY dans le paragraphe suivant et voyons comment elle a été améliorée.

3.2.3 L'exemple du SE ROSY : amélioration de la méthode

La démarche que nous avons décrite dans la figure 3.8 ne tient pas compte d'un ordre éventuel dans lequel appliquer les constructeurs. Elle se contente de considérer chacune des sources de connaissances identifiées comme focus de ces constructeurs à tour de rôle. C'est également ce que nous avons initialement fait dans le SE ROSY dont nous décrivons ici la construction.

Conformément à cette démarche, nous nous sommes tout d'abord focalisée sur l'en-

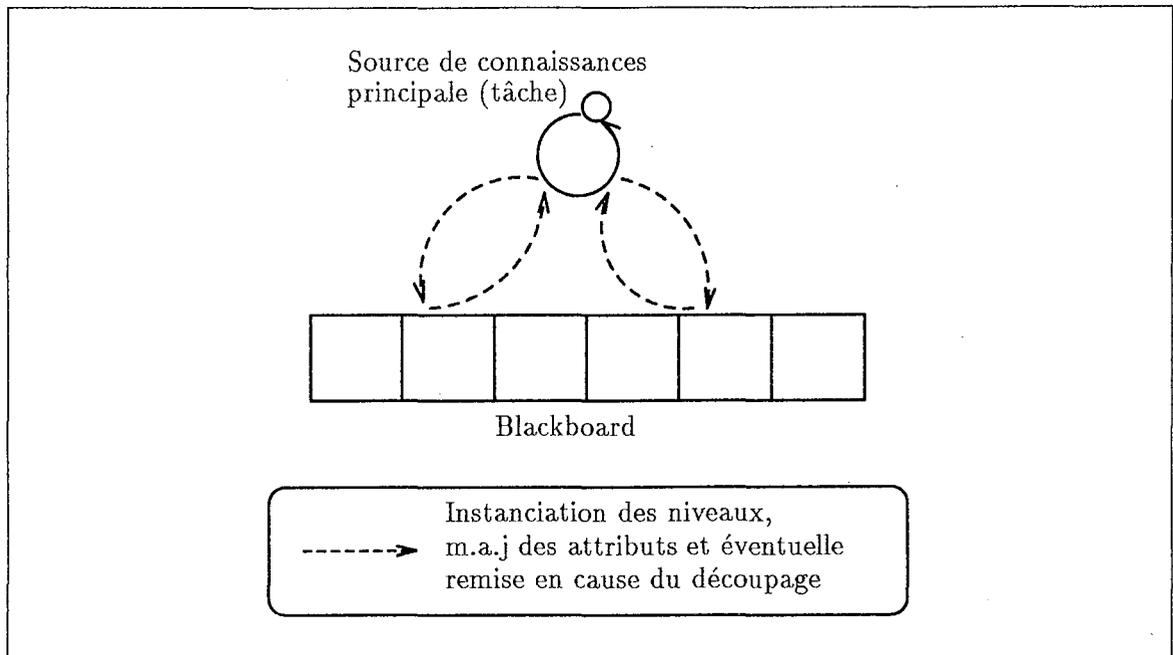


Figure 3.11. Construction des blackboards en interaction avec une étape de base du processus de définition des sources de connaissances.

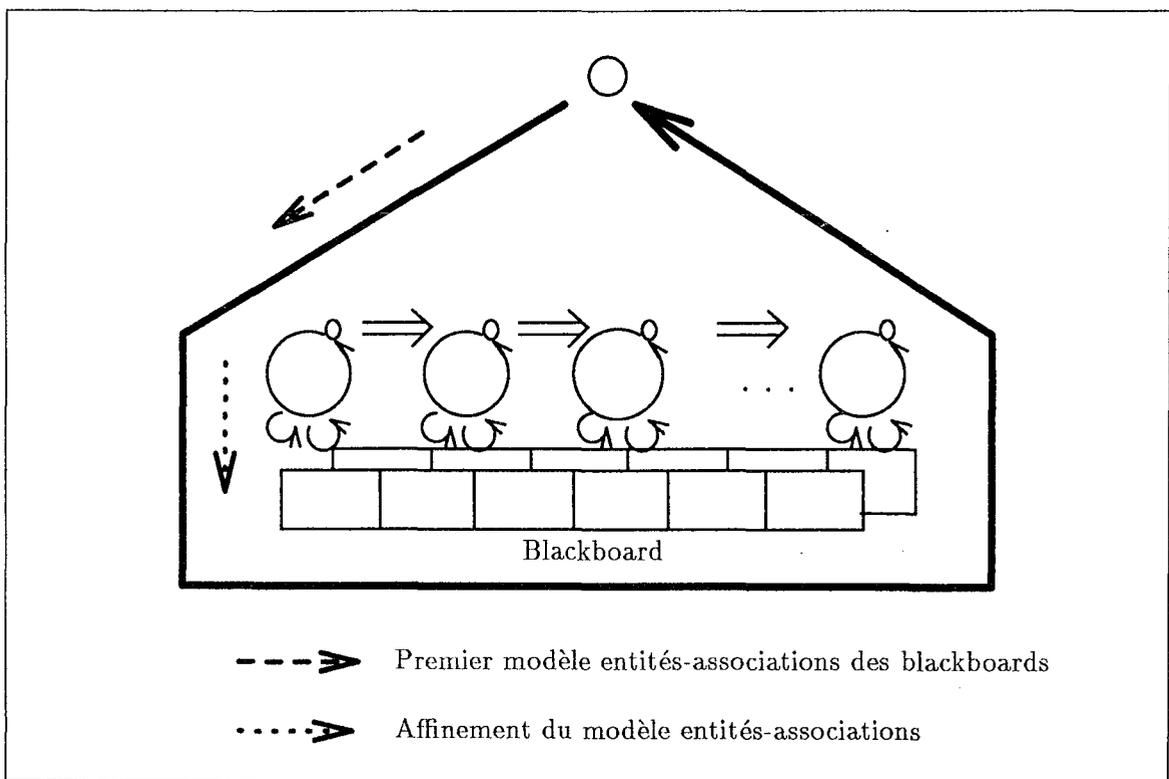


Figure 3.12. Ensemble de la démarche de construction d'une SME multi-niveaux.

semble de l'expertise en voirie urbaine. Après avoir observé l'expert à l'œuvre sur le terrain, il nous fut possible d'appliquer une première fois un constructeur descendant sur l'ensemble de l'expertise. Cela a donné le découpage en tâches que nous avons mentionné au paragraphe 3.2 de la partie II. D'autres applications de ce constructeur sur les tâches d'initialisation et de diagnostic nous conduisirent à un premier découpage de ces tâches en spécialistes. Une phase ascendante fut alors entamée : nous nous focalisons sur une des spécialistes identifiées, envisageons la nature de la connaissance qu'elle était appelée à manipuler et choisissons alors une ou plusieurs techniques d'acquisition adaptées à ces connaissances. L'acquisition de ces connaissances s'engageait alors de façon méthodique, chaque séance ne traitant que des connaissances liées à la spécialiste focus et faisant appel à une technique particulière. Par exemple, les connaissances statiques de la spécialiste *Sp-recherche-causes* (les associations entre causes et dégradations) furent explicitées en compulsant les protocoles verbaux que nous avons recueillis antérieurement ainsi que le petit ouvrage dont nous disposions à ce sujet. À l'inverse, nous eûmes recours aux entretiens centrés et à des observations sur le terrain (les visites) pour ses connaissances dynamiques (les heuristiques permettant d'associer une cause à une dégradation).

Le processus systématique qui s'engageait nous permit de nous rendre compte qu'il fallait choisir judicieusement la spécialiste qui constituait le focus de la première application du constructeur ascendant. Nous avons en effet commencé à acquérir les connaissances de la spécialiste *Sp-recherche-causes* en exploitant totalement l'intérêt de la méthode que nous proposons : le fait de se focaliser sur une compétence, ce qui délimite ainsi parfaitement le champ de vision du processus d'acquisition. Une telle délimitation conduisait à une explicitation exhaustive des connaissances concernées et débouchait malheureusement sur des séances où expert et cognicien en arrivaient presque à oublier que l'acquisition qu'ils entreprenaient faisait partie d'un processus plus général.

C'est là que réside le piège inhérent à une acquisition de connaissances dans de telles conditions de focalisation (le danger que nous avons évoqué pour les entretiens ciblés en 2.3.2, page 123). Afin d'éviter un tel piège, il faut considérer le problème dans son ensemble et limiter les connaissances de la spécialiste à celles qui sont nécessaires pour apporter les conclusions qui vont servir aux autres spécialistes de la même tâche. Il y a une dépendance entre spécialistes au sein d'une tâche, dont il faut tenir compte dans le déroulement du processus d'acquisition. Par exemple, le graphe de ces dépendances pour la tâche *Diagnostic* est celui de la figure 3.13.

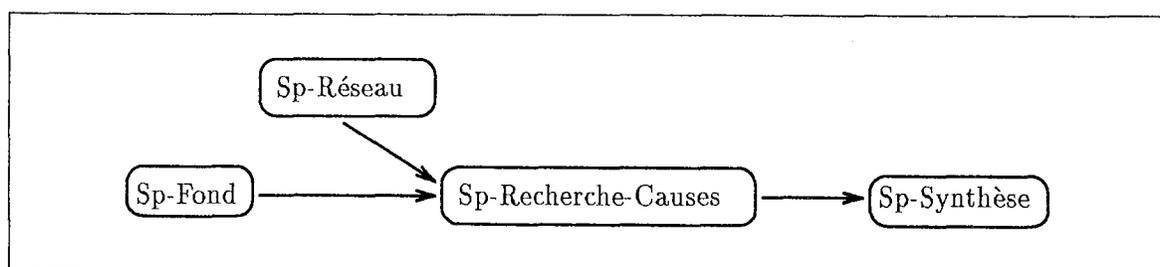


Figure 3.13. Graphe de dépendance entre les spécialistes de la tâche *Diagnostic*.

Nous pensons qu'il faut :

- ou bien commencer par la spécialiste dont aucune autre ne dépend (la spécialiste *Sp-synthèse* dans le cas de la tâche *Diagnostic*) et de poursuivre sur le même modèle le choix des sources de connaissances focus. Il s'agit en fait d'instituer un ordre sur le nombre de dépendances de ces sources de connaissances. La démarche de la figure 3.8 doit alors être révisée en tenant compte de cet ordre. Ce n'est plus :

Pour chaque source de connaissances ainsi obtenue et ... faire ...

mais

Construire une liste contenant les sources de connaissances ainsi obtenues rangées par ordre décroissant du nombre de leurs dépendances.

Pour chaque source de connaissances prise dans cette liste faire ...

Il nous semble que cela permet d'éviter le piège des œillères et rend ainsi le processus d'acquisition plus efficace ;

- ou bien procéder, lors des deux applications du constructeur descendant, à une caractérisation encore plus poussée que celle qui est déjà entreprise en identifiant non seulement les niveaux d'entrée et de sortie des spécialistes mais aussi les instances de ces niveaux, les attributs et valeurs d'attributs constituant précisément ces entrées-sorties. Il doit alors être possible de travailler dans n'importe quel ordre sur les sources de connaissances en prenant garde d'explicitier les connaissances qui vont servir à conclure sur des attributs, niveaux et valeurs d'attributs intervenant en entrée d'une autre source de connaissances.

La première solution est plus contraignante que la seconde puisqu'elle autorise moins de liberté dans le déroulement du processus d'acquisition. Elle le rend cependant plus efficace car, même en faisant une caractérisation aussi détaillée que possible de l'expertise, il est parfois des phénomènes dont le cogniticien ne se rend compte qu'en explicitant la connaissance d'une source de connaissances. C'est notamment le cas pour la tâche *Diagnostic* où une caractérisation est insuffisante.

Aussi proposons-nous en définitive la démarche fondée sur des enchaînements de constructeurs de la figure 3.8 moyennant les modifications que nous venons de mentionner : la prise en compte de l'ordre de dépendance des sources de connaissances dans le choix des focus, influant ainsi sur la planification du processus d'acquisition.

3.3 Le modèle de l'expertise au travers de la méthode

Selon la classification proposée par J.-P. David et J.-M. Krivine dans [David et Krivine 91], la démarche que nous proposons entre dans la catégorie des

méthodes d'aide à l'instanciation de modèles cognitifs, en l'occurrence le modèle ayant donné lieu à l'architecture multi-agents multi-niveaux du blackboard de ATOME. Elle comporte cependant implicitement un aspect aide à la construction du modèle de l'expertise. En effet, avant de passer à la réalisation pratique, il y a tout d'abord une phase de construction du modèle de l'expertise suivant le même principe que celui décrit précédemment (applications itératives de constructeurs), même si ce modèle n'est pas représenté selon un formalisme rigide donné. La modélisation informatique suit et ne permet que de reproduire partiellement ce modèle ou de l'adapter. Outre les informations des blackboards qui, de même que toute base de données, ne peuvent que représenter des points de vue sur des objets du monde réel, les principales différences résident dans la représentation des relations au sein d'un même niveau d'abstraction ou entre deux niveaux d'abstraction. Nous en traitons dans la première partie de ce paragraphe et voyons comment ces relations pourraient être mieux prises en compte dans le cadre de l'architecture multi-agents multi-niveaux de ATOME. Nous voyons enfin comment la méthode que nous proposons pourrait intégrer de façon explicite le modèle de l'expertise.

3.3.1 Modèle de l'expertise vs modèle informatique

Bien que semblant le mieux adapté à la structuration du problème, ATOME ne nous permet pas toujours de reproduire fidèlement le modèle de l'expertise. Si les divers niveaux d'abstraction et le découpage en compétences se retrouvent dans l'architecture proposée par le générateur, il n'en est pas de même :

- de la représentation des données et connaissances au sein des blackboards,
- de la structuration de la connaissance au sein d'une compétence particulière (organisation et exploitation des connaissances dans les sources de connaissances),
- des relations entre ces compétences.

Ces relations correspondent dans le modèle de l'expertise aux diverses phases du raisonnement. Elles ne sont que pressenties lors des deux premières applications du constructeur descendant et sont véritablement explicitées en phase ascendante. Elles se traduisent par des communications qui s'établissent entre compétences, inter-niveaux et intra-niveaux.

Il est possible de traduire les communications inter-niveaux en une représentation équivalente adéquate dans le cadre du modèle actuel proposé dans ATOME, bien qu'il soit parfois difficile de procéder à une telle traduction. Cela correspond aux connaissances de contrôle qui vont lier la stratégie aux tâches (ou une tâche aux spécialistes qui en dépendent) pour ce qui est de l'interaction descendante. La communication ascendante est plus délicate à représenter : elle est à enrichir entre spécialistes et tâches et est actuellement inexistante entre tâches et stratégie³. Les relations intra-niveaux,

3. Il pourrait être possible de considérer les "nœuds importants" des résumés des blackboards comme un moyen de communication depuis le bas de la hiérarchie (spécialistes et, au-delà, tâches) vers la stratégie. Ce lien n'est cependant pas explicite et ne nous semble de ce fait guère convenir.

elles, ne peuvent actuellement être modélisées qu'en les transformant en des relations inter-niveaux (hiérarchiques).

Nous en arrivons là à la dernière réaction de la boucle "acquisition des connaissances - architecture logicielle d'un SME". Cette fois-ci, c'est le modèle de l'expertise qui va rejaillir sur le modèle générique de ATOME en suggérant son évolution. Le modèle de l'expertise en voirie urbaine, mais aussi celui d'autres applications développées avec ATOME, nous a conduit à enrichir les capacités de modélisation des raisonnements et de représentation de la connaissance du générateur (cf. la partie V). Les modifications qui ont été effectuées ou envisagées à court terme respectent la philosophie du modèle : les sources de connaissances n'ont toujours pas conscience de leur existence mutuelle, obligeant ainsi toute communication au sein d'un même niveau d'abstraction à transiter par la voie hiérarchique. Les relations intra-niveaux demeurent interdites et la modification se fait en intervenant sur les communications inter-niveaux (diversification, explicitation, enrichissement, ...). A plus longue échéance, des modifications plus profondes du modèle, allant à l'encontre de cette philosophie, sont à prévoir à condition toutefois que le cogniticien ait à sa disposition des critères de distinction entre relations inter-niveaux et relation intra-niveaux (cf. la partie V, page 266).

3.3.2 Vers une intégration explicite du modèle de l'expertise

Nous avons dit que la méthode que nous proposons supposait la construction du modèle de l'expertise, bien que ce modèle ne soit pas représenté de façon formelle du fait de l'absence d'un mode de représentation intermédiaire formel. Aussi en arrivons-nous assez rapidement à une formalisation informatique ou à présenter à l'expert un modèle de l'expertise dans un formalisme *ad hoc*, dans un but de validation. Il s'agirait ici d'intégrer explicitement et formellement le modèle de l'expertise à la méthode de façon à l'axer davantage sur la construction de ce modèle. Les modèles informatiques n'ont en effet pas toujours les capacités nécessaires à une représentation fidèle du modèle de l'expertise (par exemple, nous avons vu dans le paragraphe précédent les limites de ATOME par rapport au raisonnement dans ROSY). Ils peuvent de plus, de par leur syntaxe, influencer sur ce modèle en le déformant. Aussi semble-t-il préférable à de nombreux auteurs d'introduire une représentation intermédiaire formelle de la connaissance (c'est notamment le cas dans KADS, dans KOD, dans MACAO, ...) avant de passer à une représentation informatique. Il nous semble donc important, dans un avenir proche, d'envisager l'évolution de la méthode de manière à intégrer explicitement la construction du modèle de l'expertise. Cela doit passer par la définition d'un mode de représentation intermédiaire du raisonnement expert.

3.4 Conclusions

La méthode que nous avons présentée fournit un guide pour le développement de SME en le structurant et en indiquant la source de connaissances sur laquelle il faut travailler au moment opportun. Du fait de la boucle que nous avons mise en évidence au paragraphe 3.1, elle fournit également un fil conducteur au cogniticien

pour le processus d'acquisition des connaissances. L'aide apportée est à la fois locale, au niveau de chaque source de connaissances, et globale, sur l'ensemble du processus d'acquisition :

- une aide locale.

Elle provient du focus sur une compétence donnée qui est offert au cogniticien. Ce dernier peut se centrer sur la connaissance associée au focus. Il délimite ainsi la portée de ses investigations.

Rappelons cependant le danger d'un tel focus qui consiste à ne considérer la compétence plus que dans son cadre local et non plus dans le cadre global du SME;

- une aide globale.

La méthode décrite auparavant constitue une "démarche à suivre" pour l'acquisition des connaissances. Le cogniticien découpe en effet le processus d'acquisition à l'image du découpage en sources de connaissances. Il peut planifier ce processus car il peut identifier la compétence sur laquelle se focaliser à tout instant.

Cette démarche a été décrite dans le cadre des systèmes présentant des composantes à la fois multi-niveaux et multi-agents. A la lumière de développements de systèmes à bases de connaissances dans notre laboratoire (comportant de tels composantes mais aussi n'en comportant pas), il nous semble cependant qu'elle est relativement générale et doit pouvoir s'appliquer à la construction de tout système à bases de connaissances. Elle a ici été modelée de façon à être plus adaptée à des systèmes multi-agents multi-niveaux. Il s'agit d'une première réponse à une préoccupation en matière de démarche de modélisation des raisonnements dans les SME, émanant principalement de la communauté scientifique travaillant sur le modèle du blackboard. Les premières directives fournies dans ce domaine par les réalisateurs d'outils tels que BB1, GBB, AGE ou ATOME conseillaient à l'utilisateur une démarche inverse de la nôtre. Il s'agissait de considérer en tout premier lieu les connaissances du domaine, avant de remonter la hiérarchie des divers niveaux d'abstraction. A. Bisseret procède de même dans [Bisseret 88] en proposant une démarche de modélisation des activités de conception à l'aide du modèle du blackboard. Des unités de raisonnement sont tout d'abord identifiées avant d'être regroupées en unités plus larges qui sont elles-mêmes réparties en deux grandes catégories conformément au modèle du blackboard (unités de contrôle et unités du domaine).

Nous procédons différemment en considérant le problème dans son ensemble, puis en le découpant en unités selon deux dimensions : le niveau d'abstraction de leurs connaissances et leur domaine de compétence. Il nous semble que le cogniticien est ainsi doublement guidé dans le processus d'acquisition. De plus, il s'agit d'une façon naturelle d'aborder un domaine inconnu : une personne novice dans un domaine le découvrira tout d'abord globalement avant de prendre conscience de ses détails et de s'y intéresser.

La démarche inclut de plus une phase de *caractérisation* de l'expertise à modéliser, dont l'importance est soulignée dans [Nwana *et al.* 91]. Cette phase correspond au pre-

mier mouvement de la méthode, dont nous avons parlé en 3.2.2 et qui est modélisé par la figure 3.10. Elle comporte notamment l'étape de familiarisation, primordiale pour la construction d'une équipe de travail soudée et tout aussi primordiale pour caractériser le domaine d'expertise. Elle conditionne ainsi doublement la suite du processus d'acquisition.

Les auteurs de [Nwana *et al.* 91] préconisent une démarche de développement de systèmes experts où la caractérisation du domaine est la première phase (cf. figure 3.14). Ils pensent en effet que seule une telle phase peut prendre en compte

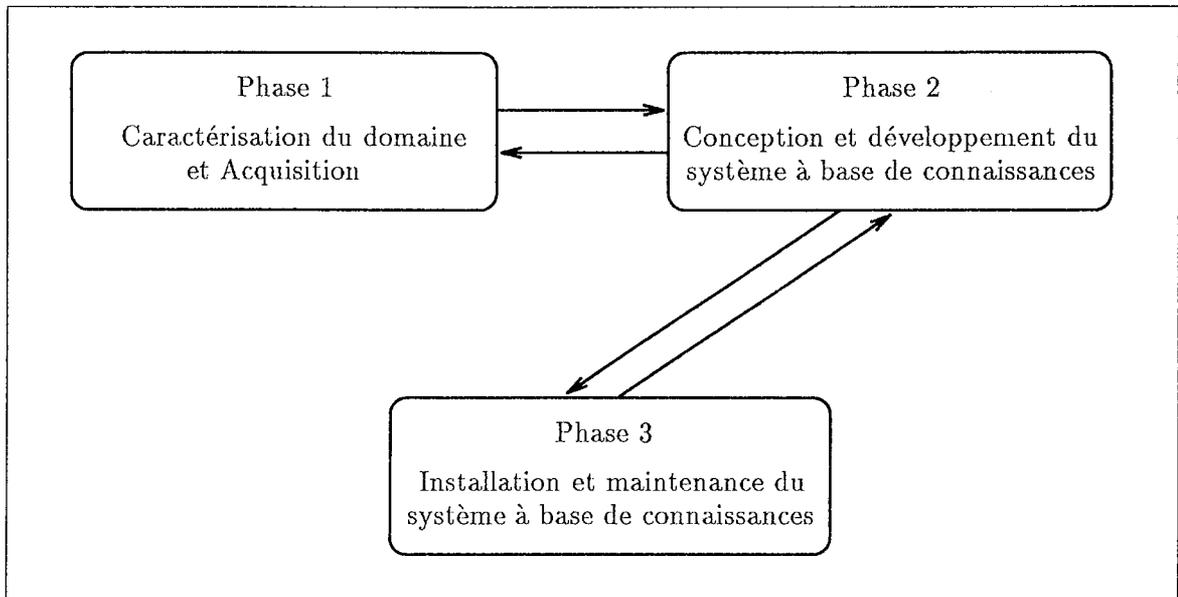


Figure 3.14. Phases de développement d'un système expert selon [Nwana *et al.* 91].

ce qu'ils appellent les problèmes de base du processus d'acquisition, principalement :

1. l'harmonisation des modèles mentaux des experts et des cognitiviciens ;
2. le fait que le cognitivicien soit démuni face à la quantité de connaissances acquises ;
3. le fait que le cognitivicien ne soit que peu guidé pour [Kitto et Boose 89] :
 - identifier une méthode de résolution de problème correspondant à la tâche à modéliser,
 - savoir quelle technique ou outil d'acquisition des connaissances utiliser à quel moment ;

Les outils informatiques d'aide à l'acquisition des connaissances (cf. § 1.2), bien que d'une aide incontestable lorsqu'ils sont utilisés à bon escient, ne leur semblent pas résoudre ces problèmes car ils ne se préoccupent pas de la caractérisation du domaine. Ils fournissent en effet des modèles prédéfinis de méthodes de résolution de problème qui n'ont alors plus qu'à être instanciés pour être adaptés au domaine particulier à

modéliser. Cela suppose que le concepteur d'un SE connaisse *a priori* le modèle sous-jacent à chacun de ces outils pour pouvoir choisir celui qui est adapté au domaine à modéliser. Leur utilisation nécessite donc une caractérisation du domaine au préalable.

Aussi les auteurs se proposent-ils de développer et fournir des techniques permettant d'apporter des réponses aux problèmes évoqués. Ils mentionnent également le fait que c'est la nature du domaine qui doit guider le processus d'acquisition, ce qui est le cas dans la démarche que nous proposons : l'architecture logicielle finale d'un SE et la façon dont la connaissance y est structurée doit émerger de la caractérisation du domaine. Or c'est bien souvent le contraire qui se produit (notamment dans plusieurs des outils informatiques d'aide à l'acquisition).

Nous avons pour notre part répondu en partie aux points 2 et 3. Notre approche du point 1 ne nous semble pas aller dans le sens de [Nwana *et al.* 91] :

- l'harmonisation des modèles (point 1) nous semble être en partie prise en charge par la double validation que nous proposons au paragraphe 2.3.2 dans la technique des entretiens de validation. Cependant, elle n'intervient qu'*a posteriori* alors qu'elle devrait être prise en charge très tôt dans le processus de développement d'un système expert de manière à limiter les distorsions de la connaissance experte. Nous ne traitons donc pas ce problème. L'intégration d'une représentation formelle du modèle de l'expertise permettrait de pallier ce problème en autorisant une validation sur cette représentation, avant même de passer à la modélisation informatique ;
- nous abordons en partie le point 2. La méthode que nous avons définie fournit tout d'abord un guide au cogniticien pour mener le processus d'expertise. Il est ainsi moins hésitant et peut diriger le processus conformément au découpage en sources de connaissances qui a été entrepris et aux dépendances entre ces sources de connaissances. La notion de focus permet également de cibler les connaissances à acquérir. Il est ainsi plus facile de l'organiser et de la structurer au sein d'une même compétence et d'explicitier les interactions entre sources de connaissances. La sensation d'être démuné est ainsi beaucoup moins importante mais pas totalement supprimée. En effet, si l'organisation des connaissances est facilitée, il n'existe toujours pas de démarche systématique que le cogniticien pourrait suivre pour y arriver. Il faudrait alors induire des recherches dans ce sens ou s'inspirer de ce qui est fait par ailleurs dans KADS ou KOD ;
- la méthode proposée facilite le choix d'une technique d'acquisition adaptée à la connaissance à acquérir. Celle-ci étant parfaitement délimitée (que ce soit au niveau de la compétence à laquelle elle est associée qu'au niveau hiérarchique où elle est appliquée), il est aisé d'en déterminer la nature, ce qui conditionne, nous l'avons vu, le choix d'une technique. Un premier guide pour ce choix est fourni par le tableau récapitulatif du paragraphe 2.3.3. Un autre peut également être cité : celui qui apparaît dans [Aussenac 89]. De même, les travaux de W. Visser [Visser 90] visent à décrire l'adéquation entre des méthodes d'acquisition et les connaissances à acquérir, en fonction des traits caractéristiques de ces

connaissances ou du problème à traiter (notamment, le "niveau de l'activité"). Le cogniticien dispose ainsi d'une première aide dans son choix.

Cette aide n'est cependant que partielle et mérite d'être approfondie. Il s'agirait de définir précisément les critères de choix de ces techniques, méthodes et outils d'acquisition et d'élaborer un guide du cogniticien. Cela fait l'objet de nombreuses recherches à l'heure actuelle, notamment dans le cadre national du GRACQ (groupe de recherche en acquisition des connaissances).

Nous n'avons pas traité l'aspect "choix d'une méthode de résolution adaptée au problème à modéliser".

La méthode que nous proposons, même si elle ne résout pas l'ensemble des problèmes soulevés dans [Nwana *et al.* 91] et s'il faut prendre garde au danger inhérent à la notion de focus, nous semble intéressante du fait des aspects organisation et planification du processus d'acquisition qu'elle présente.

Aussi serait-il profitable de la généraliser à tout autre développement de systèmes multi-agents, voire de systèmes experts. La distinction entre les divers niveaux hiérarchiques de ATOME peut être transférée à tout domaine d'expertise du fait de la structuration de la connaissance en niveaux chez l'être humain (cf. § 3.1.1). Ces niveaux seront alors implicites dans d'autres domaines mais existeront. L'aspect multi-agents est plus délicat à simuler. Cependant il nous semble que, dans tout domaine d'expertise, il est au moins possible de découper le problème à traiter en sous-problèmes. A partir du moment où un tel découpage peut être entrepris, la méthode que nous avons décrite est applicable (les composantes multi-experts et multi-niveaux sont réunies). Un tel découpage en sous-problèmes et la prise en compte de trois niveaux d'abstraction sémantique de la connaissance sont d'ailleurs à l'origine d'une méthode générale d'acquisition proposée dans [Choulet *et al.* 91]. Tout développement de systèmes experts ou multi-experts nous semble alors pouvoir bénéficier des qualités de la méthode proposée, tout au moins pour les systèmes d'aide à la décision.

4

Conclusion

Cette partie a présenté notre expérience en acquisition des connaissances dans le cadre du développement du système ROSY.

Nous y avons tout d'abord décrit les difficultés particulières que nous avons rencontrées, principalement l'acquisition de données visuelles. Ensuite, nous avons insisté sur l'étape de familiarisation des connaissances qui, nous semble-t-il, conditionne l'ensemble du processus d'acquisition. C'est en effet au cours de cette étape que s'établissent les relations entre cognitif et expert et leur bonne qualité est une condition *sine qua non* pour que la réalisation d'un système expert ait une chance d'aboutir. La présentation des techniques particulières que nous avons utilisées a suivi. Elles s'orientent essentiellement vers la composante visuelle de l'expertise. Nous avons montré les intérêts et les dangers de chacune et avons mis en évidence le type de connaissances qu'elles permettent d'acquérir. Tout cognitif en charge de la réalisation d'un système expert où l'expertise est à caractère visuel pourra ainsi s'en inspirer. Nous avons alors présenté les conclusions que nous avons tirées de cette expérience, provenant aussi bien des succès que des erreurs commises. Il s'agit principalement :

- d'émettre des propositions, quant à la formalisation de l'expertise, issues de l'analyse des connaissances acquises. Ces propositions seront alors soumises à l'expert pour être validées avant et après codage ;
- d'adapter les techniques d'acquisition aux connaissances à acquérir mais aussi à l'expert lui-même ;
- de ne pas rejeter l'acquisition des connaissances à partir de raisonnements sur des cas particuliers. Nous avons en effet montré que, contrairement à nos premières impressions, il était intéressant d'essayer d'acquérir des connaissances à partir de tels cas ;
- de ne pas imposer à l'expert des connaissances dont il ne serait pas à l'origine, qu'il ne se serait pas appropriées.

Deux autres éléments ressortent de cette expérience : le besoin de planification du processus d'acquisition et le fait que le cognitif se sent démuné face à la quantité impressionnante de connaissances qu'il lui faut structurer et organiser. Cela nous a conduit à élaborer une méthode de développement de système expert et d'acquisition

des connaissances dans le cadre des systèmes multi-experts hiérarchiques. Nous avons montré qu'il y avait interaction entre l'acquisition de connaissances et l'élaboration de l'architecture logicielle de tels systèmes, ce qui a composé le principe de base de la méthode proposée. Elle fait appel aux notions de constructeurs descendants et ascendants, définis dans cette partie. La construction des sources de connaissances est alors le résultat d'une application itérative de ces constructeurs sur un focus donné (une compétence) : il s'agit tout d'abord de décomposer une source de connaissances en sources de connaissances dépendantes puis d'identifier les connaissances de chacune des sources dépendantes avant de revenir à la source principale. Ce processus est appliqué sur chaque source de connaissances identifiée en tenant compte de l'ordre fourni par le graphe de dépendance des diverses sources de connaissances. Les blackboards sont construits en parallèle et enrichis au fur et à mesure que les sources de connaissances sont complétées. Il y a, là encore, interaction entre la construction des blackboards et la construction des sources de connaissances.

Nous avons montré que cette méthode comporte une phase préalable de caractérisation du domaine expert, qui est nécessaire à tout développement de système expert. Elle fournit de plus une réponse aux problèmes de planification et de sensation d'être démunis évoqués précédemment. Elle présente en effet l'avantage de guider le cognitif dans le processus d'acquisition en lui indiquant à tout instant les connaissances à acquérir. Celui-ci est alors à même de choisir à bon escient une technique d'acquisition adaptée. L'étude menée sur les techniques d'acquisition vient ici compléter la méthode.

Aussi nous semble-t-elle un bon outil pour tout cognitif, non seulement dans le cadre des systèmes multi-agents hiérarchiques mais aussi dans celui de tout système expert dans le domaine de la prise de décision. Elle gagnerait cependant à être complétée par des techniques ou des modèles facilitant la formalisation des connaissances au sein d'une source de connaissances, ainsi que par la prise en compte, de façon explicite, de la phase de construction du modèle de l'expertise.

PARTIE IV

Le problème des connaissances à traiter

Cette partie traite des connaissances et données particulières que nous avons eu à modéliser dans le SE ROSY, principalement les données visuelles (qui font l'objet du premier chapitre) et les connaissances graduelles (objet du second chapitre). Il s'agit de recenser et d'analyser les problèmes que nous avons rencontrés dans leur modélisation, de voir comment ces données et connaissances sont actuellement représentées et d'envisager les évolutions possibles des modes de représentation disponibles dans ATOME. Nous y abordons notamment les notions de point de vue, de hiérarchie et de classification dans les blackboards, de raisonnement à profondeur variable et de règle graduelle.

Ce qui est présenté ne se limite nullement aux cas particuliers de ATOME et de ROSY. Les connaissances qui sont ici évoquées, qu'il s'agisse de données visuelles ou de connaissances graduelles, peuvent en effet être présentes dans de nombreuses applications et quel que soit le générateur de SE utilisé. Les évolutions envisagées sur les blackboards peuvent également être généralisées à toute structure de données distinguant des catégories d'objets (qui sont alors l'équivalent des niveaux de ATOME).

1

Le problème des données visuelles

L'expertise en voirie urbaine est fondée sur l'observation visuelle de chaussées. Le premier problème posé par le développement du SE ROSY fut donc la représentation des informations visuelles que l'expert captait pour prendre une décision quant au mode de réfection. Il nous fallut dans un premier temps identifier ces informations, ce qui est du domaine du processus d'acquisition (cf. la partie III), puis les modéliser dans le cadre des modes de représentation fournis par ATOME.

Ce chapitre aborde le problème de la représentation de ces informations. Nous décrivons tout d'abord les difficultés que nous avons rencontrées dans la tâche de modélisation. Outre le fait que ces informations sont intrinsèquement difficiles à modéliser, ces problèmes émanent de l'absence de la notion de "niveau de description" (ou "point de vue") dans ATOME. Nous voyons comment nous avons tenté de simuler une telle notion à l'aide de la représentation actuelle des blackboards puis nous envisageons des modifications qui permettraient de l'intégrer totalement.

1.1 Représentation de données visuelles

La modélisation des dégradations apparaissant sur une chaussée fait ici office d'exemple. Nous présentons les problèmes que nous avons rencontrés à travers l'exemple des représentations successives choisies pour ce concept. Certains de ces problèmes proviennent du compromis que nous avons essayé de réaliser entre les deux critères présentés au premier paragraphe. D'autres ont une même origine plus profonde, que nous détaillons au troisième paragraphe, après avoir décrit les diverses représentations que nous avons envisagées pour les dégradations avant d'en arriver à la représentation actuelle.

1.1.1 Un compromis entre quantité et représentativité

Lors de toute élaboration de la représentation des dégradations sur le terrain, nous avons toujours essayé de réaliser un compromis équitable entre la quantité d'informations qu'il aurait fallu saisir pour alimenter cette représentation et sa représentativité. Le problème de la quantité d'informations à saisir a déjà été évoqué dans la partie II,

en 4.1.1 : il s'agit de limiter cette quantité de manière à ce que le relevé de dégradations ne soit pas trop long ni trop éprouvant.

Celui de la représentativité va plutôt dans le sens contraire : il s'agit d'avoir des informations suffisantes pour que l'expert lui-même puisse raisonner à partir de ces informations. Il inclut de plus le fait que le but poursuivi dans le SE ROSY est de rationaliser un processus de décision. Cela nous a conduit à élaborer des représentations assez détaillées, favorisant ainsi le critère de représentativité au détriment de celui de quantité.

Nous avons essayé de maintenir un tel compromis dans les représentations successives, ce qui a provoqué certaines des difficultés que nous évoquons au paragraphe suivant. Nous pouvons y constater que, si nous nous préoccupions essentiellement au départ de la quantité, la tendance s'est inversée.

1.1.2 Les représentations successives des dégradations

a - Un unique représentant par dégradation

La première des représentations pour laquelle nous avons opté consistait à n'avoir qu'un représentant par dégradation et par chaussée. Il regroupait ainsi l'ensemble des instances¹ d'une même dégradation sur la chaussée. Il n'y avait donc qu'un seul niveau de description des dégradations qui reprenait *grosso modo* les attributs du niveau *Dégradations_sur_tronçon* actuel.

Cette représentation était séduisante par son aspect "vue d'ensemble sur une dégradation" bien qu'elle ait eu tendance à mêler des attributs qui s'attachaient pour certains à décrire globalement la dégradation, pour d'autres à une description détaillée de l'ensemble des instances qui composaient cet unique représentant (des confusions entre valeurs de ces attributs étaient alors possibles). Du point de vue de la quantité d'informations, elle était optimale. En revanche, sa représentativité laissait à désirer. Il n'était par exemple pas possible de distinguer entre des instances importantes (des blocs physiques) de dégradation (cf. la figure 3.6 de la partie II) alors que l'expert le faisait dans son raisonnement. Les valeurs des divers attributs étaient par ailleurs difficiles à évaluer pour la personne qui effectuait le relevé de dégradations. Faciliter les relevés de dégradations était un critère que nous n'avions initialement pas retenu. Il s'est imposé lorsqu'il a fallu entreprendre de tels relevés.

b - Un représentant par pas de dix mètres et fusion systématique

Nous avons alors opté pour une représentation à deux niveaux. Il s'agissait de représenter les instances de dégradation par pas de dix mètres (pour faciliter le relevé) puis de fusionner systématiquement tous les représentants (nœuds du blackboard) ainsi

1. Une mise au point quant au vocabulaire employé nous semble ici nécessaire. Une dégradation correspond à un des concepts-dégradations de la représentation actuelle (cf. la partie II, 3.1.2). Par exemple, les nids de poule, les affaissements, le désenrobage, ... Une instance de dégradation est une dégradation concrète, telle qu'on la trouve sur le terrain (c'est le nid de poule qui se trouve sous le stationnement, le désenrobage sur une portion de chaussée, l'affaissement sur une fouille, ...).

obtenus. La quantité d'informations était ainsi toujours très raisonnable. La fusion tenait alors compte des blocs physiques de dégradations et en faisait des représentations à part. L'aspect "vue d'ensemble" sur une dégradation avait été réduit et comportait les mêmes inconvénients que ceux évoqués précédemment.

Hormis ces blocs qui formaient alors des entités homogènes, le résultat de la fusion nous conduisait à traiter uniformément des objets qui n'étaient pas homogènes. Au fur et à mesure de l'acquisition de l'expertise, nous nous étions en effet rendu compte que les diverses instances d'une même dégradation sur une chaussée devaient être considérées de façon indépendante. Par exemple, deux instances situées à quelques mètres d'intervalle peuvent parfaitement avoir des causes et des origines différentes. Aussi fallait-il les dissocier pour mettre en valeur les caractéristiques de chacune et pouvoir ainsi déterminer des informations conditionnant le diagnostic.

Le critère de quantité et une connaissance du domaine de l'expertise encore insuffisante nous avaient ainsi conduite à négliger les spécificités de chaque instance de dégradation. Cela avait entraîné des erreurs dans les raisonnements que le SE tenait puisque nous considérions comme valables pour l'ensemble du nœud dégradation des informations qui ne concernaient qu'une partie des instances le composant.

c - Les blocs homogènes de dégradations

Le concept de "bloc homogène" de dégradations fut alors envisagé, s'inspirant de celui de "bloc physique" dont nous avons parlé ci-dessus. L'idée était alors de revenir à un unique niveau de représentation (le niveau par pas de dix mètres ne servant pas au raisonnement, sa suppression ne portait pas à conséquence). Chaque nœud de ce niveau aurait permis de décrire tout un ensemble d'instances de dégradation que le releveur aurait jugées homogènes. Il nous semblait en effet qu'une personne sur le terrain pouvait apprécier la situation *de visu* et faire les regroupements opportuns. La réalisation de cette idée ne vit jamais le jour, la notion de "bloc homogène" semblant trop abstraite à l'expert-releveur lors du relevé. Elle nécessitait de plus une définition stricte des regroupements possibles, pour éviter les écarts d'appréciation d'un releveur à l'autre.

d - La représentation actuelle

La représentation qui est dans la version actuelle de ROSY est un compromis entre les représentations 2 et 3. Elle reprend les deux niveaux de descriptions, le niveau *Dégradations sur 10 mètres* pouvant maintenant être utilisé dans le raisonnement. La notion de "bloc homogène" est également présente et nous avons défini des critères de fusion pour construire automatiquement ces blocs.

1.1.3 Des données de différents niveaux

Ce qui ressort principalement de l'évolution de cette représentation est une préoccupation à distinguer les diverses entités selon leurs caractéristiques propres pour

pouvoir ensuite les regrouper de façon homogène. Il s'agit ainsi de créer, à partir de données de base (ici les instances de dégradation issues du relevé), des représentations intermédiaires correspondant à diverses façons d'observer les dégradations sur une chaussée. Nous avons notamment parlé de vue d'ensemble sur une dégradation, de vue sur un bloc physique, de vue sur des blocs homogènes, de vue sur une instance de dégradation, ...

Ces diverses représentations correspondent à une réalité cognitive : la capacité de l'expert à raisonner sur plusieurs points de vue simultanément, en passant de l'un à l'autre en fonction des résultats courants de son raisonnement. Suivant ce qu'il cherche à déterminer, l'expert ne porte pas le même regard sur la chaussée : il regarde les affaissements sur l'ensemble de la chaussée, les affaissements en rive ou l'affaissement particulier qui se trouve à ses côtés ; il identifie plusieurs zones selon leur concentration en dégradations ; il "résume" une dégradation qu'il voit, n'en retenant alors que les éléments essentiels et laissant de côté les instances qui lui paraissent sans gravité ou insignifiantes ; etc. Il considère ainsi, au fur et à mesure de son raisonnement et de ses besoins, des représentations à différents niveaux d'abstraction qui correspondent à autant de points de vue. Cela revient à construire des niveaux de descriptions différents pour un même concept et à les organiser en une ou plusieurs hiérarchies, aboutissant sur les mêmes feuilles (les instances de dégradation issues du relevé dans notre exemple). Un exemple de conjonction de telles hiérarchies est présenté sur la figure 1.1.

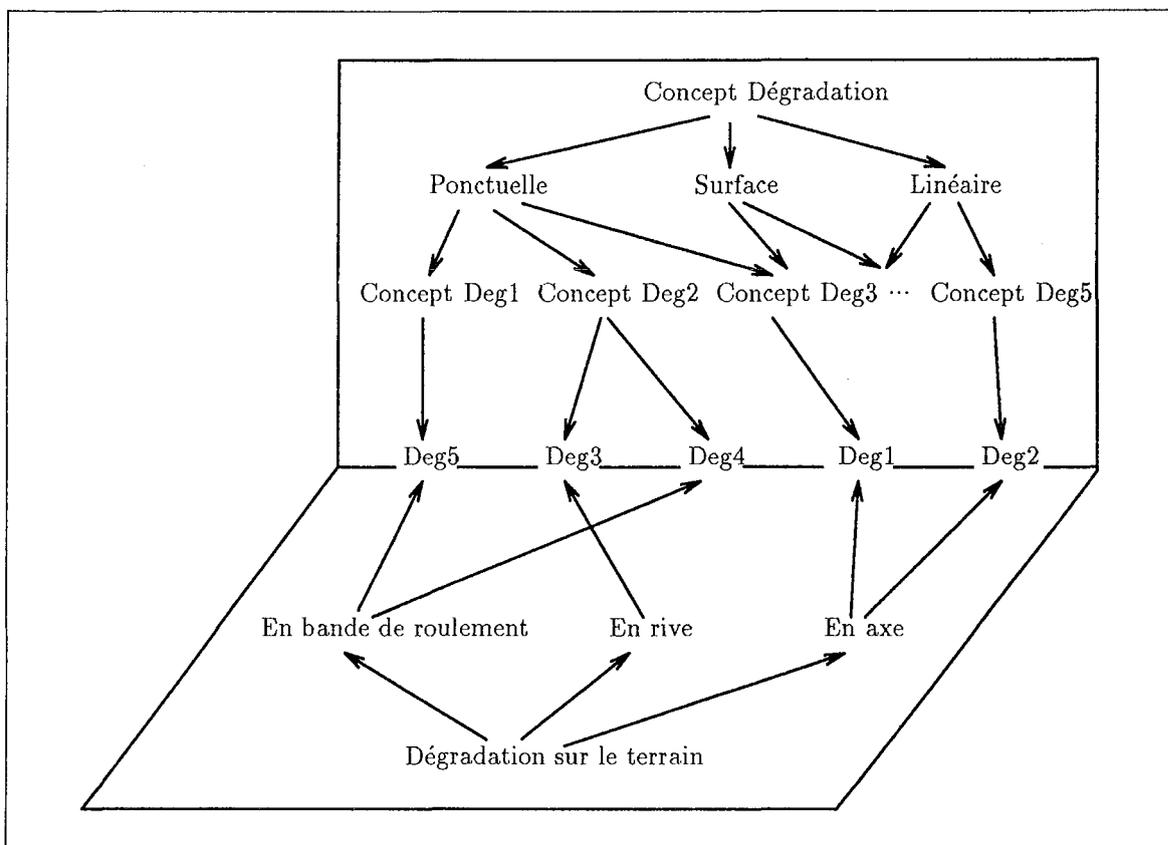


Figure 1.1. Exemple de niveaux de description organisés dans des hiérarchies.

Les instances de dégradation sont ici organisées en deux hiérarchies selon leur situation sur la chaussée (axe / rive / bande de roulement) d'une part et la dégradation-concept qu'ellesinstancient d'autre part.

1.2 Hiérarchisation et point de vue

D'après ce qui précède, représenter les données visuelles intervenant dans l'expertise en voirie urbaine consiste à mettre en place la notion de point de vue (qui se rapproche ici de celle qui est définie dans [Mariño 91]) à travers des hiérarchies de nœuds. Ce paragraphe présente tout d'abord les caractéristiques des modes de représentation à mettre en place pour modéliser cette notion. Il décrit ensuite la façon dont nous avons essayé de la prendre en compte dans le cadre du SE ROSY, les limites de cette modélisation et une façon de l'intégrer définitivement dans les blackboards. De nouvelles possibilités de modélisation de raisonnement pourraient alors s'offrir au cognicien.

1.2.1 Modes de représentation à mettre en place

Modéliser la notion de point de vue suppose de prendre en compte les fonctionnalités suivantes :

- la variété des points de vue et le fait que tous partagent des données de base communes (les dégradations relevées sur le terrain) ;
- la construction d'une description au cours du raisonnement, en fonction de l'orientation que celui-ci prend. Il s'agit d'instancier une structure correspondant à un point de vue pour une dégradation particulière, la structure ayant été définie au préalable ;
- la manipulation globale des nœuds représentant des dégradations vues sous le même angle (selon le même point de vue). Il doit en effet être possible d'identifier aisément toutes les dégradations qui se trouvent en rive ou toutes celles qui font partie d'une même portion de chaussée.

Il s'agit de construire des hiérarchies d'objets qui coexistent, chaque niveau dans une hiérarchie correspondant à un point de vue. De nombreuses classifications de ces objets seraient alors envisageables et leur manipulation globale aisée. L'utilisation d'un mécanisme d'héritage et de facettes du type "si-besoin" attachées aux attributs des objets faciliterait alors la construction d'une description à un niveau donné. Nous revenons sur les intérêts d'une telle représentation au paragraphe 1.2.3 en montrant comment il est possible de l'intégrer dans les blackboards de ATOME. Auparavant, nous voyons comment les fonctionnalités ci-dessus sont prises en compte dans la représentation actuelle des dégradations dans les blackboards.

1.2.2 Simulation de ces modes dans ROSY

La représentation actuelle du blackboard *Dégradations* comporte trois niveaux. Une hiérarchie implicite entre ces niveaux peut alors être considérée (cf. la figure 1.2) :

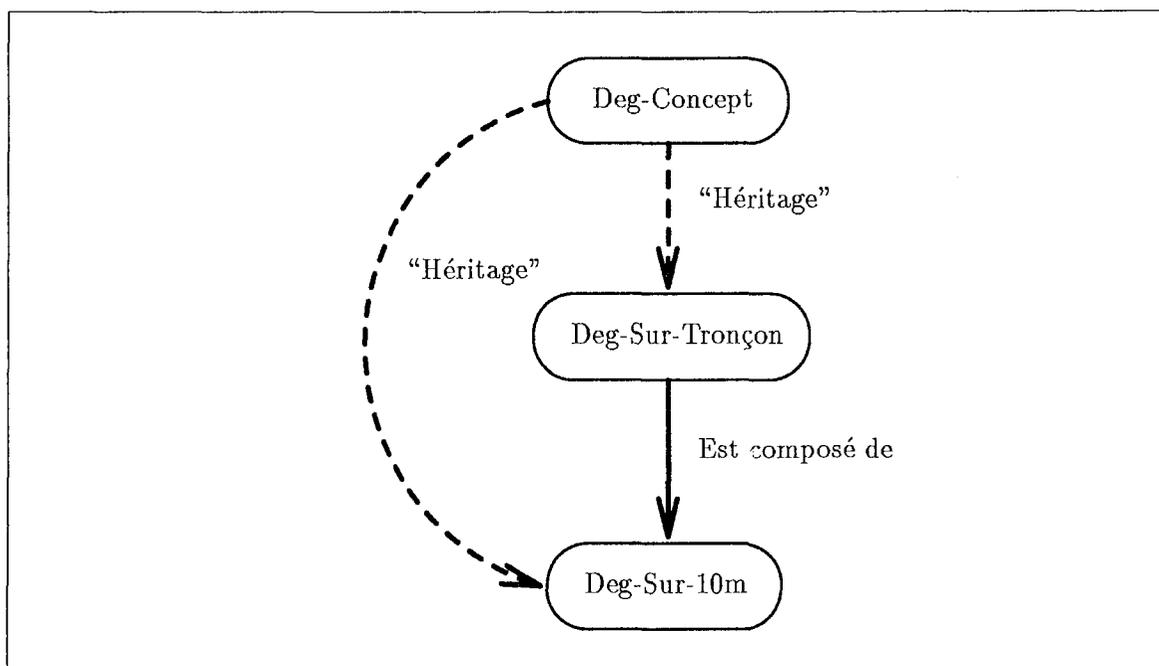


Figure 1.2. Hiérarchie implicite dans les niveaux du blackboard *Dégradations*.

- le niveau *Concept_Dégradation* (cf. la figure 3.4, partie II) peut être vu comme le point d'entrée dans la hiérarchie. Il est la classe principale à partir de laquelle toutes les autres vont être créées ;
- le niveau *Dégradations_sur_tronçon* (cf. l'annexe A.2.3) a été défini en ajoutant à la structure du niveau précédent des attributs qui lui sont propres et qui caractérisent une dégradation sur le terrain. Il y a en quelque sorte eu héritage de propriété (les attributs et les liens) d'un niveau à l'autre ainsi qu'héritage de certaines valeurs d'attributs des instances du premier niveau aux instances du second (par exemple, l'attribut *Causes_probables*) ;
- le niveau *Dégradations_sur_10_mètres* (cf. l'annexe A.2.4) "hérite" lui aussi du niveau *Concept_Dégradation*. Il est de plus lié au précédent par une relation de composition (les nœuds du précédent proviennent de la fusion des nœuds de ce niveau (cf. la partie II, 3.2.2)).

Nous avons ainsi une représentation dans laquelle les liens entre les niveaux concrétisent la notion de hiérarchie et les deux derniers niveaux donnent des visions différentes des dégradations sur la chaussée. Des raisonnements peuvent alors être menés sur ces deux niveaux, bien que la tâche *Diagnostic* ne considère pour l'instant pratiquement

que le niveau *Dégradations_sur_tronçon*. Il est de plus possible de considérer que le processus de fusion correspond à la construction d'une description, ce qui est la seconde fonctionnalité envisagée au paragraphe précédent. Enfin, nous n'avons retenu que deux niveaux de description différents, dont l'un est *a fortiori* inclus dans l'autre par le processus de fusion, de façon à permettre une manipulation globale de l'entité "dégradation sur le terrain" sur laquelle la tâche *Diagnostic* raisonne.

Cependant plusieurs inconvénients apparaissent dans cette hiérarchie. Tout d'abord, l'héritage dont nous avons parlé ci-dessus est artificiel. ATOME ne gère pas de tel mécanismes. Il n'y a pas d'outils permettant de faciliter le passage d'attributs ou de valeurs d'attributs d'un niveau à l'autre. C'est au cogniticien que revient la tâche de construire des descriptions redondantes de niveaux et de simuler ensuite un héritage de valeurs. Il lui faut explicitement créer des spécialistes dont le travail consiste en cette simulation. C'est par exemple le cas des spécialistes de la tâche d'initialisation qui sont chargées de cette simulation en plus de leur tâche première (l'alimentation des blackboards avec les descriptions contenues dans les relevés de dégradations). De même, la construction d'une description, qui transparait dans le processus de fusion et qui consiste en fait à traduire les données d'un niveau à l'autre, fait appel à une spécialiste particulière. C'est encore une fois le cogniticien qui doit explicitement et de façon préalable au raisonnement préparer les données qui serviront au cours du raisonnement.

La différence avec la démarche experte et l'idée première que nous avons de la construction de telles descriptions apparaît ici. Alors que l'expert construit des descriptions au cours de son raisonnement en fonction de ses besoins, l'absence de mécanismes d'héritage et de traduction automatique oblige le cogniticien :

- d'une part à préparer *a priori* toutes les descriptions qui sont susceptibles de servir,
- d'autre part à mobiliser des spécialistes dont les travaux potentiels se résumeront à la traduction d'un point de vue à un autre et à la simulation de l'héritage.

Sans une telle préparation, le raisonnement d'une spécialiste qui a recours à plusieurs descriptions, dont certaines non construites *a priori*, ne pourra pas se dérouler correctement. Ou alors la spécialiste devra s'interrompre et faire appel à une des spécialistes de traduction pour ensuite reprendre le cours de son raisonnement, ce qui pose les problèmes de l'arrêt et de la reprise du raisonnement dans une spécialiste (cf. la partie V, § 3.4). Il nous semble donc plus opportun d'ajouter à ATOME des mécanismes automatiques d'héritage et de traduction, permettant la construction (au sens de l'instanciation d'un niveau prédéfini) d'une description selon un point de vue donné.

De plus, la hiérarchie de la figure 1.2 ne distingue que deux points de vue, ce qui crée des problèmes de manipulation et de pertinence des attributs dans les descriptions des niveaux des blackboards. En effet, si dans un premier temps elle facilite la manipulation globale des dégradations sur le terrain (cela explique que nous avons toujours envisagé des représentations où seuls un ou deux de ces points de vue coexistaient), ces entités sont alors les seules qui soient manipulables globalement de façon

aisée. Cela provient du fait que cette hiérarchie ne représente pas toute la richesse des classifications qu'il est possible de créer et dont il est intéressant de disposer au cours du raisonnement. L'introduction de ces classifications autoriserait une manipulation aisée de tout groupe de dégradations ayant des caractéristiques communes. Elle permettrait de plus d'enrichir le raisonnement que nous avons modélisé dans la version actuelle du SE ROSY en le diversifiant. Par exemple, il serait possible de raisonner sur un résumé des dégradations en créant un niveau correspondant.

L'autre problème qui a été évoqué est celui de la pertinence. Les dégradations ont en effet toutes la même description. Certains des attributs définis sont alors pertinents pour une dégradation et pas pour une autre. L'attribut *Périodicité spatiale* est un exemple de cette situation : il n'est en effet valable que pour les fissures transversales. L'expert est ainsi un peu perdu lorsqu'une telle représentation lui est présentée et encore plus lorsqu'il doit l'utiliser pour effectuer des relevés de dégradations. Il ne cesse alors de demander au cognitif si tel attribut est à mentionner, si tel autre doit l'être. Une conséquence plus grave est de ne pas pouvoir adapter la représentation d'un attribut à chaque type de dégradation. Il est par exemple possible de distinguer entre des dégradations ponctuelles, surfaciques ou linéaires. Cela supposerait que l'étendue d'une dégradation soit définie selon la mesure correspondant à son type (respectivement, quantité, mètres carrés ou mètres linéaires). Du fait de la représentation unique, tout est mesuré en surface, ce qui suppose d'adapter cette mesure pour une dégradation linéaire ou ponctuelle.

Aussi nous semble-t-il important d'intégrer dans ATOME des mécanismes permettant de prendre explicitement en compte la notion de point de vue. Le découpage en niveaux des blackboards permet de le faire implicitement mais l'absence de tels mécanismes rend la tâche complexe et le résultat obtenu comporte des inconvénients. Nous voyons donc, dans ce qui suit, comment ATOME pourrait être modifié de façon à inclure cette notion plutôt que de continuer à la simuler.

1.2.3 Intégration de ces modes dans les blackboards

Intégrer la notion de point de vue dans ATOME revient à définir des mécanismes de construction de hiérarchie, d'héritage et de traduction tout en tenant compte des fonctionnalités que nous avons évoquées au paragraphe 1.2.1. Nous considérons tout d'abord le problème de la hiérarchie.

a - Modélisation des hiérarchies

Une première solution pour reproduire les hiérarchies et classifications dont nous avons parlé auparavant consisterait à diviser le blackboard en autant de niveaux que les hiérarchies en comportent. Des liens seraient alors établis entre ces niveaux de manière à représenter la hiérarchie. C'est le principe que nous avons suivi pour définir l'architecture actuelle du blackboard DÉGRADATIONS. Cette solution, si elle présente l'avantage d'enrichir les points de vue disponibles, pose toujours le problème des hié-

rarchies implicites. De plus, elle complique considérablement la manipulation d'un ensemble homogène de dégradations. Elle suppose en effet de définir des niveaux indépendants. Les nœuds vont alors être répartis dans les divers niveaux correspondant aux diverses classes d'objets. Il faudra parcourir tous les niveaux susceptibles de contenir les objets recherchés alors qu'il suffit d'extraire la branche correspondant au critère de recherche dans une hiérarchie.

Aussi pensons-nous qu'il est préférable de songer à construire une hiérarchie au sein même de chacun des niveaux d'un blackboard (cf. la figure 1.3). Il s'agirait de créer des niveaux dans les niveaux eux-mêmes, donnant ainsi aux blackboards non plus une dimension ($n \times 1$) mais une dimension ($n \times m$).

La notion d'entité homogène manipulable est alors sauvée. De plus, elle est étendue à tous les objets de la hiérarchie. Ce n'est actuellement pas le cas dans la description que nous proposons. Par exemple, pour repérer toutes les dégradations d'une famille donnée (arrachements, déformations, fissures ou remontées) il nous faut, pour chaque dégradation, remonter dans la hiérarchie de la figure 1.2 jusqu'au concept correspondant et tester alors sur l'attribut correspondant.

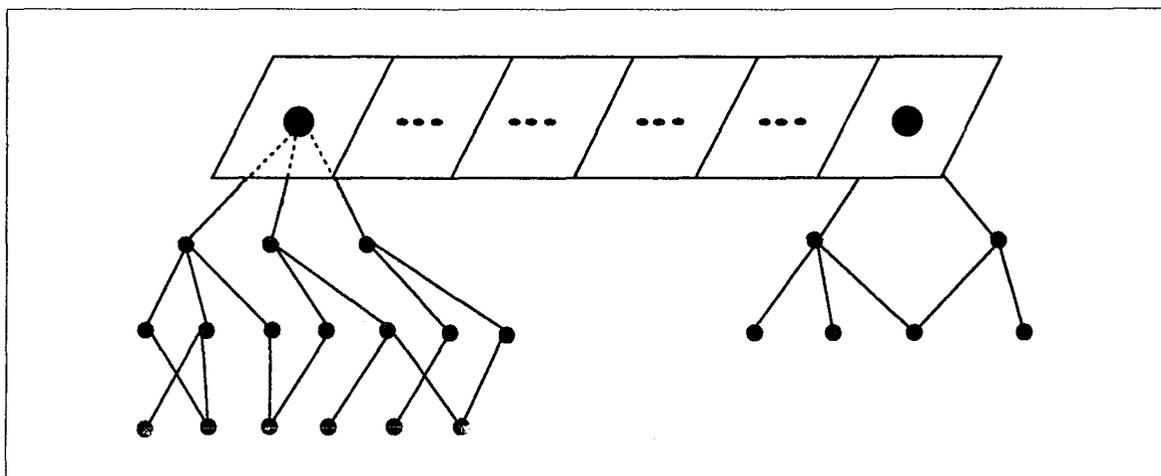


Figure 1.3. Hiérarchie explicite au sein de chaque niveau d'un blackboard.

L'introduction d'une telle structuration au sein d'un même niveau aurait également un impact sérieux sur le raisonnement des tâches en augmentant le potentiel d'expression des événements (cf. la partie V, chapitre 3).

b - Traduction et héritage

L'héritage ne prête pas à réflexion. Il s'agit d'ajouter un mécanisme tel que ceux qui apparaissent dans les représentations à objets. Il lui faut tenir compte de la notion d'héritage multiple du fait de l'existence de plusieurs hiérarchies en parallèle : un niveau doit pouvoir au choix hériter tout ou partie des attributs ou valeurs d'attributs de l'un ou l'autre de ces ascendants.

Pour ce qui est de la traduction, nous avons déjà rejeté une première solution qui était de construire des spécialistes interprètes. Deux autres techniques peuvent alors

être envisagées. Il est tout d'abord possible de songer à définir des règles de traduction et à les répartir dans les diverses spécialistes concernées. Ces règles sont alors mêlées aux connaissances de la spécialiste. Un tel processus a été mis en place dans le système SYNERGIC dans le but d'assurer la communication entre les divers agents du système tout en leur permettant de conserver un vocabulaire propre [Gleizes et Trouilhet 91].

Cette solution présente l'inconvénient de réunir au sein d'une même spécialiste des connaissances qui ne sont pas du même type : les connaissances du domaine, qui concernent l'expertise à proprement parler et qui interviennent directement dans le raisonnement, et les connaissances de traduction qui interviennent de façon détournée. Le problème de l'organisation et de la gestion de ces deux types de connaissances se poserait alors. Aussi nous semble-t-il souhaitable d'opter pour la solution qui consiste à définir des démons (au sens des représentations à objets) dont le rôle sera équivalent à celui des spécialistes interprètes et à attacher, dans le même but, des facettes "si-besoin" aux attributs des descriptions à instancier. Ces démons et facettes seront alors automatiquement déclenchés lorsqu'une règle de spécialiste aura recours à un nœud (ou à un de ses attributs) correspondant à la description non encore instanciée d'un point de vue. Ainsi, il y aura "construction" de nouveaux points de vue au cours du raisonnement à partir des descriptions de nœuds existantes, permettant alors de modéliser plus fidèlement le raisonnement expert. Le cognicien devra toujours définir les procédures de passage d'un niveau à un autre (changement de point de vue) comme il l'a fait pour le processus de fusion dans le SE ROSY. Il n'aura cependant pas à gérer les interventions de ces procédures.

c - Vers des blackboards d'objets

L'intégration des fonctionnalités que nous venons de décrire dans ATOME conduit donc à remettre en cause la structure des blackboards. Il est possible, dans un premier temps, de conserver la notion de niveau telle qu'elle existe actuellement et de lui adjoindre les divers mécanismes que nous avons envisagés. La distance entre le résultat ainsi obtenu et des objets serait alors particulièrement faible. Aussi nous semble-t-il préférable d'avoir directement recours à une représentation à objets. La définition de blackboards d'objets semble donc s'imposer, blackboards dans lesquels la notion de niveau correspondrait à celle de classe.

Une représentation approchant la représentation à objets a été retenue dans GBB. Les blackboards y sont représentés sous la forme d'arbres dont les feuilles correspondent aux niveaux de ATOME et dont les nœuds sont eux-mêmes des blackboards [Corkill *et al.* 86]. GBB gagne ainsi en efficacité, généricité et flexibilité. Nous souhaitons aller plus loin en utilisant totalement les possibilités des représentations à objets. Les mêmes retombées [Corkill *et al.* 87] pourraient alors être attendues, principalement la généricité et la flexibilité de la représentation.

1.2.4 De nouvelles possibilités : raisonner à profondeur variable

A plus longue échéance, nous voyons un intérêt principal aux modifications des modes de représentation dans ATOME : la possibilité de raisonner à profondeur variable [Kayser 88]. Des raisonnements pourraient en effet être entrepris sur les divers points de vue représentés dans les hiérarchies des niveaux des blackboards avec des connaissances destinées à chacun de ces points de vue et présentes dans les diverses spécialistes. C'est déjà un peu ce qui est fait dans la spécialiste *Sp-recherche-causes* où un raisonnement peut être entrepris sur des descriptions correspondant à deux niveaux de détail.

Dans [Kayser 88], D. Kayser propose de représenter les éléments de base sur lesquels un système d'IA opère non plus comme des atomes mais comme des familles d'entités du système de représentation. Cela permet de tenir compte des divers degrés de finesse auxquels de tels éléments peuvent être décrits et la représentation d'un concept peut ainsi varier d'une représentation à une autre située "plus en profondeur", en fonction des besoins du raisonnement. Il définit ensuite des faits portant sur ces concepts et munis de niveaux de profondeur qui leur sont propres. En effet, la nature même du système à profondeur variable qu'il décrit veut que certains faits ne soient établis qu'à partir d'une certaine profondeur et que d'autres n'existent que jusqu'à une certaine profondeur. Il introduit ensuite la notion d'univers correspondant à un ensemble de règles d'inférence qui vont pouvoir s'appliquer sur les faits. Ces univers sont regroupés dans un treillis. Le principe de son raisonneur à profondeur variable consiste alors à travailler dans un des univers du treillis sur les faits visibles depuis cet univers (les faits dits "éclairés"). Les nouveaux faits déduits dans un univers sont alors propagés dans les autres en tenant compte de l'organisation en treillis. Ils pourront alors y être éclairés ou non.

Un parallèle peut être établi entre les divers concepts auxquels D. Kayser fait allusion et ceux que nous envisageons pour ATOME :

- la notion de profondeur correspond à celle de niveau de description d'une hiérarchie ;
- les points de vue sur un même concept correspondent à la notion de famille d'entités ;
- les univers sont les connaissances des spécialistes ;
- la notion d'éclairage n'est pas pertinente dans ce que nous envisageons car il n'y a pas la notion de fait valable jusqu'à, ou à partir de, une certaine profondeur.

Il s'agit alors de compléter les connaissances dans les spécialistes de ATOME par des règles qui vont travailler sur les divers points de vue définis. Le mécanisme de traduction permettrait alors d'adapter la représentation d'un nœud donné à ces règles au cours du raisonnement. La spécialiste dispose ainsi d'un ensemble de connaissances lui permettant de raisonner sur plusieurs niveaux de description. Le problème de la gestion de ces connaissances se pose alors. Une spécialiste ne dispose en effet pas, dans

la version actuelle de ATOME, de moyens pour organiser son raisonnement et l'ordre dans lequel elle fait intervenir ses connaissances. Nous verrons dans la partie V (chapitre 2) les nouvelles potentialités que nous avons développées de manière à permettre une telle gestion du raisonnement. En combinant ces moyens, la notion de point de vue et celle de traduction, un raisonnement à profondeur variable nous semble tout à fait envisageable.

Notons que ce type de raisonnement est utilisé dans certains systèmes temps réel devant fournir une solution à un problème en un temps limité. C'est par exemple le cas du système GATER [Mouaddib et Charpillet 92] où le raisonnement se fait à différents niveaux en fonction du temps imparti mais aussi selon la précision, la complétude et la certitude souhaitées pour la solution finale. Envisager un tel raisonnement dans ATOME ouvre ainsi une voie vers la modélisation des raisonnements en temps réel.

2

Les connaissances graduelles

Lorsque l'expert exprime sa connaissance, il lui arrive assez souvent d'avoir recours à des expressions du type :

“plus (ou moins) X est A, plus (ou moins) Y est B”

ou

“X est d'autant plus (ou moins) A que Y est B”

qui expriment une dépendance graduelle entre les entités X et Y, A et B pouvant être des propriétés floues. Ces connaissances peuvent être représentées par la notion de *topoi*¹ [Bruxelles et Raccah 87] ou *règles d'inférence graduelle*.

Ce type de connaissances fait l'objet de ce chapitre. Nous présentons tout d'abord quelques exemples de connaissances graduelles en voirie urbaine, en déduisons leurs caractéristiques principales et montrons l'intérêt que peut présenter la modélisation et l'utilisation de telles connaissances dans un raisonnement. Nous voyons ensuite comment il est possible de les traiter. Dans un premier temps, nous présentons diverses approches à ce type de connaissance et l'objectif que chacune cherche à atteindre. En effet, si nous envisageons d'utiliser de telles connaissances pour raisonner, nous verrons que cela n'est pas le cas pour toutes les approches. Ensuite, nous décrivons la façon dont nous avons modélisé certaines des connaissances fournies en exemple dans le cadre du formalisme de représentation de ATOME. Nous voyons alors comment il serait possible d'enrichir ce formalisme en introduisant des règles graduelles de façon explicite.

2.1 Les connaissances graduelles en voirie urbaine

2.1.1 Quelques exemples

Nous donnons ici un échantillon des connaissances graduelles que nous avons modélisées dans le cadre de la voirie urbaine, sous une forme homogène (réparties dans les diverses spécialistes de la tâche *Diagnostic*). Elles vont nous permettre de dégager les principaux traits caractéristiques de ce type de connaissance :

1. Cette notion est issue de la théorie de l'argumentation de J.-C. Anscombe et O. Ducrot [Anscombe et Ducrot 83].

1. *Plus il y a infiltration d'eau dans le corps de chaussée, plus la fondation risque d'être mauvaise,*
2. *Plus les profils sont déformés, plus la fondation risque d'être mauvaise,*
3. *Plus la vitesse des véhicules est importante, plus la mesure de l'importance par rapport au confort de la chaussée est importante,*
4. *Moins la chaussée est homogène, moins elle est confortable (plus la mesure de l'importance par rapport au confort de la chaussée est importante),*
5. *Plus une chaussée est âgée, plus la fondation risque d'être mauvaise,*
6. *S'il y a du désenrobage ponctuel et si l'âge de la chaussée est compris entre cinq et quinze ans alors la cause "enrobé trop vieux" est d'autant plus sûre que la chaussée est plus âgée.*

Nous avons tenu à indiquer la dernière connaissance, un peu particulière du fait de son expression sous une forme de règle de production classique, car une gradualité y est malgré tout exprimée.

Il s'agit maintenant d'analyser ces diverses connaissances pour en extraire leurs caractéristiques. Remarquons dans un premier temps que nous avons cité des connaissances ne reliant que deux entités. Or il est possible de définir des relations entre davantage d'entités. C'est par exemple le cas de la connaissance :

7. Plus une chaussée est âgée et plus le trafic est important, plus la fondation risque d'être mauvaise.

qui précise l'exemple 5. Très peu d'approches tiennent compte de ce type de connaissance. Nous y reviendrons dans les propositions que nous formulons au paragraphe 2.2.2.

Dans un second temps, nous tenons à insister sur la sémantique ambiguë des règles telles que 1, 2 et 5 du type :

Plus X est A, plus Y risque d'être B.

Ces règles comportent un mélange de flou et d'incertain. Il est alors difficile pour le cogniticien de cerner, dans le discours de l'expert, les éléments qui vont lui permettre de les interpréter correctement et de savoir si la variation de "X est A" porte sur :

1. une mesure de certitude de la proposition "Y est B",
2. le degré d'appartenance de Y à la propriété B,
3. l'ensemble du référentiel dont B est une valeur particulière,
4. 1 et 2 à la fois.

Sur l'exemple de la règle 2, les interprétations ci-dessus nous permettent d'obtenir :

1. *Plus les profils sont déformés, plus la mesure de certitude de l’assertion “la fondation est mauvaise” est élevée,*
2. *Plus les profils sont déformés, plus l’état de la fondation tend vers la valeur “mauvaise”,*
3. *Plus les profils sont déformés, plus l’état de la fondation tend vers des valeurs symboliques à tendance “mauvais”.*
Une liste de symboles de la catégorie “mauvais” est ici utilisée. Les termes y sont rangés par ordre croissant de mauvais état et l’on passe de l’un à l’autre progressivement.
4. *Plus les profils sont déformés, plus l’état de la fondation tend vers la valeur “mauvaise” avec un degré de certitude qui augmente progressivement.*

Cette difficulté vient s’ajouter au problème de la modélisation de ce type de règles. Lorsque nous les utiliserons à titre d’exemple dans ce qui suit, nous expliciterons l’interprétation qui est choisie.

2.1.2 Caractéristiques principales

Toutes les connaissances données en exemple décrivent des relations de dépendance graduelle entre deux objets. Ces relations ont les propriétés suivantes :

- elles expriment l’influence du changement d’une variable sur une autre variable. Ces variables correspondent, dans le cadre de ATOME, à des attributs de niveaux des blackboards et à des coefficients de vraisemblance associés à des valeurs d’attributs ;
- les variables y intervenant doivent avoir des domaines de valeurs ordonnés ;
- elles n’indiquent que la direction du changement et pas son amplitude. Il faudra donc chercher à expliciter cette amplitude par ailleurs afin de raisonner ;
- elles comportent deux parties. Celle de gauche contient les variables influentes de la relation tandis que dans celle de droite apparaît la variable qui subit l’influence ;
- elles sont orientées : une variation des variables de la première partie implique un changement de la seconde mais l’implication contraire n’est pas vraie. Pour qu’elle le soit, il faudrait que la variable de la seconde partie dépende uniquement de celles de la première. Il y aurait alors équivalence entre les variations. Or dans la plupart des cas, la dépendance n’est pas unique. Cela est illustré par l’exemple 2 : il n’est pas possible de dire que “plus l’état de la fondation est mauvais, plus les profils vont être déformés” ; le mauvais état de la fondation peut provenir d’un tout autre paramètre, notamment l’infiltration d’eau (cf. l’exemple 1). Aussi définissons-nous les variables *sources*, en référence à la partie source qui est la première partie, et la variable *but*.

Intuitivement, il y a déplacement de la source sur un axe fictif représentant l'ensemble ordonné de ses valeurs (floues ou non), ce déplacement entraînant celui du but dans une proportion à déterminer. Le but peut donc être défini par une fonction (au sens mathématique du terme) de la source. La représentation graphique de l'exemple 2 ci-dessus correspond ainsi à celle de la figure 2.1.

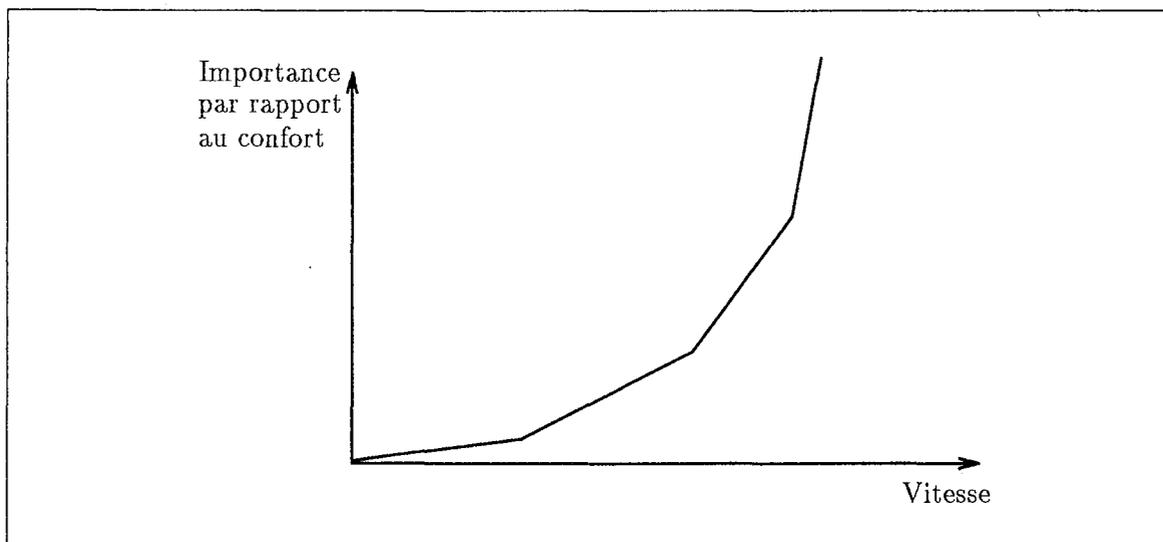


Figure 2.1. “Plus la vitesse est importante, plus la mesure de l'importance par rapport au confort est importante.”

Raisonnement avec des connaissances graduelles consiste donc à déterminer les fonctions qui relient une variable source à une variable but puis à les modéliser de façon à pouvoir les exploiter. Le résultat de la modélisation est alors une règle d'inférence graduelle.

La nature des variables introduit une difficulté. Ces variables peuvent être numériques (associées à des valeurs symboliques dans une règle graduelle ; c'est notamment le cas de l'attribut *âge de la chaussée*) ou symboliques. Parmi les variables symboliques, certaines peuvent être facilement traduites en variables numériques car elles peuvent se référer à une échelle numérique (c'est par exemple le cas de l'attribut *vitesse* qui est à valeurs symboliques (“fort”, “moyen”, “faible”) dans ROSY) ; il suffit par exemple d'avoir recours à la notion d'ensembles flous ou plus simplement à des intervalles non flous définis par deux valeurs numériques. D'autres sont purement symboliques et ne disposent d'aucun référentiel numérique (par exemple, l'attribut qui qualifie l'état de la fondation). Les appariements entre source et but sont alors mixtes ou homogènes. Le problème provient du fait que :

- les relations graduelles sont *a priori* continues alors que le domaine de valeurs des variables peut être discontinu (cas où l'une, l'autre ou les deux variables sont symboliques) ;
- certaines vont chercher à mettre en correspondance un domaine de valeurs continu avec un domaine discontinu.

Les problèmes de discontinuité peuvent cependant être résolus dans des cas où les appariements sont homogènes. Nous reviendrons sur ce fait au paragraphe 2.2 où nous voyons comment nous avons traité le cas de certains appariements dans le cadre du SE ROSY.

2.1.3 Les intérêts de ces connaissances

Les connaissances heuristiques dans les systèmes experts sont souvent modélisées sous la forme de règles de production. C'est notamment le cas dans ATOME) où les connaissances graduelles ont du être adaptées de façon à se plier à ce formalisme. D'une part, cela présente l'inconvénient de ne pas avoir une représentation fidèle à la connaissance qui a été fournie par l'expert. D'autre part, il faut traduire chaque connaissance graduelle en un nombre de règles de production suffisamment important pour couvrir la variation de la source (une règle pour chaque valeur que peut prendre la source). Si le nombre de ces règles ne paraît pas trop important dans le cas où il n'y a qu'une seule variable source, il prend vite des proportions énormes lorsque plusieurs variables sources apparaissent (cf. [Buisson et Prade 89] où une relation graduelle impliquant quatre variables sources conduit à devoir définir 240 règles de production!). Le bénéfice d'une description dynamique de la connaissance est de plus perdu au profit d'une description statique.

Aussi nous semble-t-il préférable d'avoir recours à des règles d'inférence graduelles pour raisonner, règles qui sont abordées dans le paragraphe suivant. Nous faisons tout d'abord mention de quelques approches s'intéressant à ce type de connaissances. Nous présentons ensuite les quelques solutions que nous avons mises en place dans le formalisme des règles de production pour le SE ROSY. Enfin, nous voyons ce que pourrait être la prise en compte de véritables règles d'inférence graduelles dans ATOME.

2.2 Représentation des connaissances graduelles

2.2.1 Quelques approches

La toute première approche que nous citons ici est celle de P.-Y. Raccach et S. Bruxelles [Raccach et Bruxelles 89]. Ils introduisent la notion de gestion de la connaissance graduelle dans le but de faciliter la "capture" de l'expertise et sa représentation. Ils avancent l'hypothèse suivante : "ce qui fait l'efficacité de l'expert est sa capacité à représenter ses connaissances au moyen de champs graduels ; chaque élément de connaissance est ordonné sur un champ par rapport aux autres éléments du même champ ; les règles de raisonnement que l'expert utilise relient ces champs graduels entre eux". Ils proposent donc d'utiliser des règles graduelles et de les représenter sous la forme de *topoi*. Les propriétés articulées par les topoi se présentent alors comme des échelles orientées appelées *champs topiques*. Ils définissent ainsi un cadre destiné à pouvoir formaliser un raisonnement au moyen de topoi.

La seconde approche est celle de R. Dieng et B. Trousse [Dieng et Trousse 89]. Elles préconisent l'utilisation de topoi pour faciliter l'acquisition et la validation des connaissances. Le postulat de départ est que l'expert utilise en général un modèle implicite de ce qu'il veut concevoir. Aussi proposent-elles que le cognitif rende explicite ce modèle et le présente à l'expert de façon à valider les aspects statique et dynamique de la connaissance extraite. Le modèle est alors représenté par un graphe de dépendances entre les paramètres importants de l'expertise. Ces dépendances sont en fait des topoi (différents types de topoi sont définis selon que les champs topiques à relier sont numériques ou discrets). Ce graphe est alors utilisé pour simuler qualitativement le comportement du futur système expert lors de l'acquisition des connaissances à l'aide de l'outil décrit dans [Dieng et Trousse 88], capable d'exploiter un tel graphe.

Elles utilisent également les topoi pour analyser le raisonnement humain dans le but de l'expliquer. Ces topoi sont alors engendrés automatiquement à partir des règles d'une base de connaissances [Dieng 87].

H. Davis introduit la notion de *topos* conditionnel [Davis 89]. Ces topoi représentent le cas où les fonctions reliant deux variables ne sont pas monotones. Un exemple d'un tel topos est la conjugaison des deux expressions :

*En dessous de 20°, plus la température est élevée, meilleur est le temps.
Au dessus de 20°, moins la température est élevée, meilleur est le temps.*

qu'il traduit, en introduisant la notion de température idéale, par le topos :

Plus on s'écarte de la température idéale, plus le temps est mauvais.

Cette traduction est due au désir de ne pas introduire de valeurs ponctuelles qui, d'après H. Davis, vont à l'encontre de la théorie sur les inférences graduelles. Il estime en effet que ces dernières sont destinées à fournir une vue d'ensemble du comportement d'un système expert. Aussi utilise-t-il dans un but de spécification et de validation, ainsi que pour aider au développement.

Notons que la notion de topos conditionnel se retrouve dans l'exemple 6 qui figure au début de ce chapitre.

L'approche de H. Prade, à la différence des approches précédentes, a recours aux règles graduelles pour raisonner [Prade 88]. Elle est fondée sur la théorie des possibilités et sur les ensembles flous. Elle établit une équivalence entre la règle "plus X est A, plus Y est B" et la règle d'inférence graduelle "plus $x \in A$, plus $y \in B$ " dans laquelle :

- x et y sont deux variables représentant les valeurs respectives d'attributs a_1 et a_2 pour des entités X et Y ($x = a_1(X)$ et $y = a_2(Y)$),
- A et B sont des sous-ensembles flous définis sur les domaines de valeurs des attributs a_1 et a_2 .

Cette règle est interprétée comme signifiant : plus le degré d'appartenance de x à A est grand, plus celui de y à B doit être grand également. Le principe est alors de

déterminer les fonctions μ_A et μ_B d'appartenance aux ensembles flous A et B dans les référentiels respectifs U et V de ces ensembles et de traduire la règle d'inférence graduelle par la contrainte :

$$\mu_B(y) \geq \mu_A(x)$$

En considérant le schéma d'inférence déductif suivant :

$$\frac{\text{plus } x \in A, \text{ plus } y \in B}{x \in A'}{y \in B'}$$

où le fait $x \in A'$ signifie que les valeurs possibles de x sont restreintes par le sous-ensemble (éventuellement flou) A' , il est alors possible d'obtenir le sous-ensemble B' qui restreint les valeurs plus ou moins possibles de y (cf. figure 2.2).

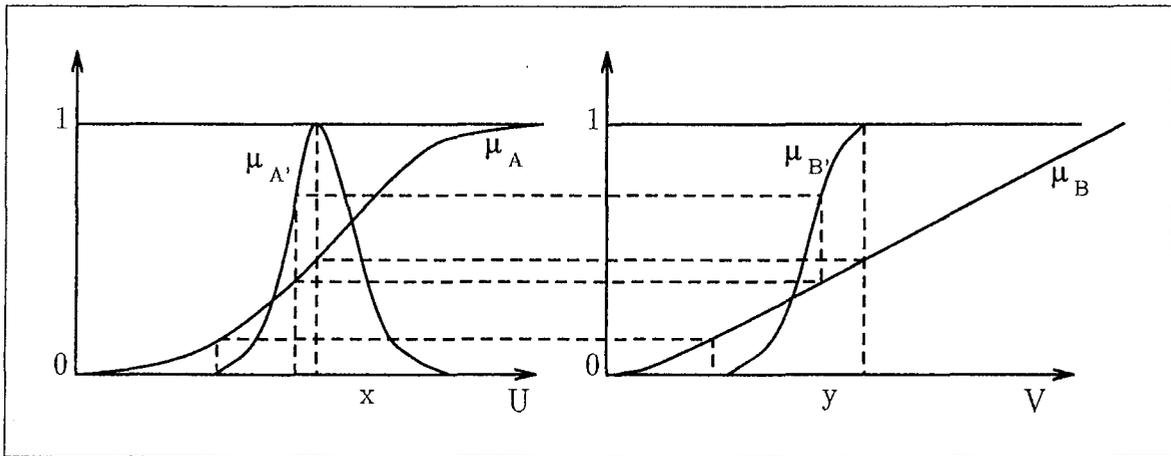


Figure 2.2. Image d'une donnée floue pour une règle d'inférence graduelle, d'après [Prade 88].

L'application pratique de l'approche que nous venons de présenter nécessite cependant de pouvoir identifier les fonctions caractéristiques μ_A et μ_B de chaque règle d'inférence graduelle, ce qui suppose que les variables x et y correspondantes soient associées à des échelles bien définies. Un exemple d'application est proposé dans [Buisson et Prade 89] où des dépendances entre besoin calorique et des paramètres caractérisant un individu (âge, poids relatif, activité physique, appétit) sont identifiées et exploitées sous forme de règles d'inférence graduelle. Cette approche propose ainsi une solution dans le cas où une règle graduelle comporte plusieurs variables sources.

Citons, en dernier lieu, l'approche de S. Després et de B. Bouchon-Meunier qui proposent également d'exploiter les règles graduelles à l'aide de la logique floue [Bouchon-Meunier et Després 90]. Il s'agit de transformer la connaissance graduelle type (plus X est A, plus Y est B) en un faisceau de règles de production équivalentes, obtenues à partir d'une règle référentielle. Une telle règle correspond à :

$$\text{Si } X \text{ est } A_k \text{ alors } Y \text{ est } B_j$$

où A_k et B_j sont des caractérisations particulières de A et B. Les autres règles du faisceau sont construites en modulant A_k et B_j par des “modificateurs” linguistiques (très, vraiment, plutôt, ...). La règle référentielle est alors exploitée par un mécanisme d'inférence floue, ce qui suppose de choisir un opérateur d'inférence floue. En effet, la gradualité exprimée par cette règle sera différente selon l'opérateur retenu. Divers types de gradualité sont envisagés et un système d'aide au choix d'opérateurs d'inférence floue est proposé [Després 88].

2.2.2 Les connaissances graduelles dans ATOME

La modélisation des connaissances graduelles qui sont pour l'instant présentes dans le SE ROSY dépend du type des entités (symbolique ou numérique) intervenant dans la relation :

- si toutes deux sont de type symbolique, il s'agit de mettre en correspondance les valeurs de chacun de ces attributs en fonction des indications de l'expert. La définition d'une fonction effectuant cette mise en correspondance évite alors d'avoir à définir autant de règles de production qu'il y a de valeurs d'attributs mais le principe est le même : cela revient en effet à définir un comportement différent pour chaque valeur d'attribut. La notion de continuité qu'induit une règle graduelle est de plus perdue ;
- si toutes deux sont numériques, il suffit de définir une fonction dans laquelle la variable source intervient pour définir la variable but. C'est par exemple le cas de l'exemple 5 (*plus une chaussée est âgée, plus la fondation risque d'être mauvaise*) dans le cadre de l'interprétation 1, où une fonction mathématique f permet de calculer le coefficient de vraisemblance qui est associé à la valeur “mauvaise” de l'attribut *état de la fondation*. Un problème se pose cependant quant au choix de la prémisse de la règle de production qui va traduire la connaissance graduelle :
 - ou bien nous choisissons de ne pas utiliser de prémisse, laissant alors à la fonction f le soin de modéliser le fait que la fondation ne peut être qualifiée de mauvaise qu'à partir d'un certain seuil d'âge ;
 - ou bien une prémisse comportant un test sur ce seuil est choisie. La fonction f sera définie en conséquence. L'exemple 5 peut alors se traduire par la règle de production :

Si l'âge de la chaussée est supérieur à 15 ans alors le coefficient de la valeur “mauvaise” de l'attribut “état de la fondation” est égal à $f(\text{âge})$.

La fonction f est définie de façon intuitive avec l'expert, principalement en essayant de déterminer quelles doivent être les valeurs de la source correspondant aux valeurs extrêmes du but.

Le même procédé a été appliqué à l'exemple 6 (les prémisses de la règle sont inchangées ; seule sa partie action est modifiée de la même façon que pour celle de la règle 5) ;

- lorsque la source et le but ne sont pas homogènes, il faudrait alors les ramener à un type commun, ce qui n'est possible que si la donnée symbolique peut être rapportée à une échelle numérique.

Les solutions indiquées ci-dessus ne sont pas valables dans tous les cas. Cela est en effet dépendant de la connaissance experte à coder. De plus, elles ne sont pas toujours satisfaisantes et conduisent à un appauvrissement, voire à une déformation, de la sémantique de la connaissance graduelle :

- il y a appauvrissement car il n'est pas aisé de déterminer les correspondances que nous avons mentionnées ci-dessus et d'exprimer, sous la forme de règles de production, une connaissance qui a été exprimée sous la forme de règles graduelles. Bien souvent, nous avons eu recours à une discrétisation de la connaissance graduelle en ne considérant que certaines valeurs de la variable source. Par exemple, la connaissance graduelle de l'exemple 2 a été transformée en :

Si les profils sont très déformés alors la fondation est mauvaise.

et d'autres règles dans lesquelles les prémisses ont été complétées par des tests portant sur d'autres données que les profils ;

- il y a à la fois appauvrissement et déformation lorsque nous sommes paradoxalement amenée à introduire des seuils, en contradiction avec le désir de représenter des variations continues entre deux variables.

Aussi pensons-nous qu'il est préférable d'intégrer un formalisme de règle graduelle, au même titre que celui que H. Prade définit. L'approche qu'il propose ne semble pas convenir au domaine de la voirie urbaine. En effet, les entités intervenant dans les règles graduelles propres à ce domaine ne sont pas toutes définies dans un référentiel à échelle numérique. L'utilisation de la notion d'ensemble flou n'est alors pas possible, par manque de ce référentiel.

Les connaissances graduelles étant à caractère plutôt intuitif, nous pensons qu'il faut laisser une place importante à l'intuition dans la définition de ces règles. Aussi songeons-nous à un procédé dans lequel l'expert saisirait directement et de façon graphique la fonction de dépendance entre but et source d'une connaissance graduelle. Il s'agirait alors d'introduire une échelle fictive pour les variables purement symboliques, symbolisant la variation de la variable d'une valeur symbolique extrême à l'autre. Pour les autres types de données, les échelles symboliseraient le domaine de valeurs numériques associé, correspondant ainsi à la notion de "référentiel" des ensembles flous. L'expert tracerait alors le dessin de la fonction de dépendance (cf. figure 2.3) dans un plan déterminé par les deux référentiels, s'aidant pour cela des points de repères (les valeurs symboliques de la source et éventuellement du but) portés sur les axes référentiels.

L'équation de la courbe constituerait alors la règle d'inférence graduelle. Une telle règle ne faisant intervenir que des valeurs numériques, une traduction de ces valeurs numériques vers les valeurs symboliques correspondantes du but devrait alors être opérée, en ayant recours aux axes référentiels.

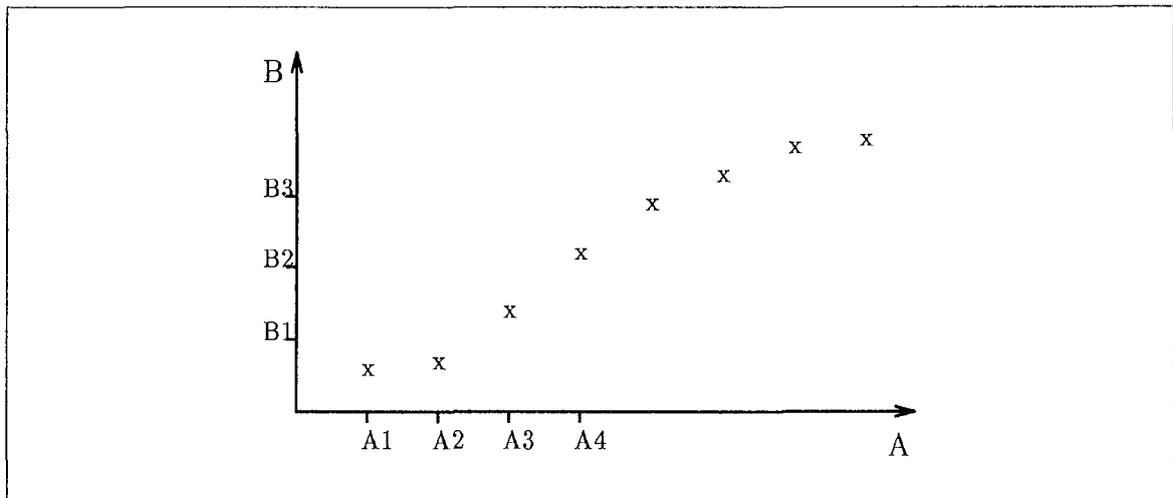


Figure 2.3. Saisie intuitive d'une règle d'inférence graduelle.

Cette solution nous semble présenter un intérêt pour le processus d'acquisition des connaissances car il s'agit de faire appel à l'intuition de l'expert. Le cognicien obtiendrait ainsi de sérieuses informations pour analyser plus finement et plus précisément la relation existant entre deux entités. En extrapolant, il est possible d'envisager le cas où le tracé fourni par l'expert serait suffisamment précis pour permettre un codage immédiat de la connaissance acquise, sans qu'il y ait besoin d'analyser cette connaissance puisque le formalisme d'acquisition correspondrait à celui de la règle d'inférence graduelle.

Il faudrait alors étendre ce principe de saisie graphique aux connaissances graduelles qui comportent plusieurs variables sources. Cela ne semble *a priori* pas faisable car il est difficile d'introduire des dimensions supplémentaires dans le support de saisie de la règle graduelle. De plus, l'existence de dépendances éventuelles entre variables sources complique le problème. Nous le simplifierons dans un premier temps en supposant les variables indépendantes, laissant le soin à des recherches futures de considérer le cas de variables dépendantes. Dans le cadre d'un tel postulat, il nous faut introduire la notion d'ordre de grandeur qui mesure le degré d'influence de chacune des variables sources sur la variable but. Il est en effet plausible de supposer que toutes ces variables ne vont pas agir avec la même amplitude sur la variable but :

- si tel est le cas, la connaissance graduelle peut alors être divisée en autant de règles graduelles qu'il y a de variables sources. Le raisonnement graduel va alors s'opérer sur une même variable but à partir de plusieurs règles graduelles. Le problème est alors de fusionner les diverses valeurs obtenues pour un même attribut dans ces raisonnements ;
- si certaines sont prédominantes, la variation de la variable but leur est essentiellement due, les autres variables n'intervenant que de façon minimale. C'est par exemple le cas de la connaissance 7 qui fait intervenir les deux variables sources

âge de la chaussée et *trafic* sur la variable but *état de la fondation*. Cette connaissance et l'exemple 5 sont tous deux valides. En revanche, une dépendance unique entre *trafic* et *état de la fondation* ne l'est pas. Cela signifie que le trafic n'influe que faiblement sur l'état de la fondation et uniquement si l'âge de la chaussée provoque une première variation. Il nous semble alors que la variation apportée par la variable source *trafic* peut venir se greffer sur la fonction de dépendance existant entre la variable prédominante et le but, en la modifiant légèrement et uniquement à partir d'un certain seuil (une certaine valeur de la variable source prédominante).

En rattachant ainsi les variables sources faiblement influentes aux variables fortement influentes, le problème se réduit au cas précédent.

Ce que nous venons de présenter est une première réflexion sur la modélisation de connaissances graduelles. Il s'agit maintenant de l'approfondir avant de passer à sa réalisation. Notamment, le problème de la transformation de données symboliques en données numériques et *vice versa* se pose [Després 90].

3

Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie les difficultés que nous avons rencontrées dans la représentation des connaissances du système ROSY, qu'il s'agisse de représentation des faits nécessaires au raisonnement ou des connaissances heuristiques sur lesquelles se fonde le raisonnement. Les données visuelles et les connaissances graduelles ont été nos deux préoccupations.

Pour les premières, nous avons montré la nécessité d'introduire la notion de point de vue sur un objet. Cela correspond aux diverses façons dont cet objet peut être perçu, ce qui peut induire des raisonnements différents sur ces divers points de vue. La notion de hiérarchisation de ces points de vue est également indispensable. Elle suppose de disposer de mécanismes :

- d'héritage de valeurs ou d'attributs d'un point de vue à un autre,
- d'instanciation automatique d'un point de vue prédéfini (un niveau de blackboard) en fonction d'autres points de vue.

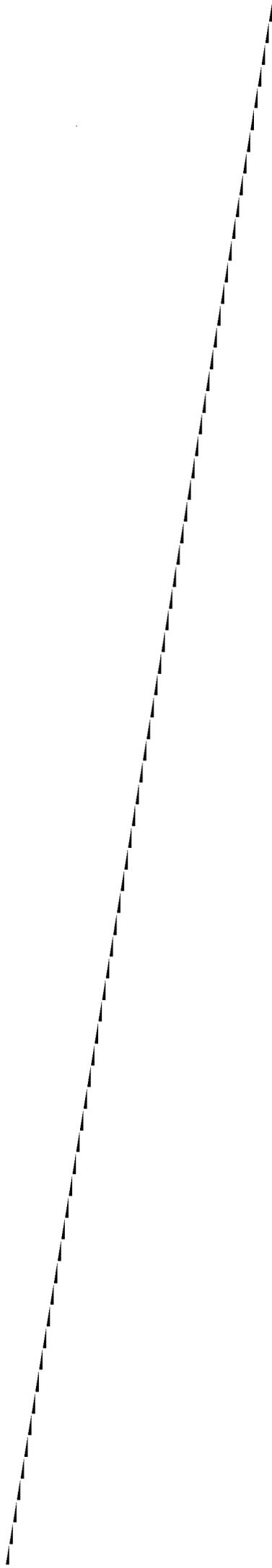
Aussi proposons-nous de faire évoluer la structure de nœuds des blackboards vers celle d'objets organisés hiérarchiquement. Des possibilités de raisonnement à profondeur variable s'offriraient alors à tout concepteur de système expert utilisant ATOME. Il nous semble qu'il serait alors également envisageable d'adapter le raisonnement en fonction de la demande de l'utilisateur et de procéder ainsi à un raisonnement adaptatif. Il y aurait sélection des connaissances correspondant à cette demande et automatiquement sélection du niveau de description associé. Il faudrait au préalable explicitement ajouter des connaissances destinées à un tel raisonnement. De même, une indication sur chacune des connaissances initialement présentes dans le SE mentionnerait le degré de raisonnement auquel elle peut intervenir.

Les connaissances graduelles sont complexes à traiter car elles comportent à la fois des données numériques et symboliques, le caractère discontinu de ces dernières étant incompatible avec le principe même de ces connaissances. Nous avons présenté les caractéristiques et les intérêts de telles connaissances dans un raisonnement. Elles peuvent être modélisées par des règles de production classiques mais le risque est alors de restreindre leur sémantique, voire de la déformer. Il semble donc plus opportun d'inclure des règles d'inférence graduelles dans ATOME plutôt que d'utiliser le formalisme des règles de production. Nous avons donné une première idée de ce que pourraient

être de telles règles et de la façon dont elles pourraient être acquises auprès de l'expert. Il s'agit d'utiliser leur caractère intuitif. Nous proposons de mettre en correspondance deux données liées par une "gradualité" au travers d'un graphe que l'expert est chargé de dessiner en faisant appel à son intuition. Le problème est alors d'envisager des équivalences entre données symboliques et données numériques et une extension de cette solution au cas où la connaissance graduelle lie plusieurs données.

PARTIE V

Modélisation du raisonnement et répercussions sur ATOME



Cette partie traite de la modélisation des raisonnements experts dans ATOME. Nous avons initialement considéré les problèmes de formalisation que nous avons rencontrés dans le système expert ROSY et avons réalisé ou proposé des solutions de modification des formalismes de représentation des raisonnements dans ATOME (certaines de ces solutions sont le fruit d'un travail en commun avec d'autres personnes travaillant sur ATOME). Ces réalisations et propositions sont présentées dans cette partie.

Nous revenons tout d'abord sur la description de ATOME en détaillant la structure et le fonctionnement des sources de connaissances du générateur : spécialistes, tâches et stratégie. Puis nous nous intéressons au raisonnement au sein d'une spécialiste en montrant en quoi il diffère de celui de l'expert et en décrivant les fonctionnalités qu'il faudrait adjoindre à cette source de connaissances pour que son raisonnement soit fidèle à celui de l'expert. Nous présentons alors la réalisation pratique de ces fonctionnalités, qui ont été intégrées au sein d'un moteur d'ordre 1 développé pour les spécialistes. Nous décrivons les caractéristiques de ce moteur et voyons comment il permet de rapprocher le raisonnement des spécialistes de celui de l'expert.

Nous présentons ensuite les difficultés du même ordre posées par la modélisation du raisonnement expert au niveau des sources de connaissances de contrôle. Nous nous limitons dans un premier temps aux tâches et, de même que précédemment, voyons comment leurs possibilités de raisonnement pourraient être enrichies. Les propositions que nous formulons consistent pour l'essentiel à intervenir sur la communication entre tâche et spécialistes et à fournir à la tâche les moyens de gérer explicitement sa liste d'événements. De sérieux impacts sur les deux catégories de sources de connaissances en découleraient. Enfin, nous insistons sur le fait que les propositions émises peuvent également être envisageables pour la stratégie.

1

ATOME en détail

Nous avons décrit succinctement, dans la partie I, l'architecture de ATOME et ses principales composantes. Nous y revenons ici en insistant davantage sur les trois types de sources de connaissances : spécialistes, tâches et stratégies. Nous ne présentons ici que les éléments utiles à la compréhension des chapitres II et III de cette partie. Le lecteur désirant plus de détails pourra se reporter à la thèse de H. Lâasri et B. Maître [Lâasri et Maître 89]. Les blackboards ne figureront pas dans cette présentation.

1.1 Les spécialistes

Les *spécialistes* de ATOME sont les sources de connaissances qui renferment l'expertise du domaine. Chacune est experte dans un sous-domaine particulier du domaine d'expertise. Contrairement aux autres sources de connaissances, elles travaillent sur les données des blackboards : elles y puisent les informations nécessaires à leurs inférences et vont y ranger le résultat de ces inférences, c'est-à-dire les conclusions de leurs déductions.

Elles ont été qualifiées de modules autonomes et indépendants dans [Lâasri et Maître 89] mais nous avons pu constater, en décrivant le système ROSY et dans la partie III, que cette apparente autonomie est plus que relative. Bien souvent, en effet, une spécialiste a besoin des conclusions des autres spécialistes pour pouvoir intervenir. La spécialiste *Sp-synthèse* de ROSY peut être citée en tant que cas extrême de cette situation puisque qu'elle est absolument incapable de faire quoi que ce soit si ses collègues n'ont pas travaillé antérieurement. Nous sommes là en présence d'un cas de collaboration entre spécialistes. Il peut aussi y avoir concurrence entre plusieurs spécialistes pour intervenir lors d'une étape du raisonnement, les spécialistes estimant qu'elles sont à même d'apporter quelque chose au problème courant au même moment. Dans tous les cas de figures, les spécialistes coopèrent sous l'œil bienveillant de la tâche, de façon à contribuer conjointement à l'élaboration d'une solution au problème courant.

Dans tout système à base de blackboard, les spécialistes ont un format "conditions/actions". Celles de ATOME n'échappent pas à la règle. Nous nous limiterons ici aux spécialistes-ATOME dont la partie "actions" est constituée d'une base de règles. Les autres types de spécialistes (spécialistes-ATOME dont la partie "actions" est

une procédure, spécialistes liées à des générateurs classiques de systèmes experts (voir [Lâasri et Maître 89])) n'ont pas fait l'objet d'une étude dans le cadre de cette thèse.

1.1.1 Caractéristiques d'une spécialiste

Une spécialiste est définie par les caractéristiques de la figure 1.1.

1. *Nom* : nom de la spécialiste
2. *Variables locales* : leur rôle principal est de fournir le contexte de travail de la spécialiste. Celle-ci ne travaille en effet pas sur l'ensemble des blackboards de l'application mais avec une petite partie de ces blackboards. Les données nécessaires lui sont donc fournies par ces variables, auxquelles des fonctions de filtrage sur les blackboards sont associées.
Cet ensemble de variables est divisé en deux parties :
 - (a) *Variables de précondition* : elles sont liées lors de la phase de vérification de la précondition de la spécialiste et restent accessibles lors de sa phase d'activation. Elles peuvent donc être manipulées dans sa précondition ainsi que dans ses règles.
 - (b) *Variables d'action* : elles sont liées lors de la phase d'activation de la spécialiste et peuvent être manipulées dans sa base de règles.
3. *Précondition* : liste de conditions que la spécialiste doit vérifier pour devenir *activable*.
4. *Base de règles* : corps de la spécialiste.
5. *Mode de fonctionnement* : cette propriété permet de préciser la façon dont la base de règles sera interprétée. Les modes d'interprétation sont à choisir entre "simple", "multiple" et "cyclique".

Figure 1.1. Caractéristiques d'une spécialiste.

La spécialiste est formée d'une base de règles de production auxquelles sont associés des *coefficients d'importance*. Ces coefficients permettent de définir *a priori* un ordre sur les règles : celles-ci sont examinées en respectant cet ordre.

Il ne s'agit cependant pas du seul paramètre qui conditionne la façon dont les inférences s'enchaînent. Cet enchaînement dépend également du *mode de fonctionnement* de la spécialiste. Son comportement est en effet fixé *a priori* par ce mode.

1.1.2 Activation d'une spécialiste

Lorsqu'une tâche active une spécialiste, elle se contente en fait de lui signaler que le contexte actuel lui est favorable et peut l'intéresser. Il s'agit donc plutôt d'une présé-

lection, au cours de laquelle la spécialiste est “réveillée”. C’est alors à elle de contrôler que toutes les conditions requises sont remplies pour qu’elle puisse effectivement travailler. Elle commence donc tout d’abord par vérifier ses préconditions. Si celles-ci sont satisfaites (elle passe alors du statut de *spécialiste présélectionnée* au statut de *spécialiste activable*), elle crée son contexte de travail. Elle passe ensuite ses connaissances en revue, selon le mode de fonctionnement qui lui a été octroyé (le concepteur de “système-ATOME” a le choix entre les modes simple, multiple et cyclique), en respectant l’ordre de parcours des règles induit par les coefficients d’importance. Ce processus est présenté dans la figure 1.2.

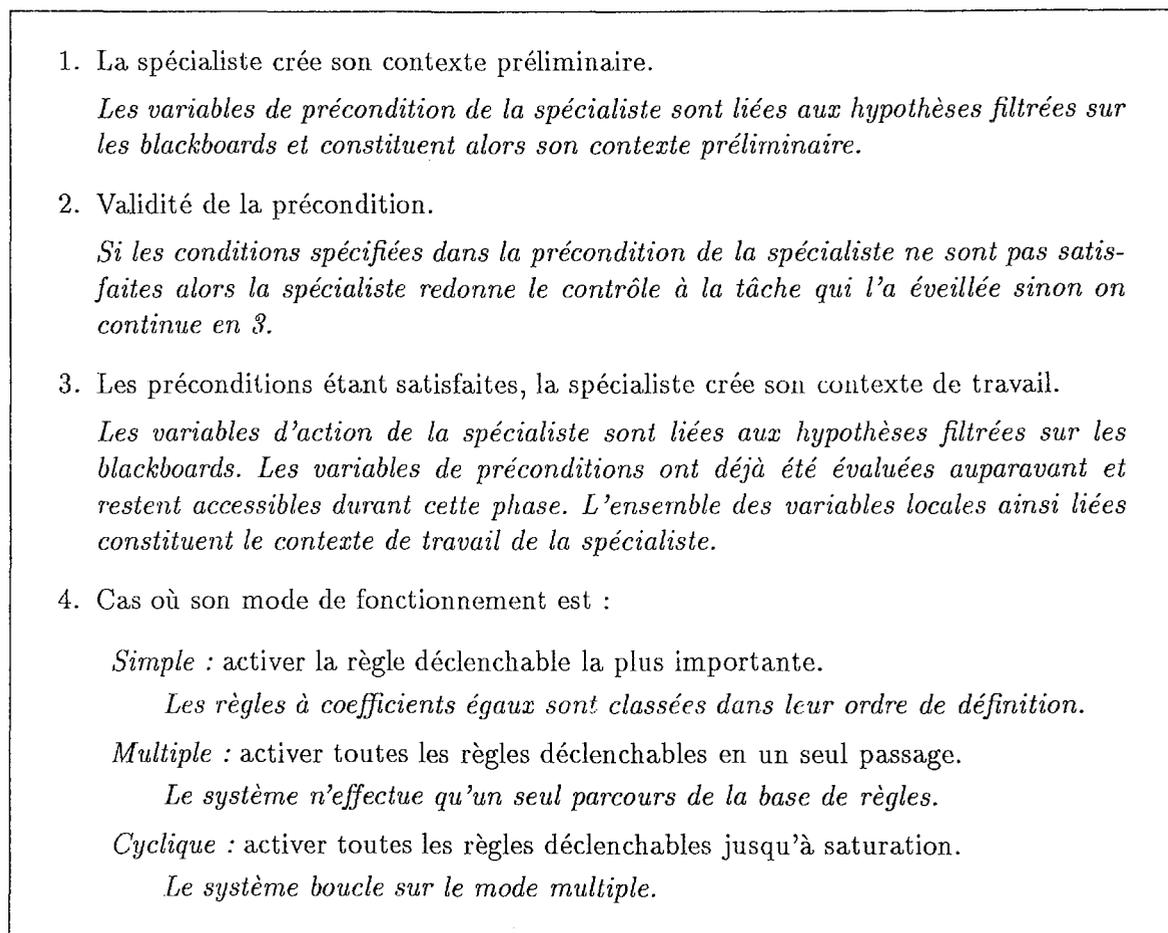


Figure 1.2. Activation d’une spécialiste.

1.1.3 Les actions d’une spécialiste

Les actions d’une spécialiste sur les nœuds des blackboards correspondent en fait aux actions décrites dans les parties “conditions” de ses règles. Il peut y avoir :

- création d’un nœud dans un blackboard donné, à un niveau donné,
- suppression d’un nœud donné,

- mise à jour de la valeur d'un attribut (ou d'un lien). Deux types de mises à jour sont à distinguer. Il est possible ou bien de supprimer les anciennes valeurs de l'attribut (ou du lien) et de les remplacer par les nouvelles, ou bien d'ajouter ces nouvelles valeurs aux anciennes.

Lorsqu'elle le juge nécessaire, la spécialiste prévient les tâches de ses actions. Cela se traduit par la création d'événements (un par action) qui sont propagés vers les tâches intéressées. Les événements sont alors stockés dans les *listes d'événements* des tâches qui souhaitent les accueillir.

Si ce sont les tâches qui ont la charge de déterminer le type des événements qui les intéressent, la décision de créer ou non un événement suite à une action sur les blackboards revient entièrement à la spécialiste. Il a en effet été estimé avec justesse, lors de la conception de ATOME, que la spécialiste est la mieux placée pour prendre une telle décision. Elle seule est à même de juger de l'importance d'une action, celle-ci se situant au niveau de l'expertise du domaine. C'est également elle qui indique la position relative à laquelle un événement qu'elle crée est rangé¹ dans la liste qui l'accueille. A titre d'exemple de position relative, nous pouvons citer le fait de placer tel événement *avant* tel autre, *après* un événement de tel type, ...

L'événement est donc un moyen de communication unilatéral entre les spécialistes et les tâches. Nous allons voir, en passant à la description des tâches, quelles sont les informations que les événements véhiculent et comment ces sources de connaissances les utilisent dans le contrôle qu'elles exercent sur les spécialistes.

1.2 Les tâches et leur structure de contrôle : la liste d'événements

Les *tâches* font partie du mécanisme de contrôle. Il s'agit de méta-sources de connaissances dont le rôle est d'effectuer un *contrôle local* sur un groupe de spécialistes en gérant l'ordre et l'instant d'intervention de celles-ci. Elles contiennent l'expertise permettant d'assurer cette coopération entre spécialistes, issue de l'analyse du savoir-faire de l'expert humain.

Les activations des spécialistes sont "programmées" en fonction de l'état d'avancement de la résolution du problème. La tâche doit donc évaluer cet avancement de manière à pouvoir choisir la ou les prochaines spécialistes à activer. Elle dispose d'une liste d'événements qui lui est propre, qu'elle consulte dans ce but. Cette liste répertorie tous les changements qui ont eu lieu dans les blackboards et qui sont susceptibles d'intéresser la tâche.

1. Autant le fait que ce soit la spécialiste qui décide de la création d'un événement nous semble pertinent, autant nous contestons que ce soit elle qui décide, relativement, de la place des événements dans une quelconque liste d'événements. Nous reviendrons sur ce point au chapitre 3 de cette partie.

1.2.1 Caractéristiques d'une tâche

La tâche comporte un certain nombre de constituants qui ont été regroupés dans la figure 1.3.

1. *Nom* : identification de la tâche.
2. *Filtre sur les événements* : caractérise les types d'événements qui intéressent la tâche.
3. *Variables locales* : variables locales de la tâche. Ces variables n'ont pas le même rôle que les variables locales des spécialistes. Elles aussi permettent de mémoriser une valeur ou un calcul intermédiaire mais elles ne constituent pas le contexte de travail principal de la tâche. Ce dernier est caractérisé par l'état de sa liste des événements locale au moment de son activation.
Ces variables sont visibles par les spécialistes qui sont sous la responsabilité de la tâche.
4. *Base de règles* : corps de la tâche.
5. *Mode de raisonnement* : indique si la tâche est dirigée par les événements, par les règles ou si elle est opportuniste.
6. *Mode de fonctionnement* : varie en fonction du mode de raisonnement de la tâche.

Tâche dirigée par les événements :

le mode de fonctionnement peut être simple, multiple, cyclique-simple ou cyclique-multiple.

Tâche dirigée par les règles :

le mode de fonctionnement peut être simple, multiple ou cyclique.

Tâche opportuniste :

il n'y a pas de mode de fonctionnement dans ce cas.

Figure 1.3. Caractéristiques d'une tâche.

Le filtre sur les événements est un prédicat portant sur les diverses parties constitutives d'un événement (cf. § 1.2.3). Un événement ne sera attiré vers une tâche que si ses constituants vérifient le prédicat associé à la tâche.

Elle comporte également une base de règles, les règles ayant le format "conditions/actions", et raisonne sur les actions (ou changements) survenus dans les blackboards. Ces changements étant matérialisés par les événements, une règle de tâche aura le profil de la règle-type présentée dans la figure 1.4.

La façon dont les règles sont examinées dépend du *mode de raisonnement* de la tâche. Celui-ci peut être de trois types. Dans le premier cas (raisonnement dirigé par les événements), on favorise la réaction aux événements jugés importants.

Dans le second (raisonnement dirigé par les règles), on donne la possibilité d'expli-

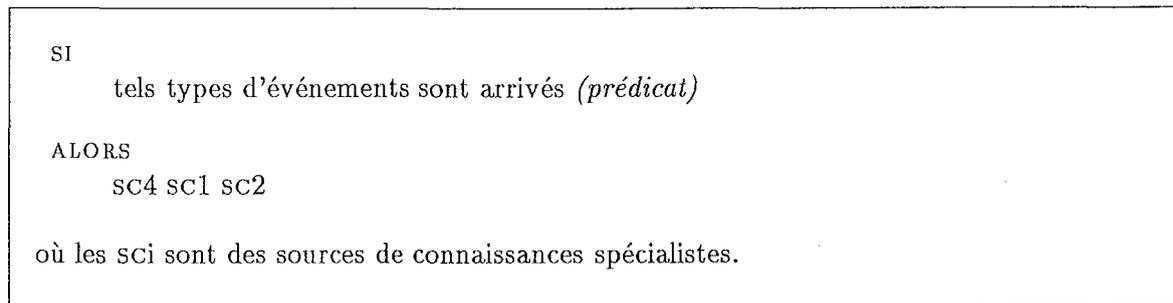


Figure 1.4. Règle typique d'une tâche.

citer *a priori* des enchaînements de raisonnement de spécialistes. L'ordre de parcours de la connaissance de contrôle est en effet fourni par les coefficients d'importance attachés aux règles. Ce raisonnement est adapté lorsqu'il est aisé d'explicitier un tel ordre de déclenchement.

Enfin, le raisonnement opportuniste permet de mettre en œuvre des spécialistes pour lesquelles on ne sait rien (ou pas grand chose) sur la façon de les enchaîner. L'ordre de déclenchement des spécialistes est alors "calculé" au moyen d'heuristiques évaluées au cours du raisonnement. C'est la possibilité de raisonner via des heuristiques qui auront plus ou moins de poids qui est ici mise en avant.

1.2.2 Fonctionnement d'une tâche

Il existe plusieurs modes de raisonnement pour les tâches. Il est ainsi possible de choisir celui qui s'adapte le mieux à la phase de résolution courante (principe d'une résolution multi-phase).

Pour chaque mode de raisonnement, on dispose de modes de fonctionnement qui permettent de spécifier le comportement de l'interprète. Ces modes sont détaillés ci-après.

a - Le raisonnement opportuniste

Ce mode de raisonnement est fondé sur la notion d'agenda et de priorité pour permettre un ordonnancement dynamique des spécialistes à exécuter.

Les règles de la tâche (cf. figure 1.4) prennent ici un autre sens. Alors que, en raisonnement dirigé par les événements ou par les règles, une liste de noms de spécialistes apparaissant en partie "actions" de règle signifie "déclencher séquentiellement ces spécialistes", en raisonnement opportuniste, cette même liste se contente de donner le nom de spécialistes pouvant fournir un travail potentiel. Il n'y a que désignation de candidates à un travail.

Lorsqu'un événement vérifie les conditions d'une règle de tâche, il y a construction de travaux potentiels. Il s'agit de couples "événement - spécialiste" appelés *ISPs* (Ins-

tances de SPécialiste). Les spécialistes sont celles dont les noms figurent dans la liste apparaissant en partie "actions" de la règle qui a été déclenchée. On crée ainsi autant d'ISPs qu'il y a de noms cités.

Ces ISPs sont les entités fondamentales d'un raisonnement en mode opportuniste. Celui-ci consiste en effet en une succession de cycles au cours desquels deux phases principales s'enchaînent : dans la première, il y a construction des ISPs ; dans la seconde, choix de celle qui sera activée. Nous décrivons un cycle de tâche opportuniste dans l'encadré de la figure 1.5.

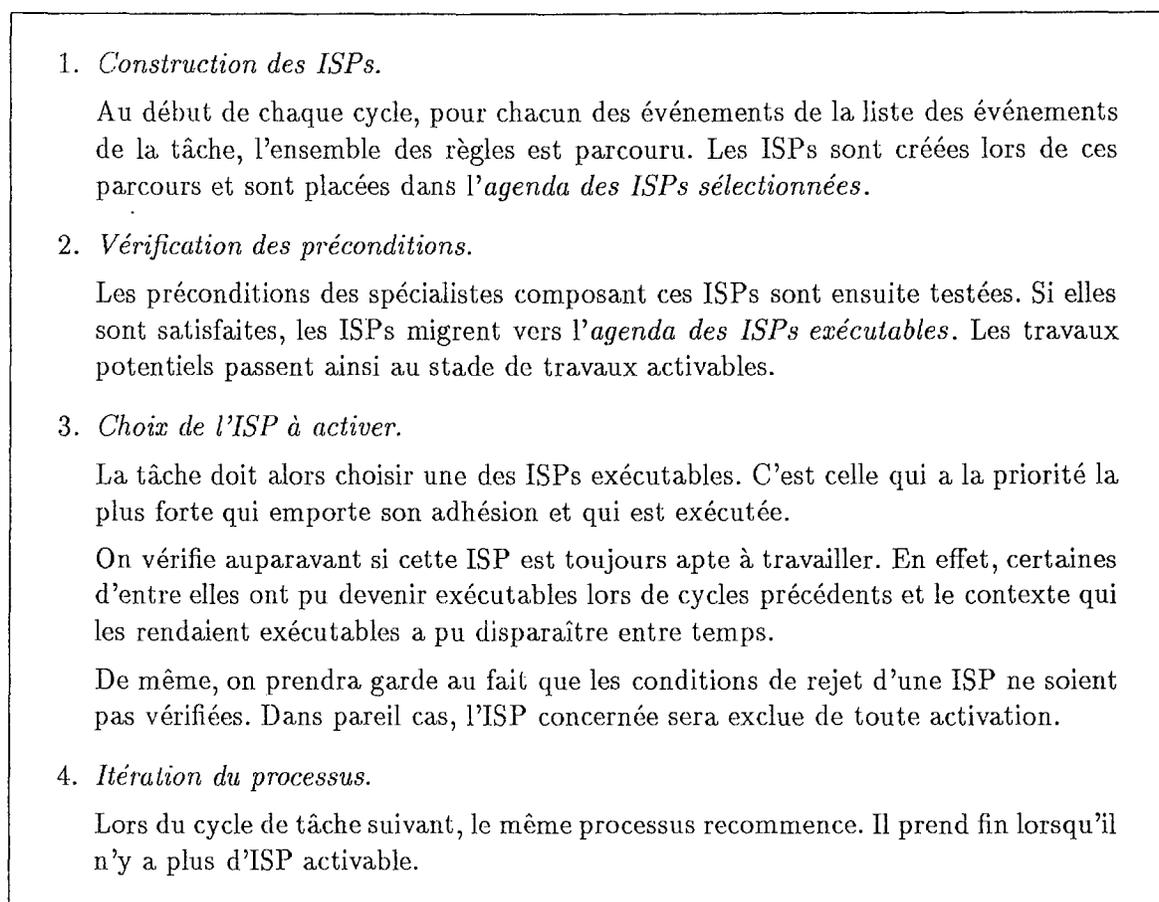


Figure 1.5. Cycle de base d'une tâche opportuniste.

Le choix d'une ISP exécutable pose le problème de savoir comment calculer sa priorité. Ce calcul fait intervenir un certain nombre de variables (dites variables de contrôle) au niveau des spécialistes, qui sont valorisées en fonction d'heuristiques propres à la spécialiste. La priorité est alors calculée par une *règle d'intégration*, fournie par la stratégie à la tâche, qui fait intervenir ces différentes variables.

La présence de ces règles d'intégration lors de l'activation d'une tâche opportuniste par la stratégie est illustrée sur la figure 1.9.

Ce mode de raisonnement complexe permet un contrôle souple mais coûteux en temps. Il permet néanmoins d'exprimer certains éléments du processus de contrôle à

appliquer aux spécialistes alors que celui-ci est encore méconnu ou mal connu. Cela peut notamment être le cas lors d'une phase de mise au point.

b - Le raisonnement dirigé par les règles

La tâche cherche à déclencher sa règle la plus importante avec le premier des événements contenus dans la liste qui lui est associée, celle-ci étant parcourue par ordre d'importance. Si les conditions de cette règle ne sont pas vérifiées, elle essaiera avec la deuxième règle la plus importante et ainsi de suite.

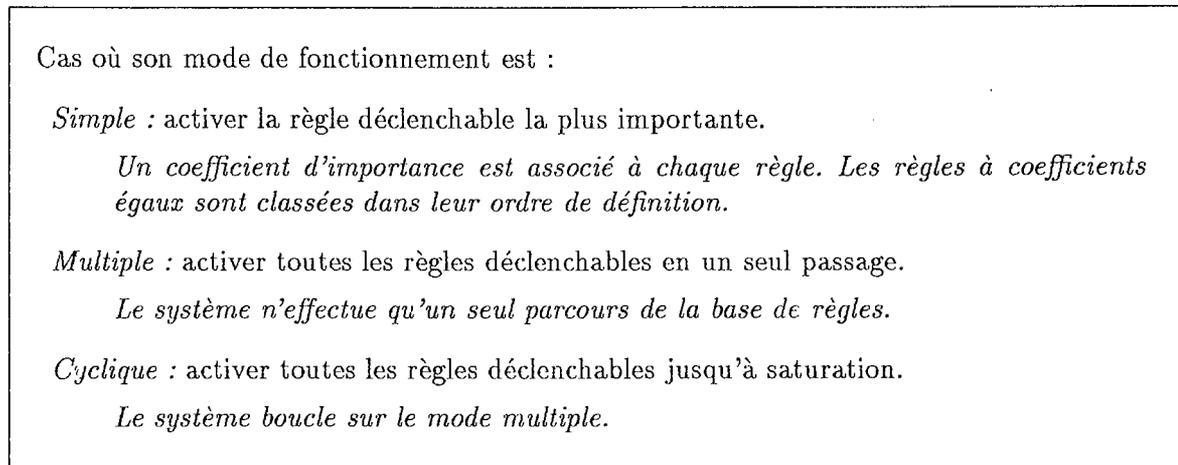


Figure 1.6. Algorithme d'activation d'une tâche dirigée par les règles.

Ce mode de raisonnement est semblable à celui de la spécialiste.

c - Le raisonnement dirigé par les événements

Ce dernier mode de raisonnement s'intéresse aux événements par ordre d'importance. Un classement relatif² entre événements est en effet établi dans la liste des événements d'une tâche. Ceux qui sont placés au début de la liste seront considérés comme étant plus importants que ceux placés en fin de liste. Dans la mesure du possible (c'est-à-dire à condition qu'un événement permette le déclenchement d'une des règles de la tâche), on essaiera de traiter les événements selon leur priorité.

Ce mode de raisonnement est modélisé via quatre modes de fonctionnement. Ceci est présenté dans la figure 1.7.

2. Nous qualifions ce classement de relatif car il dépend en fait des positions relatives que les spécialistes donnent aux événements qu'elles créent. Ainsi, il se peut parfaitement qu'une spécialiste veuille placer un événement qu'elle crée en tête d'une liste d'événements, parce qu'elle le juge primordial, et que celui-ci se retrouve en queue de liste. D'autres spécialistes peuvent en effet venir placer leurs propres événements avant.

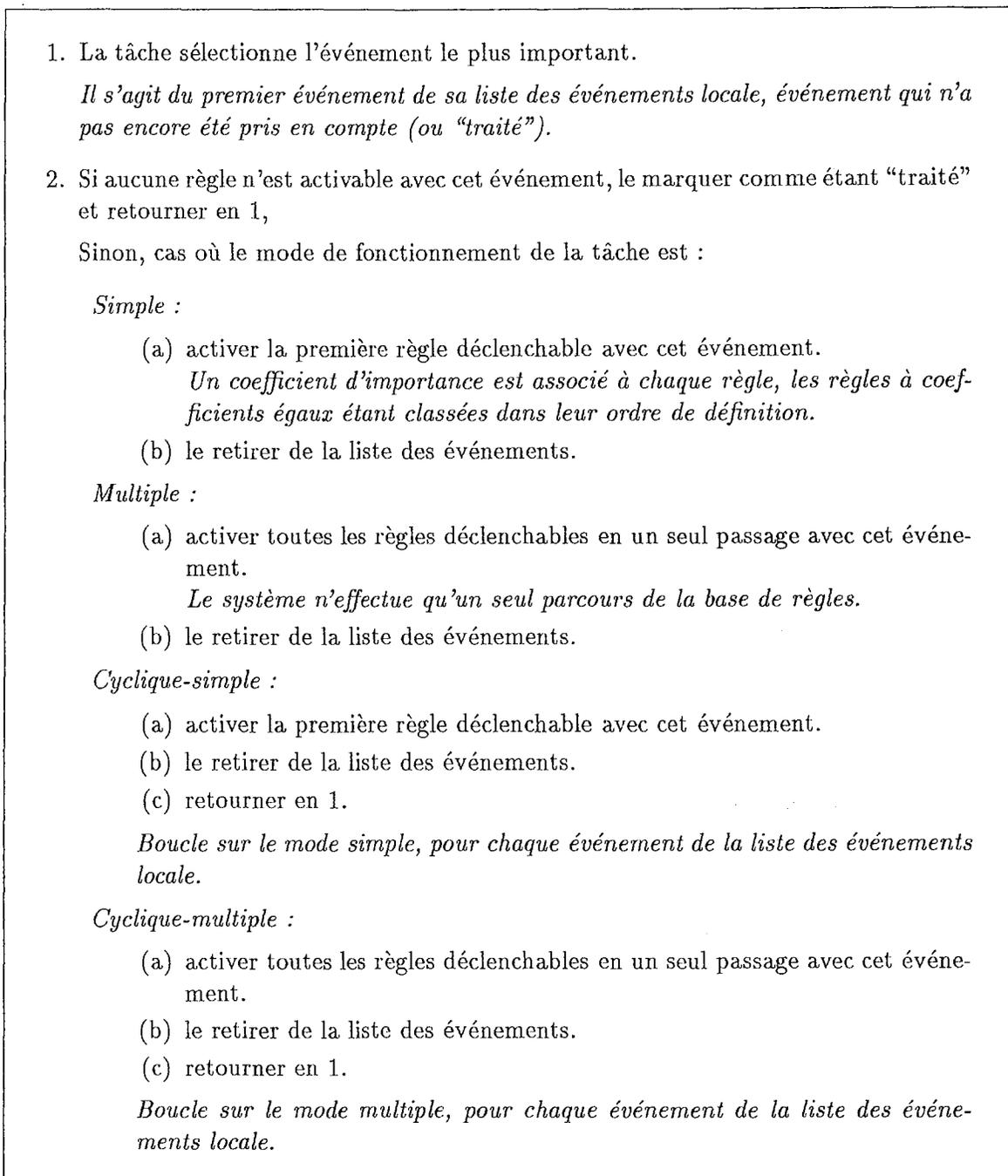


Figure 1.7. Algorithme d'activation d'une tâche dirigée par les événements.

1.2.3 La structure de contrôle associée

Nous avons vu, au paragraphe 1.1.3, qu'un événement est issu d'une spécialiste et permet à celle-ci de rendre compte de son travail. Il s'agit d'une entité complexe qui résume une action de la spécialiste sur un niveau donné d'un blackboard donné. Elle est définie par :

- le type de l'action (création, modification, remplacement ou suppression d'un nœud),
- le nœud sur lequel l'action a porté,
- le blackboard et le niveau où l'action a eu lieu,
- les attributs et/ou les liens qui ont été modifiés.

Cette structure a été retenue car elle est suffisamment abstraite pour que la tâche puisse se faire une bonne opinion de l'état d'avancement du processus de résolution.

Les événements sont regroupés dans une *liste d'événements*. Chaque tâche dispose de sa propre liste d'événements. Cela permet une efficacité accrue du contrôle car seuls les événements considérés comme intéressants par la tâche y figurent. Un événement n'est jugé intéressant que s'il peut faire en sorte que l'ordre ou l'instant d'intervention des spécialistes dépendant de la tâche soient modifiés.

Les mises à jour des listes d'événements des différentes tâches sont automatiquement assurées par l'interprète ATOME. Elles ont lieu :

- lors de la création d'un événement. Celui-ci est alors propagé vers les listes d'événements des tâches intéressées et y est classé en fonction de l'importance que lui a accordée la spécialiste qui l'a créé ;
- lorsqu'un événement a permis de déclencher une ou plusieurs règles (selon le mode de fonctionnement). Celui-ci est alors retiré de la liste d'événements de la tâche concernée. Cette opération correspond à une suppression définitive de l'événement.

1.3 La stratégie et ses résumés des blackboards

La *stratégie* constitue le niveau de contrôle le plus élevé et œuvre en tant que méta-source de connaissances qui fournit un contrôle global au système. Son rôle est d'assurer la coordination des tâches et de gérer leurs travaux en fonction de la qualité de la solution courante stockée dans les blackboards. Pour mesurer cette qualité, la stratégie dispose de structures de contrôle appelées *résumés des blackboards* qui lui offrent une vue globale et synthétisée de la configuration des blackboards.

1.3.1 Caractéristiques d'une stratégie

La stratégie est formée d'une base de règles de type conditions/actions dotées de coefficients d'importance. Tout comme pour les tâches, cette base de règles fait partie de ses caractéristiques, de même que son nom, son mode de fonctionnement et un ensemble de variables locales (cf. figure 1.8).

1. *Nom* : identification de la stratégie.
2. *Variables locales* : variables locales de la stratégie. Ces variables ont le même rôle que celles des tâches, le contexte de travail de la stratégie étant les résumés des blackboards.

Elles représentent en fait les variables globales du système et sont visibles par toutes les tâches et spécialistes.
3. *Base de règles* : corps de la stratégie.
4. *Mode de fonctionnement* : il peut être simple, multiple ou cyclique.

Figure 1.8. Caractéristiques d'une stratégie.

Le nom servant d'identificateur, il est possible de définir plusieurs stratégies. Cela peut se révéler utile en phase de mise au point du processus de résolution global du problème à traiter : on parvient ainsi, en essayant diverses façons de faire, à mieux cerner le mode de résolution adapté. Cependant, seule une de ces stratégies peut être utilisée au cours d'un raisonnement.

La stratégie passe en revue les règles qui composent sa base dans un ordre fixé par les coefficients d'importance associés aux règles. Une règle ne se déclenche que si des nœuds importants, présents dans un des résumés des blackboards, permettent de vérifier sa partie "conditions". Ce déclenchement se manifeste par l'activation d'une séquence de tâches. Une règle type de stratégie a donc le format de celle présentée dans la figure 1.9.

SI
 tels types d'hypothèses existent dans les résumés des blackboards

ALORS
 activer (TA1 . R1) TA2 TA3 (TA1 . R2)

où les TA_i sont des tâches et les R_i des règles d'intégration (cf. § 1.2.2).
 TA1 est donc une tâche opportuniste, contrairement aux autres tâches.

Figure 1.9. Règle-type de stratégie.

Nous pouvons constater que ce format est semblable à celui des règles de tâches : la

partie “conditions” teste sur les entités de la structure de contrôle associée; la partie “actions” active des sources de connaissances de niveau inférieur.

1.3.2 Structures de contrôle associées

Les structures de contrôle qui permettent à une stratégie de se faire une opinion sur l'état de la résolution en cours sont les *résumés des blackboards*. Ces divers résumés contiennent les nœuds qui sont considérés comme importants pour la suite du processus de résolution du problème. En fonction de ceux-ci, la stratégie orientera la résolution en sélectionnant une ou plusieurs tâches à activer séquentiellement.

Les nœuds importants ont la même structure que les nœuds classiques. Ils ne diffèrent en fait de ceux-là que par le statut d'entités importantes que la stratégie leur confère. C'est l'analyse de l'expertise du domaine qui permet d'identifier de tels nœuds.

1.3.3 Fonctionnement d'une stratégie

Les différents modes de fonctionnement de la stratégie se rapprochent de ceux d'une tâche dirigée par les règles ou encore de ceux d'une spécialiste. Les règles de la stratégie sont en effet examinées dans l'ordre décroissant de leurs coefficients d'importance, avec un mode *simple*, *multiple* ou *cyclique* :

- simple : la première règle dont les conditions sont vérifiées est déclenchée. L'exécution s'arrête ensuite.
- multiple : les règles dont les conditions sont vérifiées sont déclenchées par ordre d'importance. Lorsque l'ensemble des règles a été examiné une fois, l'exécution s'arrête.
- cyclique : le processus est le même que pour le mode multiple à ceci près que les règles sont réexaminées (on boucle sur le mode multiple). Lorsque plus aucune règle ne peut se déclencher, l'exécution s'arrête.

Nous avons rappelé, dans la partie I, le fonctionnement de la boucle de contrôle de base de ATOME. Nous nous intéressons dans le chapitre suivant à une partie de ce fonctionnement : le raisonnement des spécialistes.

2

Le raisonnement des spécialistes

2.1 Les problèmes rencontrés lors de la conception du système Rosy

Les sources de connaissances construites avec ATOME regroupent des connaissances correspondant à une compétence donnée. Ces compétences se regroupent et s'articulent autour d'une source de connaissances de niveau supérieur (tâche ou stratégie) qui les organisent de façon à construire une "sur-compétence" (compétence plus générale ou méta-compétence). Dans la modélisation que nous avons faite du travail de l'expert en voirie urbaine, on retrouve une telle gestion des compétences au niveau des tâches et de la stratégie ainsi que la structuration et la répartition des connaissances dans toute la hiérarchie. Seul le niveau du domaine, celui des spécialistes, échappe à la règle. La connaissance y est stockée "à plat", sans hiérarchisation ni structuration. Lorsqu'elle est activée, une spécialiste se contente, en effet, de passer en revue toute sa connaissance en bloc, dans un ordre qui a été défini *a priori* par le cogniticien. Elle dispose d'un mode de fonctionnement qui lui est propre et qu'elle applique uniformément à ses connaissances.

Le cogniticien utilise les possibilités de modélisation de la connaissance offertes par les spécialistes. Il doit non seulement mettre en lumière les savoir-faire experts mais aussi les modéliser en tenant compte de ces possibilités. Celles-ci étant limitées, il a tendance à rechercher un raisonnement suffisamment uniforme et général pour englober toutes les façons de faire de l'expert pour une compétence donnée. Il enferme de ce fait les raisonnements experts dans un carcan rigide et se console en se disant que "le raisonnement obtenu ne correspond peut-être pas tout à fait à la démarche experte mais qu'il a au moins le mérite de pouvoir être utilisé de façon systématique sur tout cas à traiter". En ce sens, une spécialiste ne fait qu'approcher le raisonnement expert. Celui-ci est en effet loin d'être systématique puisque, après observation, nous avons pu constater qu'il répond à des stimuli (visuels dans le cas du diagnostic).

Nous comparons, dans ce qui suit, le raisonnement expert et celui modélisé dans les spécialistes du système ROSY en analysant les différences entre les deux. Nous sommes alors à même d'identifier ce qui peut manquer aux spécialistes ou ce qui ne convient pas dans leur fonctionnement pour reproduire correctement un raisonnement expert.

2.1.1 Structuration et manipulation des connaissances

Les spécialistes construites avec ATOME rassemblent un ensemble de connaissances sémantiquement cohérentes, traitant d'une même compétence. A partir du moment où il y a rassemblement de connaissances sous une même étiquette (celle d'une compétence donnée), il semble pertinent de créer une fonction de gestion de cet amalgame de savoir. Une spécialiste est, au même titre qu'une tâche ou une stratégie, un amalgame de connaissances.

Afin de voir quelles doivent être les caractéristiques de cette "fonction de gestion", nous allons analyser une des compétences de l'expert : celle qui consiste à rechercher la cause d'une dégradation donnée. Celle-ci est modélisée, au sein du se ROSY, par la spécialiste *sp-rech-causes* de la tâche *diagnostic*. Cette spécialiste présente l'avantage de rassembler tous les problèmes de structuration et de manipulation de la connaissance rencontrés lors de la construction du système.

Trois concepts principaux entrent en jeu lors de cette phase de recherche de cause. Il s'agit des dégradations elles-mêmes, de l'ensemble des causes recensées, ainsi que des relations entre causes et dégradations. Le travail de l'expert consiste donc à identifier, parmi l'ensemble des causes en relation avec la dégradation en cours de traitement, la cause (dans le meilleur des cas) ou les causes ayant provoqué la dégradation. L'expert utilise dans ce but tout un ensemble de connaissances que nous avons pu, pour certaines d'entre elles et après étude, regrouper en différentes catégories. Nous pouvons citer, parmi d'autres, des connaissances :

- propres à chaque dégradation,
- communes à plusieurs dégradations,
- propres aux caractéristiques de la chaussée,
- propres à une cause ou un type de cause, ...

Ces catégories existent ; elles sont implicitement utilisées par l'expert au cours de son raisonnement. Cela laisse supposer qu'il existe une certaine organisation de la connaissance experte du domaine. Nous touchons ici à la première notion que nous souhaitons introduire dans ce paragraphe : celle de structuration statique de la connaissance. La connaissance experte peut être *a priori* découpée en ensembles sémantiquement cohérents, ensembles que l'expert manipule aisément au cours de son raisonnement. Dans la spécialiste (et dans toute spécialiste en général), qui dispose des mêmes connaissances que celles de l'expert traduites sous forme de règles de production, une telle structuration ne se retrouve pas.

La seule organisation que l'on puisse y trouver est un rangement en file, selon un ordre fixé par les coefficients d'importance associés aux règles. Ces coefficients, s'ils permettent aisément de traduire un ordre partiel extrait de l'analyse de la démarche experte, présentent l'inconvénient de fixer définitivement l'ordre de parcours de la connaissance. La spécialiste envisagera donc l'ensemble de ses connaissances, ce qui,

d'un point de vue expert, est une aberration. L'expert sent en effet automatiquement, en fonction du cas à traiter et de l'état d'avancement de la résolution du problème, de quelles connaissances il aura besoin, de quelles autres il pourra se passer. Il est capable de choisir les connaissances pertinentes, d'en occulter d'autres, en bref de se composer une palette de connaissances adéquate au cas à traiter et au problème courant à résoudre. Ainsi, lorsqu'il recherche la cause d'une dégradation donnée, il ne considère pas les connaissances concluant sur d'autres dégradations que celle en cours d'examen alors que son expertise en matière de recherche de causes ne se limite pas à cette seule dégradation. Inconsciemment, il écarte toute connaissance sur le sujet ne traitant pas de la dégradation. Il y a donc sélection de la connaissance pertinente parmi tout un amas de connaissances. Nous l'avons vu, la spécialiste est dans l'incapacité de manipuler ainsi les règles dont elle est composée, contrairement à ce que fait l'expert. Elle ne dispose pas de moyens de manipulation de ses connaissances et ne peut donc pas les contrôler dynamiquement. Manipulation et contrôle dynamique constituent la seconde notion importante de cette partie.

La troisième est celle de structuration dynamique de la connaissance, que nous allons mettre à jour en l'illustrant par la description de la démarche experte de recherche des causes d'une dégradation. Lorsque la cause de la dégradation à traiter ne lui saute pas aux yeux, l'expert procède par élimination. Nous avons ainsi pu identifier tout un ensemble de règles de rejet de causes¹. Une fois ces conditions de rejet appliquées, il faut récupérer dynamiquement toute connaissance encore susceptible de traiter le cas présent. Nous précisons "encore" susceptible car il s'agit, parmi toutes les connaissances propres à la dégradation, propres à la catégorie de la dégradation, propres aux causes, etc., de dégager les éléments valides pour la suite du raisonnement. Il faut en effet tenir compte du fait que des causes ont été rejetées et que toute bribe de connaissance se rattachant à ces causes doit être repérée et mise de côté. Les ensembles statiques définis antérieurement vont donc être fouillés pour en extraire les éléments pertinents tandis que d'autres connaissances, non regroupées en ensembles au préalable, vont être sollicitées. C'est en ces termes que la notion de structuration dynamique de la connaissance doit être entendue :

- ou bien le contenu d'un ensemble de connaissances, défini statiquement au départ (c'est-à-dire à l'initialisation du raisonnement), est modifié (restreint ou augmenté d'une autre bribe de connaissance déjà définie par ailleurs) en fonction du raisonnement en cours,
- ou bien l'ensemble n'existe pas au départ et est créé de toutes pièces² lors du raisonnement, en fonction des résultats courants de ce raisonnement. Il est à noter que de tels ensembles ne peuvent pas exister au départ puisqu'ils sont construits en fonction de conclusions intermédiaires produites au cours du raisonnement.

L'observation de la démarche experte nous conduit donc à conclure sur une certaine

1. Cet ensemble, au même titre que ceux dont nous avons parlé précédemment, est statique.

2. Notons qu'il n'y a pas création de connaissances en cours de raisonnement mais appariement et regroupement dynamiques de connaissances déjà définies (représentées dans les spécialistes sous forme de règles de production).

structuration de la connaissance experte du domaine, pouvant se faire *a priori* ou au cours du raisonnement. Dans ATOME, les spécialistes ne sont pour l'instant pas capables de telles structurations, faute de moyens d'organisation et de réorganisation de leurs connaissances. Ceci met le cognicien dans l'obligation d'alourdir les prémisses de leurs règles, avec tous les inconvénients que cela entraîne (manque de lisibilité des règles, difficulté de mise à jour et de maintenance des bases de connaissances, . . .) pour que le système se comporte extérieurement comme l'expert, c'est-à-dire parvienne aux mêmes conclusions.

2.1.2 Notion de focus

Comme nous l'avons vu précédemment, toute spécialiste passe en revue l'ensemble de ses connaissances pour résoudre un problème qui lui est soumis. Elle ne dispose en effet pas de moyens d'isoler ni de faire ressortir la connaissance pertinente. Il en résulte une contradiction : alors qu'une spécialiste perd du temps, au cours de son raisonnement, à considérer des connaissances dont l'utilisation n'a pas même effleuré l'esprit de l'expert, celui-ci va droit au but en adaptant sa connaissance au cas à traiter ; il sélectionne, reconfigure, réorganise ses connaissances en fonction de ce cas en se fondant sur ses méta-connaissances.

Ainsi, si une dégradation est située sur une zone fragile de la chaussée, il faut restreindre dans un premier temps la recherche de ses causes aux problèmes de mise en œuvre, ce qui suppose de restreindre l'espace de connaissances exploré. Si la recherche se révèle infructueuse, il est nécessaire de reconsidérer des connaissances qui avaient été volontairement et temporairement mises de côté.

De même, si l'expert a déjà quelques soupçons sur l'état de la fondation de la chaussée, il commence par analyser les éléments liés à la dégradation en cours de traitement susceptibles d'incriminer la fondation. Cela revient à mettre en avant une partie de la connaissance sélectionnée en matière de recherche de causes.

Il ne s'agit donc pas uniquement de structurer la connaissance en se donnant les moyens de le faire mais aussi de modifier le cours du raisonnement, de le réorienter en fonction de conclusions précédemment obtenues et du problème courant à résoudre. L'expert focalise sa compétence et un sous-ensemble de connaissances choisies sur le problème courant. Il avance pas à pas dans son raisonnement en se définissant des points de repère qui sont autant de focus autour desquels sa connaissance va se reconfigurer. Son savoir-faire est donc un ensemble de connaissances en mouvement constant, où des rapprochements vont être favorisés en fonction du problème à résoudre, où des groupes se font et se défont temporairement en fonction du focus courant. Il y a remise en cause permanente de la structuration de la connaissance, le focus servant de drapeau fédérateur autour duquel la connaissance se rassemble.

2.1.3 Un fonctionnement différent en fonction du focus

Parallèlement à cette réorganisation, il est nécessaire de réviser le mode d'utilisation des connaissances, tout comme le fait l'expert. Ce dernier, en effet, ne se contente

pas de sélectionner un sous-ensemble de connaissances en fonction d'un focus. Il adapte également la façon dont il va traiter ces connaissances. Prenons l'exemple de la spécialiste *sp-fond* qui modélise l'aptitude de l'expert à conclure rapidement sur l'état de la chaussée. Nous y trouvons des règles qui peuvent conclure définitivement, si la composition de la fondation est connue ou si la chaussée est bien déformée, ou qui apportent une première appréciation de l'état de la fondation en portant, sur la chaussée, un regard qui correspond au premier coup d'œil global de l'expert.

Ces règles, comme nous l'avons dit plus haut, sont traitées uniformément par la spécialiste qui ne dispose que d'un seul mode de fonctionnement. L'expert, lui, sait pertinemment que, si une des règles de la première catégorie est vérifiée, il ne cherchera pas à examiner les autres règles de la même catégorie (et encore moins celles de la seconde). Il sait que, au contraire, pour la seconde, il lui faudra analyser la moindre bribe de savoir car toutes sont susceptibles de fournir un élément supplémentaire utile à la résolution du problème. Dans le premier cas, les connaissances s'excluent mutuellement ; dans le second, elles se complètent. Il devrait donc être possible non seulement de sélectionner ou de masquer une partie de la connaissance d'une spécialiste mais aussi de manipuler ce sous-ensemble à l'aide d'un mode approprié et correspondant à la façon de faire de l'expert. Cela ne se retrouve pas dans la traduction de l'expertise qui a été faite dans *sp-fond*.

2.2 Ce qu'il faut

2.2.1 Nouvelles fonctionnalités nécessaires

Nous pouvons donc constater, dans ce qui précède, la différence entre le comportement de l'expert et celui d'une spécialiste (cf. la figure 2.1) : alors que l'expert choisit les connaissances et le schéma de raisonnement adapté au cas à traiter et aux stimuli reçus au cours du raisonnement, une spécialiste se contente d'un raisonnement homogène et standard, qu'elle applique invariablement à tout problème à traiter.

La structuration et la manipulation des connaissances, bien que déjà fort appréciable aussi bien du point de vue de l'acquisition que de la formalisation des connaissances, nécessite donc d'être étendue pour pouvoir représenter tous les méandres et toutes les subtilités d'un raisonnement expert. Les spécialistes doivent bénéficier de mécanismes pour organiser et manipuler leurs connaissances. Elles doivent pouvoir, à tout moment dans leur raisonnement, sélectionner les connaissances qui seront les plus efficaces et les plus adaptées à résoudre le sous-problème courant. Cela suppose donc d'adjoindre aux strictes connaissances du domaine, et au même niveau que celles-ci, des méta-connaissances qui serviront à orienter le raisonnement en mettant en avant ou, au contraire, en masquant temporairement une partie de la connaissance en fonction d'un focus donné.

Dotées de tels mécanismes, les spécialistes auront une vue sur leurs connaissances et deviendront de véritables "entités pensantes" alors qu'elles ne sont, pour l'instant, que des exécutantes. Le cognicien disposera, pour sa part, de sources de connaissances

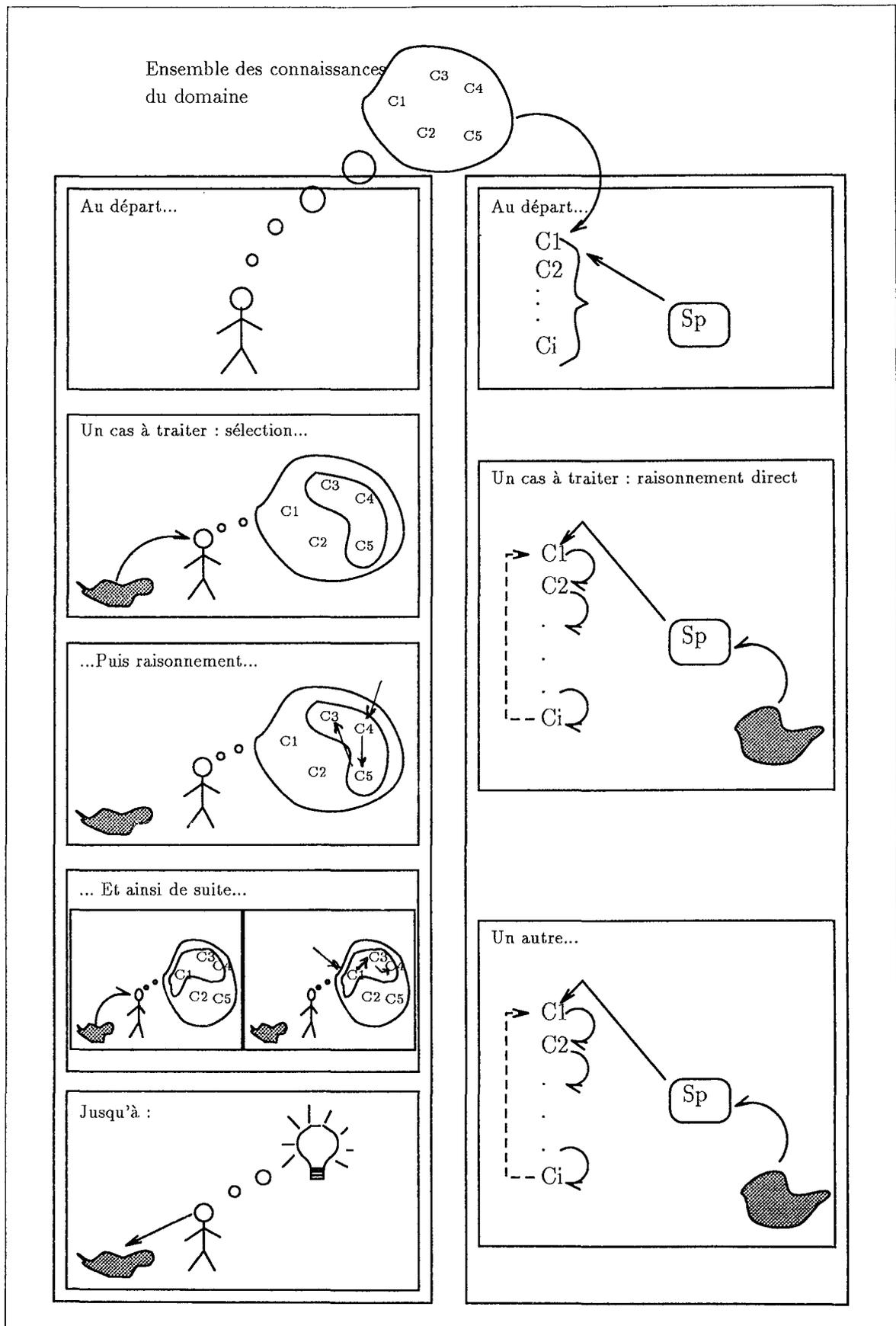


Figure 2.1. Différence entre le raisonnement de l'expert (colonne de gauche) et celui des spécialistes (colonne de droite).

“à la carte” qui lui permettront de représenter plus fidèlement le processus expert et d'en modéliser certaines stratégies fines.

2.2.2 **Autres solutions envisagées mais rejetées**

Une solution alternative consisterait à découper une spécialiste en plusieurs spécialistes (en se rapprochant de la notion de source de connaissances granulaire de BB1 [Hayes-Roth et Hewett 88]) plutôt que de lui donner les moyens de tout structurer, manipuler et contrôler. Une telle solution avait initialement été envisagée, puis fut rejetée, pour les raisons suivantes :

- un tel découpage n'est pas satisfaisant du point de vue sémantique. Il conduirait en effet à éclater une compétence et des connaissances homogènes en sous-compétences dont les limites ne sont pas vraiment connues puisque certaines sont constituées de façon opportuniste au cours du raisonnement. La notion de spécialiste dans le sens “expert dans un domaine donné de compétence” serait alors perdue ;
- par ailleurs, il faudrait remonter, depuis la spécialiste divisée jusqu'à la tâche dont elle dépend, les connaissances du domaine permettant d'activer les nouvelles spécialistes ainsi créées. La tâche hériterait ainsi de connaissances du domaine qui ne sont pas du même niveau d'abstraction que celles qu'elle a l'habitude de manipuler. Il lui faudrait alors gérer des spécialistes qui ne sont plus au même niveau et prendre des décisions qui ne relèvent pas du même degré de compétence ;
- la structure d'événements ne serait alors plus suffisante à la gestion de son comportement. En récupérant des connaissances du domaine, elle se verrait en effet dans l'obligation de consulter directement le blackboard, ce qui est contraire à sa vocation. Un palliatif consisterait alors à diviser un niveau du blackboard en plusieurs niveaux. Les événements retrouveraient ainsi leur fonction de structure de contrôle, chaque niveau créé étant susceptible d'en engendrer un. Le problème se reporterait sur les blackboards, faute de pouvoir hiérarchiser un niveau : un ancien niveau ne serait plus manipulable en tant que tel ;
- il pourrait alors être envisagé de pratiquer une scission de la tâche où réside l'incohérence. Cela produirait des tâches où la cohérence serait rétablie au sein même de chacune d'elles mais pas entre elles. On aurait en effet des tâches “à deux vitesses”, ne travaillant pas au même niveau d'abstraction et le problème de la gestion de telles sources de connaissances ne serait que reporté au niveau supérieur, celui de la stratégie ;
- ce découpage ne résoudrait toujours pas le problème de la structuration dynamique des connaissances. Il semble en effet impossible de “faire du dynamique” ainsi, à moins de définir une multitude de spécialistes aux connaissances redondantes, recouvrant tous les cas de regroupements dynamiques. Certaines

de ces spécialistes se résumeraient alors à une unique bribe de connaissance (une seule règle de production). Ce degré de granularité serait trop fin pour que les spécialistes soient encore considérées comme des agents “intelligents” [Ferber et Ghallab 88]. De plus, il est beaucoup plus difficile de chercher à répertorier de façon exhaustive tous les regroupements possibles et de les matérialiser concrètement par des spécialistes prédéfinies que de les désigner dynamiquement. Il y aura toujours des cas omis et une incapacité du système à résoudre le problème qui lui est soumis.

Aussi, pour préserver la sémantique des différentes sources de connaissances, leurs divers niveaux d'abstraction, leur caractère “intelligent” et éviter leur morcellement, est-il plus judicieux de structurer “par le bas”. La structuration peut en effet s'y faire à une profondeur sans limite et variant en fonction du cas à traiter, jusqu'à atteindre l'ultime grain de connaissance : la règle de production.

Il apparaît ainsi nécessaire de fournir aux spécialistes la possibilité d'influer sur leurs connaissances en leur permettant de modifier l'ordre dans lequel celles-ci interviennent, la façon dont elles interviennent et de choisir celles qui interviennent. Nous allons montrer, dans ce qui suit, comment nous avons modifié ATOME de façon à enrichir son potentiel de représentation des connaissances au niveau des spécialistes. Auparavant, nous présenterons diverses solutions qui ont été apportées pour résoudre ce problème fondamental dans la conception d'un système à bases de connaissances.

2.3 Les solutions proposées par d'autres systèmes

Nous nous centrons sur des générateurs de systèmes experts à architecture classique ou à architecture de tableau noir, renfermant des connaissances exprimées dans le formalisme des règles de production. Souvent, la base de règles forme un ensemble immuable duquel s'extrait l'ensemble de conflit. Cela exclut la possibilité de résolution opportuniste du problème, si ce n'est par la phase de “résolution de conflit”. Cette phase s'appuie sur des heuristiques diverses, la plupart du temps choisies par le concepteur à la création du système ou programmées ou encore sélectionnées par l'utilisateur averti lors de l'utilisation du système. Une telle solution permet la sélection de la règle (ou des règles dans le cas d'inférences parallèles) parmi l'ensemble des règles possibles mais sans restriction pertinente de cet ensemble.

Un certain nombre de solutions au problème de la structuration des connaissances peuvent être adoptées :

1. gestion des ensembles pendant l'exécution par des méta-opérations explicites ou par des méta-règles qui permettent l'exploitation au mieux des connaissances de la base. Cependant, le cognicien n'a pas pour autant à sa disposition un moteur d'inférence dont le fonctionnement change en fonction des connaissances sélectionnées ;
2. mécanisme d'agenda dynamique qui permet d'explorer des hypothèses alternatives ou de rediriger le focus à tout instant. Une implantation de ce mécanisme

peut se faire, dans une représentation par objets, par l'intermédiaire de segments, eux-mêmes constitués de contextes, classes et sous-classes. Chaque contexte peut de plus être affecté d'un coefficient de priorité. Une telle méthode permet de hiérarchiser les segments ou de se focaliser sur une partie de la connaissance ;

3. utilisation de méta-connaissances gérant les mécanismes d'héritage multiple lorsque la connaissance inclut un formalisme objet. Il est possible de considérer une telle méthode comme heuristique mais elle impose de donner par exemple un ordre de priorité sur les "classes-parents" pour spécifier de laquelle va hériter l'objet concerné. Cette priorité peut être traduite par une variable, ce qui lui permet de changer au cours du raisonnement ;
4. étude expérimentale permettant de déterminer les règles les plus utilisées et faire en sorte, ensuite, que ces règles soient essayées en priorité, ceci dans un système d'ordre 1. Cette méthode permet, durant une consultation donnée, de faire bénéficier le moteur des expériences passées pour changer l'ordre dans lequel les règles sont envisagées et de changer l'ordre des buts dans le séquençement des instanciations ;
5. définition de "blocs", faits structurés traduisant la décomposition de buts en sous-buts. Un bloc se caractérise par le contexte dans lequel la résolution va s'effectuer. Ce contexte peut être fixe ou peut évoluer. Des contraintes contrôlent l'accès à un bloc qui n'est possible que si elles sont vérifiées. La notion de bloc itérable permet d'effectuer des itérations sur un problème ;
6. mise en valeur d'une base de règles comme une instance d'un objet générique. La base peut être définie comme un ensemble de règles explicites (définition en extension) ou comme le résultat d'opérations ensemblistes sur d'autres bases (définition en compréhension). Souvent, dans de telles implantations, une base de règles, à un instant donné, se trouve dans l'un des trois états suivants : active, en veille, en sommeil ;
7. prise en compte de liens entre règles de façon à partitionner la base en îlots de connaissances. Deux types de liens en particulier peuvent être cités :
 - les liens forts, déterminés automatiquement par le système et qui associent (de façon transitive) des règles partageant des faits communs, aussi bien en partie prémisses qu'en partie action ;
 - des liens faibles précisés par le concepteur. Ce dernier type de liens permet d'indiquer qu'une hypothèse fait partie du contexte d'une autre et de relier, par cette notion de contexte, des ensembles de connaissances autonomes mais non totalement indépendants.

L'énoncé "une fois que l'hypothèse H1 est vérifiée, il est intéressant d'établir l'hypothèse H2" est un exemple de lien faible. Il se traduit ainsi par la mise de H2 dans l'agenda comme nouveau but à poursuivre.

Les liens forts agrègent des îlots de connaissances ; les liens faibles relient ces îlots entre eux et permettent de séquencer des raisonnements de nature locale à l'intérieur de la démarche globale. Une telle technique favorise l'implantation de raisonnements non monotones par exemple ;

8. utilisation d'heuristiques permettant un fonctionnement opportuniste, comme dans les systèmes à tableau noir. Cependant, ce fonctionnement n'est pas géré de manière explicite dans les règles. Par ailleurs, la structuration des connaissances n'est pas véritablement modulaire du fait du caractère plus syntaxique que sémantique de la notion de source de connaissances, ces dernières étant souvent constituées d'ensembles de règles de petite taille comme c'est le cas dans BB1 [Hayes-Roth et Hewett 88].

L'énumération qui précède présente deux aspects du problème qui nous intéresse :

- d'un côté, nous avons tout ce qui concerne les moyens de structurer la connaissance. Les notions d'ensembles, de blocs, de bases de règles, instances d'objet génériques, sont notamment citées ;
- de l'autre, l'utilisation et le contrôle des connaissances (méta-opérations, agendas dynamiques, méta-connaissances dans les objets, utilisation statistique de la connaissance, contraintes d'accès aux blocs évoqués ci-dessus, heuristiques, ...).

Les différentes approches ont été regroupées dans le tableau ci-dessous. Il indique si l'approche apporte ou non des solutions, même partielles, aux différents problèmes soulevés au chapitre 2.1, à savoir structuration statique, structuration dynamique, manipulation, existence d'un focus autour duquel la connaissance se réorganise et modification du comportement du moteur en fonction du focus courant. Les indications qu'il fournit sont valables dans le cas général et peuvent ne pas correspondre aux caractéristiques, vis-à-vis de la résolution de ces problèmes, d'un système particulier relevant d'une des approches.

Approches	Struct. statique	Manipulation	Struct. dynamique	Focus	Comportement du moteur variable
1	+	+		+	-
2		+	+	+	-
3					
4	-				-
5	+	-	-	+	-
6	+	+	-		-
7		+		+	-
8	-	-	-	-	-

Les "+" (respectivement, "-") indiquent que le problème est (respectivement, n'est pas) résolu par l'approche concernée ; les blancs indiquent qu'il n'est pas possible de se prononcer.

Nous pouvons constater que ces approches abordent, pour certaines d'entre elles, les notions de structuration statique et de contrôle, pour d'autres, celle de structuration dynamique. La notion de focus est parfois également présente. En revanche, l'aspect de "modification du comportement du moteur par rapport au focus courant" (c'est-à-dire modification du mode de raisonnement) est absent. La solution que nous avons adoptée s'attache à prendre en compte toutes ces notions. Elle est présentée au paragraphe suivant et coïncide, par certains côtés, avec une partie des caractéristiques des approches évoquées ci-dessus.

2.4 Ce que nous proposons

Les insuffisances constatées au paragraphe 2.1 de cette partie ont conduit au développement d'un nouveau moteur pour les agents spécialistes de ATOME. Il s'agit d'un moteur d'ordre 1 qui comporte de nombreux paramètres que l'utilisateur est en droit de positionner comme il l'entend, dans le but de produire des comportements suffisamment variés pour couvrir une large gamme de raisonnements experts [Ferraris *et al.* 91]. Il dote également les spécialistes de mécanismes de structuration et de contrôle de leurs connaissances. Il est notamment possible, en cumulant les deux aspects (c'est-à-dire comportement paramétrable du moteur et structuration et utilisation des connaissances), de sélectionner un sous-ensemble de connaissances adéquates au problème courant à traiter et de leur appliquer un mode de fonctionnement particulier, défini à l'aide des paramètres du moteur. Les raisonnements experts peuvent ainsi être mieux modélisés. En cela, il répond aux besoins soulignés au paragraphe 2.2. Du fait de la structuration dynamique des connaissances qu'il autorise, ce moteur n'offre pas de possibilités de précompilation de règles telles que ce qui est proposé par un RETE ou un TREAT.

Ce nouveau moteur fait l'objet de la suite de ce chapitre 2. Nous présentons tout d'abord la façon dont les connaissances y sont structurées ainsi que les outils qui permettent leur organisation et leur gestion. Nous décrivons ensuite son fonctionnement en introduisant les paramètres qui le déterminent. Nous sommes alors en mesure de voir comment les deux aspects s'articulent autour de la notion de "règles utilisables". Enfin, nous rappelons les intérêts de ce moteur et voyons en quoi il pourrait être amélioré.

Notons que ce moteur est issu d'un travail en commun. Nous en avons fait une première spécification suite aux problèmes que nous avons rencontrés dans la réalisation du se ROSY. Ces spécifications avaient par la suite été soumises à concertation, discutées avec d'autres personnes travaillant sur ATOME en fonction des problèmes qu'elles-mêmes rencontraient et enrichies avant d'aboutir au développement du moteur (qui a débuté dans le cadre d'un projet de DESS IA). Aussi tenons-nous ici à remercier toutes les personnes qui ont contribué à cette réalisation, principalement Vincent Chevrier et Frédéric Warin.

2.4.1 Structuration des connaissances en ensembles de règles

La sélection des connaissances adéquates à un moment donné du raisonnement passe tout d'abord par la structuration de ces connaissances. Nous avons donc envisagé des regroupements dynamiques ou non de règles au moyen *d'ensembles* ou *paquets* de règles. La construction de ces ensembles peut précéder le raisonnement ou lui être concomitante. Elle peut être explicite ou implicite. Nous présentons ci-dessous ces différents aspects de la structuration. Nous voyons ensuite comment ils sont matérialisés en décrivant les paquets de règles, tels qu'ils ont été implantés dans ATOME.

a - Structuration avant l'activation d'une spécialiste

La connaissance peut être partitionnée en ensembles sémantiquement cohérents. Ainsi, au paragraphe 2.1.1, nous avons mis à jour, pour la spécialiste *sp-rech-causes*, des connaissances de diverses catégories (propres à une dégradation, propres à une cause, ...). C'est autour de ces catégories que les connaissances vont être regroupées, dans des ensembles dits *explicités*. Ces ensembles sont effectivement construits, ceci en désignant *a priori* leur contenu. Ils ont une existence physique d'où le terme d'ensemble explicite. Les connaissances y sont rangées en fonction de thèmes fédérateurs, connus par avance et fournis par l'expertise, qui feront office de focus au cours du raisonnement. Le cognicien pourra, par exemple, souhaiter construire "un paquet qui rassemble tout ce qui est connu sur la dégradation appelée affaissements" et réaliser une telle construction.

Ces paquets explicitement construits *a priori* répondent à la notion de structuration statique de la connaissance abordée en 2.1.1. Ils sont attachés à une spécialiste et sont, de ce fait, inaltérables : même s'il sont modifiés au cours du raisonnement, ils retrouvent leur configuration initiale à toute nouvelle activation de la spécialiste.

Une méta-opération de construction (cf. § 2.4.2) permet de les créer et leur confère, de ce fait, la structure d'ensemble de règles présentée ci-après.

b - Structuration au cours de l'exécution

Nous avons introduit la notion d'ensembles dynamiques pour répondre au problème de structuration dynamique des connaissances soulevé en 2.1.1. Construits explicitement ou implicitement au cours du raisonnement, ces ensembles vont permettre de mettre en avant une partie de la connaissance à un moment opportun. Les connaissances pertinentes sont désignées en fonction de l'état d'avancement du raisonnement et de la nouvelle orientation que l'on souhaite faire prendre à celui-ci (notion de focus courant).

On distingue les paquets explicites (dont la construction est effective) des paquets implicites. Les premiers existent physiquement : ils sont construits et il est de ce fait possible de les manipuler. Cela revient à traiter tout un groupe de connaissances comme une seule entité, à partir du moment où la construction a lieu jusqu'à la fin du

raisonnement de la spécialiste. Tout comme les paquets explicites définis avant le début du raisonnement, c'est une méta-opération de construction qui assure leur création.

Les seconds, au contraire, n'ont pas d'existence physique à proprement parler : ils ne sont pas explicitement créés pour être ensuite activés mais ne sont qu'un moyen de distinguer certaines règles à un instant donné, de les pousser sur l'avant-scène. Ils sont en fait des entités fictives qui n'ont le nom de "paquet" que parce qu'ils remplissent la même fonction de rassemblement de la connaissance que leurs homologues explicites. Ils ne sont pas construits (ils ne font donc pas appel à la structure d'ensembles de règles présentée ci-dessous) mais seulement activés par une méta-opération d'activation (cf. § 2.4.2).

Ces deux types de paquets sont en fait équivalents, à une création près. L'écart entre les deux correspond à la différence qui peut être faite entre :

Créer le paquet qui regroupe telle et telle règles puis activer ce paquet.

et

Activer telle et telle règles.

On choisira plutôt l'un que l'autre en fonction de critères tels que leur "durée de vie"³ ou la possibilité de manipuler tout un bloc de connaissance.

Dans un cas comme dans l'autre, les regroupements sont à caractère temporaire :

- les paquets explicites existent depuis l'instant de leur création au cours de l'activation d'une spécialiste mais disparaissent dès que celle-ci termine son raisonnement ;
- ne matérialisant qu'un regroupement local au raisonnement courant, les paquets implicites n'existent en fait que le temps de l'activation de la règle qui les désigne. Ils ne sont par ailleurs pas manipulables.

c - La notion d'ensemble de règles

Un ensemble de règles est une structure qui permet de regrouper des connaissances ayant des caractéristiques communes. Il permet de représenter les paquets explicites vus ci-dessus. Les propriétés qui le définissent sont présentées dans la figure 2.2.

Les règles et les paquets étant définis indépendamment de toute spécialiste dans la version moteur d'ordre 1 de ATOME⁴, le nom de la spécialiste de rattachement doit être mentionné dans chacune de ces entités de façon que chaque spécialiste puisse récupérer les connaissances qui la composent. Ce nom est implicitement lié à la spécialiste en cours d'activation si le paquet est créé à ce moment-là.

Pour ce qui est de la désignation des règles composant un paquet, nous avons opté pour l'utilisation d'un prédicat que l'on appliquera à toute règle de la spécialiste. Ces prédicats portent sur les différents champs constitutifs d'une règle, répertoriés dans la

3. Le paquet explicite étant créé, il acquiert une certaine "durée de vie", ce qui n'est pas le cas du paquet implicite.

4. Le formalisme de ce nouveau moteur est en cela différent de celui du moteur d'ordre 0⁺. Dans ce dernier, les spécialistes sont dotées d'un champ où les règles sont exprimées.

1. *Nom* : identification du paquet.
c'est par ce nom que la manipulation du paquet se fera.
2. *Spécialiste de rattachement* : nom de la spécialiste à laquelle le paquet appartient.
3. *Description des règles* : il s'agit d'un prédicat portant sur les caractéristiques des règles. Une règle de la spécialiste de rattachement ne peut appartenir au paquet que si ses caractéristiques vérifient le prédicat.

Figure 2.2. Propriétés caractéristiques d'un ensemble (ou paquet) de règles.

figure 2.3. Nous avons donc défini des fonctions d'accès à chacun de ces constituants. L'utilisateur en dispose et peut ainsi composer des fonctions de sélection variées.

1. *Nom* : nom de la règle.
2. *Spécialiste de rattachement* : nom de la spécialiste à laquelle la règle appartient.
3. *Conditions* : prémisses de la règle.
4. *Actions* : partie "actions" de la règle.
5. *Coefficient d'importance* : coefficient d'importance de la règle. Il est utilisé pour indiquer un ordre sur les règles.
6. *Fonction utilisateur* : cette fonction est déclenchée après vérification des conditions de la règle et avant l'activation de sa partie "actions". Elle peut notamment être utilisée pour tout ce qui est interface avec l'utilisateur, de façon à dégager la partie "actions" d'un code parasite ne concernant pas la connaissance à proprement parler.
7. *Fonction de trace* : il s'agit d'une fonction permettant de fournir une trace du déclenchement de la règle. Il est ainsi possible de suivre le raisonnement pas à pas, ce qui est appréciable en phase de mise au point.

Figure 2.3. Caractéristiques d'une règle.

Cette solution nous a paru plus souple que la définition *a priori* des fonctions figées de sélection de règles. L'utilisateur est ainsi en mesure de définir toutes sortes de fonctions de sélection, sans aucune limitation imposée par le formalisme ATOME, en complément de celles qui lui sont proposées dans une bibliothèque ATOME et qui sont, en quelque sorte, prédéfinies. Ces fonctions prédéfinies sont en fait le résultat de l'adjonction aux premières fonctions pressenties (fonctions jugées indispensables telles que, par exemple, un test sur le nom d'une règle ou sur la présence d'un attribut donné en partie "conditions" ou "actions" de règles) de toutes les fonctions génériques qui

ont été définies par les divers utilisateurs de ATOME au CRIN. Notre bibliothèque a été alimentée par ces fonctions. A titre d'exemples, nous pouvons citer des fonctions recherchant les règles :

- qui concluent sur un attribut donné (test sur la partie "actions" de la règle),
- qui modifient ou remplacent un attribut donné (test sur la partie "actions" de la règle),
- qui renforcent ou diminuent le coefficient de vraisemblance d'un attribut donné (test sur la partie "actions" de la règle),
- dont la partie "conditions" porte sur un attribut donné ou un niveau donné,
- dont le coefficient d'importance est supérieur à une valeur donnée,
- dont le nom a telle et telle caractéristiques,
- ...

Tout cela va dans le sens des choix qui ont été faits pour le nouveau moteur : obtenir un moteur ouvert, souple, totalement paramétrable et contrôlable par l'utilisateur. Ce dernier dispose d'un grand degré de liberté et ne risque pas d'être stoppé par un fonctionnement figé. Nous verrons que les solutions retenues pour le fonctionnement du moteur d'inférence et pour la méthode de résolution de conflit répondent aux mêmes critères.

2.4.2 Gestion des connaissances et du raisonnement par méta-opérations

Les méta-opérations sont des fonctions permettant d'organiser la connaissance et d'agir sur le raisonnement. La spécialiste va ainsi transmettre des ordres à ses connaissances au travers des règles où ces fonctions interviennent, qui font alors office de méta-règles représentant des méta-connaissances. Nous avons retenu ces fonctions pour diverses raisons :

- elles permettent tout d'abord de jouer aussi bien sur la connaissance que sur le raisonnement ;
- elles interviennent ensuite dans les règles, en partie droite, au même titre que n'importe quelle autre fonction ATOME. La façon dont sont codées les connaissances de la spécialiste peut donc être réutilisée pour les méta-connaissances qu'elles permettent de modéliser. Le formalisme de représentation de la connaissance conserve ainsi son homogénéité ;
- enfin, elles n'introduisent pas de niveau au-dessus de la connaissance du domaine d'une spécialiste, ce qui pour nous est un avantage. Elles concernent en effet elles-mêmes une certaine connaissance du domaine. Il est donc naturel de les

voir intervenir dans des règles situées au même niveau que les autres et de ne pas leur appliquer un traitement particulier. Elles interviendront alors, si besoin est, à un moment opportun dans le raisonnement, se contentant de mettre en avant une partie de la connaissance. En aucun cas elles ne doivent régir de façon absolue les connaissances du domaine. Celles-ci doivent en effet pouvoir être indépendantes d'une méta-opération et non lui être assujetties.

Il nous semble que cela correspond à la façon dont les connaissances sont organisées chez l'expert : il lui arrive de faire appel immédiatement à des méta-connaissances pour résoudre un problème mais il peut également très bien utiliser directement des connaissances de base. Il semble donc préférable que les règles soient placées toutes sur le même plan.

Nous avons défini différents types de méta-opérations. Nous les présentons dans la suite de cette partie, avant de voir succinctement quelle est leur portée au sein d'une spécialiste.

a - Description des différentes méta-opérations

Pour plus de clarté, les méta-opérations décrites ici ont été regroupées en trois catégories : les fonctions intervenant sur les paquets de règles, celles agissant sur les règles elles-mêmes et celles permettant d'activer un sous-ensemble de la connaissance globale de la spécialiste. Elles ont en charge :

- dans la catégorie "actions sur les paquets de règles",
 - la construction des paquets de règles (cf. la structure d'un paquet, figure 2.2), avant l'activation d'une spécialiste ou en cours d'activation ;
 - l'adjonction d'une ou de plusieurs règles à un paquet ;
 - le retrait d'une ou de plusieurs règles d'un paquet.

Toutes ces fonctions mettent en jeu et matérialisent la notion de paquet explicite vue au paragraphe 2.1.1. Une modification sur un paquet (adjonction ou retrait de règles) ne peut en effet avoir lieu que sur une entité concrète. La façon dont les règles sont désignées est également commune aux trois fonctions : elle se fait, comme cela a été précisé lorsque nous avons vu la structure d'un paquet au paragraphe 2.4.1, par l'intermédiaire d'un prédicat testant les différents champs d'une règle. Il est notamment possible, en appliquant des opérateurs logiques sur ces prédicats, de simuler des opérations ensemblistes sur les paquets ;

- dans la catégorie "actions sur les règles",
 - le masquage d'une règle et son opération inverse, le démasquage,
 - la modification du coefficient d'importance attaché à une règle,
 - le démarquage d'une règle.

Le masquage consiste à faire “disparaître” une règle. A la différence de l’opération de retrait de la catégorie “actions sur les paquets” (les différences entre ces deux fonctions sont schématisées sur la figure 2.4), cette disparition n’est que logique et peut-être effectuée sur n’importe quelle règle, qu’elle appartienne ou non à un paquet. Le retrait est, lui, une opération concrète : le paquet est *physiquement* modifié. Une autre différence réside dans le fait que toute règle ôtée d’un paquet est toujours présente dans l’ensemble des règles potentiellement déclenchantes alors qu’une règle masquée ne l’est plus. Le masquage correspond donc à un genre de statut “être présente/être absente” qui serait conféré à une règle.

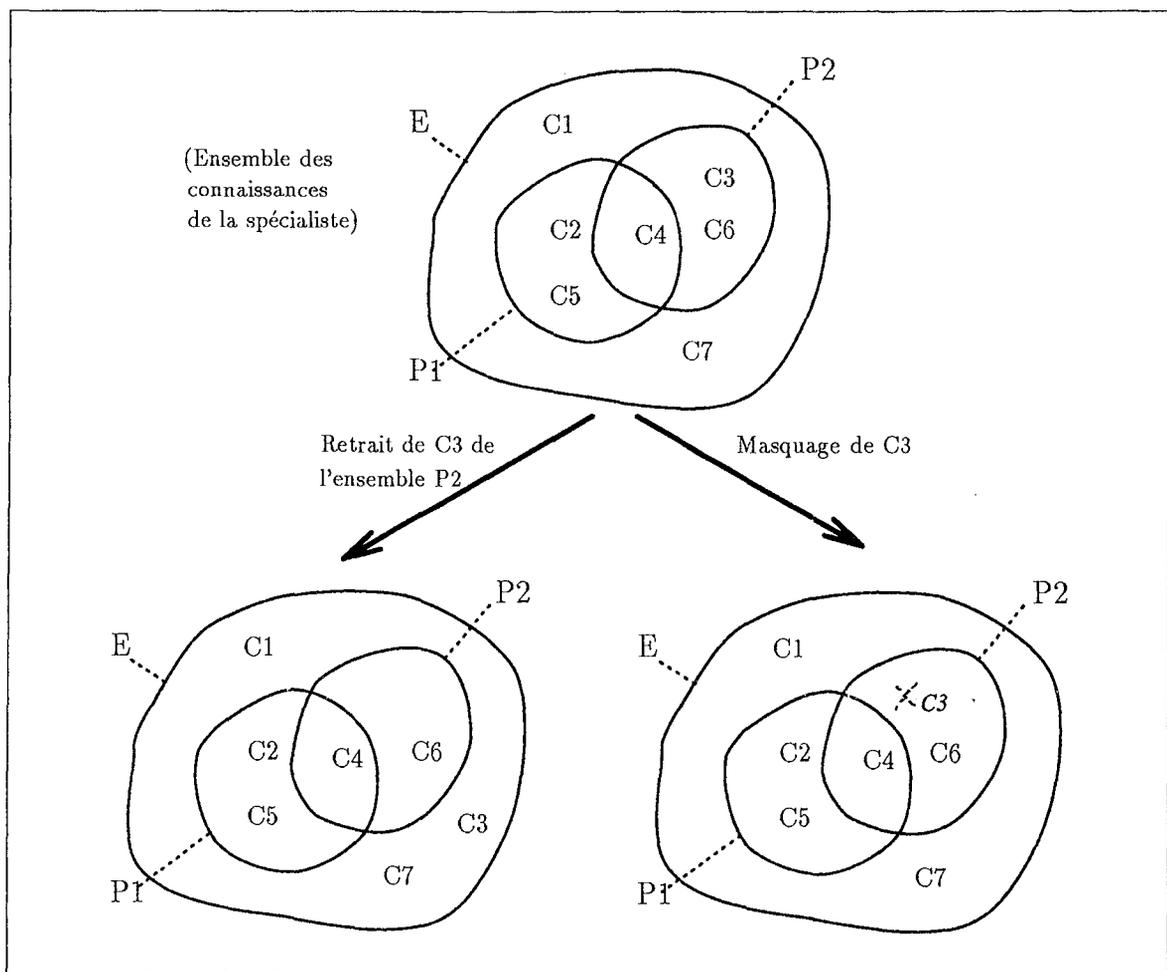


Figure 2.4. Différence entre les opérations de *retrait* et de *masquage*.

Cette opération de masquage correspond tout à fait à la façon de procéder de l’expert lorsqu’il écarte instantanément des connaissances non pertinentes pour le cas à traiter (cf. le paragraphe 2.1.1). Le retrait entre plutôt dans un processus à plus long terme : la préparation d’un ensemble de connaissances. L’ensemble est mis à jour au fur et à mesure de la progression du raisonnement expert. Il est préparé petit à petit pour une activation dans une phase ultérieure du raisonnement. Le retrait peut être une des étapes de cette mise à jour.

La modification d'un coefficient d'importance, elle, a pour effet de modifier les priorités entre règles. Il est ainsi possible de gérer explicitement l'ordre dans lequel les connaissances sont examinées et de le définir en fonction de conclusions précédemment obtenues dans le raisonnement. Cette modification est l'une des deux opérations qui va permettre de modéliser la capacité de l'expert à ne pas appliquer de façon systématique un même raisonnement standard sur des stimuli différents mais à adapter sa démarche en fonction du stimulus courant (cf. la figure 2.1). La seconde, qui agit de façon beaucoup plus importante sur le même point, est présentée plus loin.

Enfin, le démarquage est l'opération inverse du marquage. Ce dernier est une action qui n'est pas destinée à l'utilisateur mais au moteur qui exploite les connaissances. Faute de mécanisme de contexte de déclenchement et afin de ne pas générer un processus sans fin, toute règle déclenchée au cours d'une activation de spécialiste est considérée comme n'étant plus déclenchable dans la suite de cette même activation. Elle est alors marquée, ce qui permet au moteur de la repérer et de l'écarter de l'ensemble des règles potentiellement déclenchables. Cette mise à pied serait définitive si l'utilisateur ne disposait pas de la possibilité de démarquer une règle. Il est en effet des cas où une même règle est susceptible d'être envisagée plusieurs fois, dans des contextes différents. L'opération de démarquage consiste donc à enlever la marque "déclenchée" apposée sur une règle de façon à pouvoir la reconsidérer.

Le marquage /démarquage est en marge des autres opérations. Physiquement, les effets sur les règles sont les mêmes que ceux dus au masquage/démasquage ou au retrait/adjonction. Tout se passe en effet comme s'il y avait suppression ou adjonction de règles. Sur le plan cognitif, cela n'a rien à voir : les opérations de masquage/démasquage ou de retrait/adjonction sont des *réalités cognitives* ; le démarquage n'est, quant à lui, qu'une commodité offerte à l'utilisateur, introduite par nécessité pour pallier l'absence de contextes de déclenchement associés à une règle. Lorsque de tels contextes seront mis en place, le marquage et le démarquage n'auront plus lieu d'exister.

Là encore, les règles sur lesquelles portent ces fonctions sont désignées par un prédicat ;

- dans la catégorie "activation", la possibilité d'activer un ensemble de règles explicite ou implicite (activation d'un paquet ou activation de règles identifiées via un prédicat) avec le mode d'exploitation des connaissances courant ou un mode différent (à préciser par l'utilisateur).

Cette fonction est la seconde opération agissant sur le cours du raisonnement de la spécialiste. Elle donne corps à la fois aux notions de structuration dynamique (par les paquets implicites) et de fonctionnement différent en fonction d'un focus donné. Les règles dans lesquelles elle intervient sont schématisées dans l'encadré 2.5. Il n'est nécessaire de fournir un mode d'activation et une méthode de résolution de conflit que si l'on souhaite modifier le comportement du moteur. Par défaut, c'est celui de la spécialiste courante qui est utilisé.

SI	telle et telle conditions
ALORS	activer <i>Prédictat-ou-paquet</i> [en mode " <i>Mode</i> "] [avec la résolution de conflit " <i>Rés</i> "]
où	<i>Prédictat-ou-paquet</i> désigne l'ensemble des règles à activer,
où	<i>Mode</i> et <i>Rés</i> définissent la façon dont les connaissances sont exploitées . <i>Mode</i> désigne le mode de fonctionnement du moteur, <i>Rés</i> la méthode de résolution de conflit à appliquer (cf. § 2.4.3).

Figure 2.5. Règle contenant une méta-opération d'activation.

Nous pouvons constater que ces règles se rapprochent syntaxiquement de celles manipulées par les tâches ou la stratégie (cf. le paragraphe 1). Les spécialistes ont ainsi la capacité de véritablement contrôler leur raisonnement, tout comme les sources de connaissances des niveaux supérieurs, et, par là même, deviennent des *entités pensantes*.

Nous avons donc d'une part des fonctions agissant sur la sélection et les regroupements de connaissances, en les favorisant ou en les défaisant, d'autre part des fonctions permettant de réorienter le raisonnement en cours. Nous abordons, dans le paragraphe qui suit, la portée de ces fonctions.

b - Portée des modifications dues aux méta-opérations

Le champ d'action des opérations dont nous avons fait mention ci-dessus est limité :

- à une activation de spécialiste. Toute modification susceptible de survenir sur l'organisation des connaissances de la spécialiste ou sur une de ses règles est à caractère temporaire ; la spécialiste retrouve sa configuration initiale chaque fois qu'elle est activée ;
- à l'ensemble local de règles potentiellement déclenchables. Toutes les mises à jour ne concernent en effet que l'ensemble de règles déclenchables de l'environnement courant. Un environnement est défini par rapport à une activation ; il y a changement d'environnement :
 - lors de l'activation d'un ensemble de règles au moyen de la méta-opération d'activation vue ci-dessus. On passe alors dans un nouvel environnement dit "environnement appelé" ;

- lorsqu’une telle activation se termine, l’ensemble local des règles potentiellement déclenchables arrivant à épuisement. Il y a alors retour à l’environnement de départ (“environnement appelant”) avec restauration du contexte de départ (ensemble des règles potentiellement déclenchables d’origine, paquets et contenus initiaux des paquets, caractéristiques initiales des règles, ...), aux marquages de règles près.

Nous verrons plus précisément, au paragraphe 2.4.4, comment ces ensembles de règles potentiellement déclenchables sont mis à jour et pourquoi il en est ainsi. Nous aurons alors l’occasion de revenir sur la portée des actions des méta-opérations.

2.4.3 Le mécanisme d’inférence du nouveau moteur

Nous présentons ici l’aspect “inférence” du nouveau moteur de ATOME. Nous nous attachons tout d’abord à décrire les paramètres que nous avons introduits. Afin de mieux comprendre leur utilité, nous voyons où ils interviennent en considérant le comportement d’un moteur d’ordre 1 classique ne comportant pas de mécanisme de pré-compilation de règles (genre RETE ou TREAT) avant de voir comment ils interviennent pour régir le fonctionnement du moteur. Nous abordons ensuite le problème de la résolution de conflit. Puis nous illustrons l’utilisation de ce nouveau moteur en définissant un mode de fonctionnement particulier. Enfin, nous résumons les facilités offertes pour utiliser aisément ce nouveau moteur.

a - Fonctionnement d’un moteur d’ordre 1 classique

Un moteur d’ordre 1 classique (cf. la figure 2.6) considère en entrée une base de règles. Les règles dont la partie “conditions” est vérifiée sont sélectionnées et forment l’ensemble de conflit. Il s’agit alors de choisir, parmi ces règles, celle qui sera déclenchée, tâche qui incombe à la méthode de résolution de conflit. La règle choisie est alors déclenchée et le processus est réitéré jusqu’à ce que l’ensemble de conflit soit vide. La base de règles initiale est mise à jour à chaque cycle de façon à ne pas redéclencher la même règle dans les mêmes conditions. On parle ainsi d’“ensemble de règles potentiellement déclenchables⁵ ou utilisables” plutôt que de “base de règles initiale”.

b - Les paramètres du nouveau moteur

Un moteur d’ordre 1 tel celui qui est défini ci-dessus est en fait trop figé pour ce que nous souhaitons en faire. Nous tenons à le rappeler, ce qui a motivé le développement de ce nouveau moteur a été, outre le besoin de structuration et de manipulation de la connaissance, la volonté de disposer d’une grande variété de modes de fonctionnement pour pouvoir modéliser au mieux le raisonnement expert. Aussi, plutôt que de définir *a priori* de nombreux modes de fonctionnement qui seraient toujours en

5. Ce terme a été utilisé précédemment, dans la partie qui présente les méta-opérations (cf. 2.4.2). Il correspondait déjà au concept décrit ici.

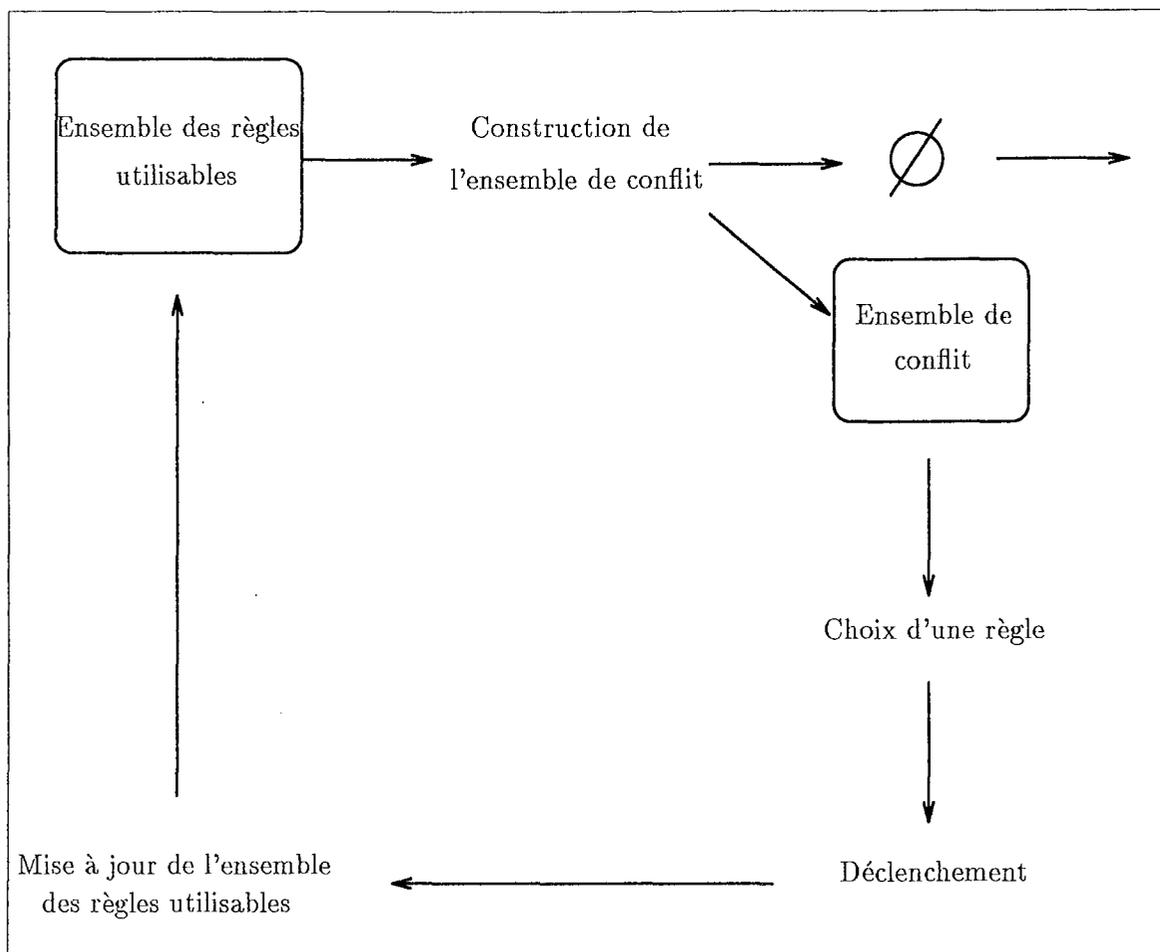


Figure 2.6. Fonctionnement d'un moteur d'ordre 1 classique.

nombre insuffisant, avons-nous choisi d'introduire dans un moteur d'ordre 1 classique⁶ des paramètres qui vont permettre d'agir sur le comportement du moteur.

Ces paramètres interviennent à différents moments dans le cycle d'un moteur d'ordre 1 classique et sur des fonctions établies et figées de ce moteur. Ces interventions, indiquées par les flèches en gras de la figure 2.7, se situent au niveau :

- du déclenchement.

Certains utilisateurs ont exprimé le besoin de pouvoir boucler sur une règle, indépendamment de tout mécanisme d'unification⁷. Il est en effet des cas où les actions de la règle elles-mêmes alimentent la partie "prémises". Un tel comportement n'existant pas dans un moteur d'ordre 1 classique, le

6. Rappelons que nous ne nous plaçons pas dans le cadre d'un moteur d'ordre 1 qui intégrerait des mécanismes de précompilation de règles. Ces mécanismes sont en effet incompatibles, dans leur état actuel, avec les possibilités de structuration dynamique des connaissances que nous proposons.

7. Un mécanisme d'unification a été défini. Il est possible d'activer une règle sur chacun des résultats de l'unification ou de les traiter comme un tout.

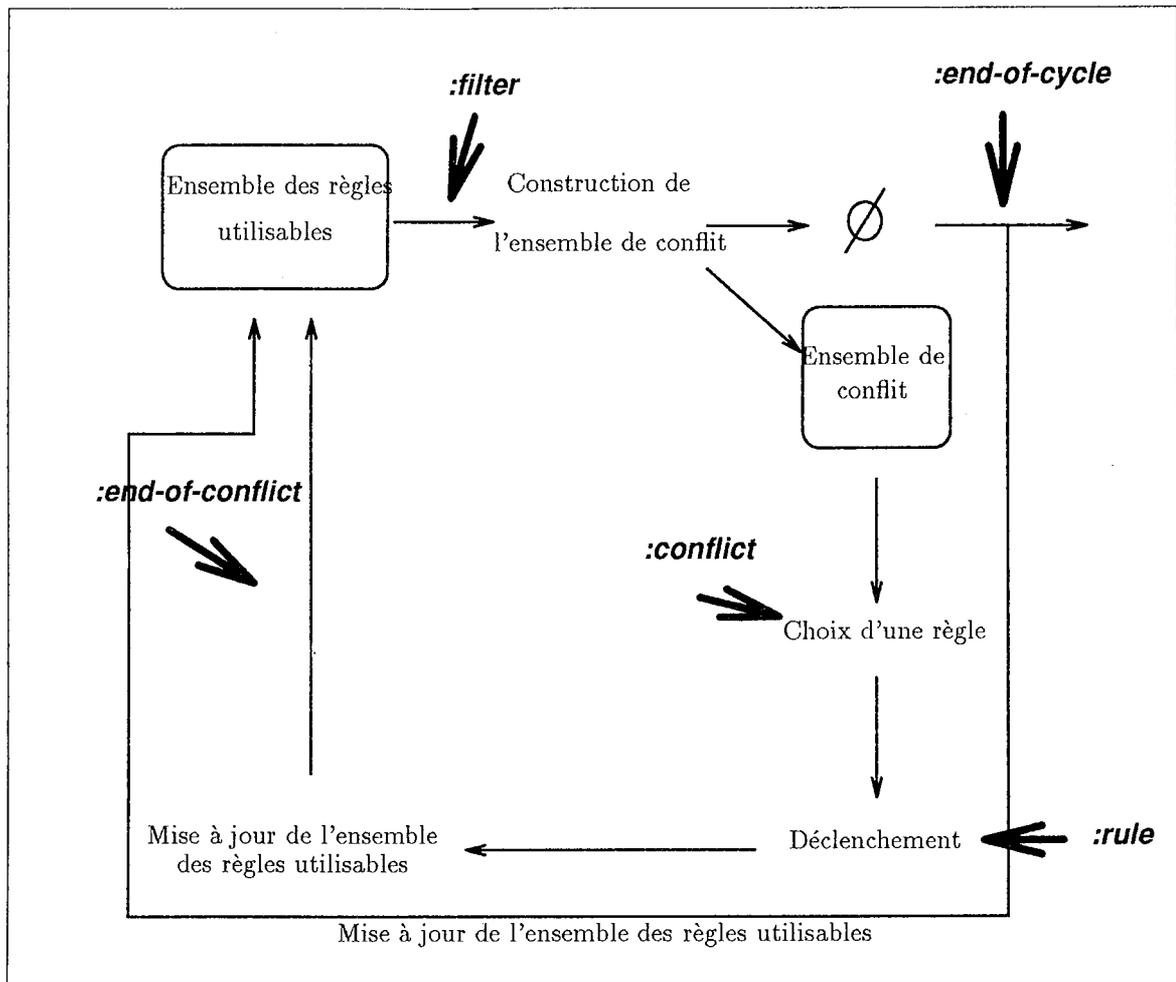


Figure 2.7. Intervention des différents paramètres du moteur d'ordre 1 de ATOME sur un moteur d'ordre 1 classique.

paramètre *rule* a été introduit de façon à pouvoir opter pour l'un ou l'autre des comportements. Ce paramètre n'est indispensable pour modéliser ce comportement que parce qu'il n'y a pas de contexte associé à une règle lorsqu'elle est déclenchée. Avec un tel contexte, nous aurions pu nous en passer ;

- du choix d'une règle.

Un moteur d'ordre 1 classique n'exécute qu'une seule règle par ensemble de conflit construit. Nous nous sommes posé la question de savoir s'il ne serait pas intéressant de déclencher toutes les règles contenues dans l'ensemble de conflit d'un seul trait. La reconstruction systématique de l'ensemble de conflit après chaque activation de règle serait ainsi évitée. Ceci nous a conduits à introduire le paramètre *conflict* ;

- de la fin de boucle d'un moteur d'ordre 1.

Que faire lorsqu'un premier cycle de base⁸ du moteur d'ordre 1 a été accompli, c'est-à-dire lorsqu'on a construit une fois l'ensemble de conflit ? Un moteur d'ordre 1 opte généralement pour la répétition du processus jusqu'à ce que plus aucune règle ne soit déclenchable (ce qui correspond à un ensemble de conflit vide) : il y a reconstruction systématique de l'ensemble de conflit. Or, dans certains raisonnements experts, il suffit d'activer une unique règle parmi tout un ensemble pour que le problème courant soit résolu. Le paramètre *end-of-conflict* permet donc d'envisager un tel comportement du moteur (i.e. interruption du cycle courant du moteur après une seule exploitation de l'ensemble de conflit) ;

- de la construction de l'ensemble de conflit.

On est en droit de se demander si l'ensemble de conflit doit être construit uniquement par satisfaction des prémisses de règles. Si tel est le cas, on ne pourra pas exprimer certaines méta-connaissances (par exemple l'utilisation selon une priorité donnée de l'ensemble des connaissances d'une spécialiste). Ceci ne peut pas être traduit au niveau de la résolution de conflit puisque celle-ci n'intervient que localement, sur un sous-ensemble à caractère temporaire et instable des règles de la spécialiste (contenant les règles dont les prémisses sont, à cet instant-là, vérifiées) et pas globalement, sur l'ensemble de la connaissance. Cela justifie l'adjonction du paramètre *filter* pour contrôler la construction de l'ensemble de conflit. Il s'agit d'un filtre qui permet une première sélection de règles avant la construction, à proprement parler, de l'ensemble de conflit ;

- de la fin du cycle.

Lorsque l'ensemble de conflit est vide, en fin de cycle⁹, faut-il réexaminer les règles de l'ensemble des règles utilisables ? Cette question, qui n'a aucun sens pour un moteur d'ordre 1 classique, n'aurait pas lieu d'être s'il n'y avait pas le paramètre *filter*. L'utilisation de ce dernier est en effet susceptible d'écartier certaines règles et il est parfois nécessaire de les reconsidérer. Le paramètre *end-of-cycle* est là pour indiquer ce qu'il faut faire quand l'ensemble de conflit devient vide.

8. Ce cycle est à distinguer du cycle ATOME tel qu'on l'entend dans le moteur d'ordre 0⁺. Un cycle de base de moteur d'ordre 1 correspond à une boucle (ou un tour) effectuée sur la figure 2.7, c'est-à-dire à :

- une construction de l'ensemble de conflit,
- un choix de règle,
- un déclenchement de règle,
- et une mise à jour de l'ensemble des règles utilisables.

9. Le cycle dont il est ici question est un cycle de moteur d'ordre 1. Il est constitué d'un certain nombre de cycles de base et se termine lorsque l'ensemble de conflit devient vide ou de façon prématurée, selon le mode de fonctionnement de la spécialiste. Il s'agit donc d'une itération sur les cycles de base jusqu'à ce qu'on ait épuisé les connaissances disponibles. En cela, il correspond à la notion de cycle du moteur d'ordre 0⁺.

Ces paramètres sont en partie issus de besoins exprimés par les utilisateurs (par exemple, le paramètre *rule*). Leur choix a également été dicté par un souci de compatibilité avec le moteur d'ordre 0^+ :

- pour le bien-être de l'utilisateur, afin qu'il puisse utiliser aisément les deux moteurs,
- pour envisager la cohabitation des deux types de moteurs dans deux spécialistes différentes au sein d'une même tâche.

Nous passons maintenant à la description technique des paramètres, en indiquant comment il est possible de les positionner pour définir divers modes de fonctionnement.

c - Fonctionnement du moteur

Décrire le comportement du moteur revient à fournir la liste des valeurs des paramètres que nous avons présentés auparavant. Il n'y a donc pas un unique mode de fonctionnement du moteur mais des modes de fonctionnement dépendants des combinaisons des valeurs des paramètres. L'utilisateur doit obligatoirement disposer de tels modes pour pouvoir définir une spécialiste. Il peut pour cela :

- ou bien se servir de modes de fonctionnement prédéfinis stockés dans une bibliothèque de modes. Nous détaillons l'un d'eux dans ce qui suit (cf. § 2.4.3). Il servira d'exemple pour décrire comment positionner les divers paramètres ;
- ou bien définir lui-même un mode de fonctionnement adapté à son problème. Il manipule dans ce but les différents paramètres qui lui permettent de construire un mode particulier.

Nous voyons ci-après les paramètres les uns après les autres, en rappelant brièvement le rôle de chacun, de façon à décrire les valeurs que chacun peut prendre et à voir en quoi ces valeurs affectent le comportement du moteur.

rule détermine le comportement vis-à-vis de la règle à déclencher. Il peut prendre les valeurs :

simple : la règle ne sera déclenchée qu'une fois (*valeur par défaut*) ;

cyclic : elle sera déclenchée tant que sa partie conditions sera vérifiée¹⁰. En cela, ce paramètre est à manipuler avec précautions : l'utilisateur doit en effet s'assurer non seulement que la partie "conditions" de la règle alimente sa partie "conclusions" mais aussi et surtout que le phénomène convergera.

conflict détermine le comportement vis-à-vis de l'ensemble de conflit. Il peut prendre les valeurs :

simple : une seule règle sera déclenchée (*valeur par défaut*) ;

10. Cela est à distinguer du mécanisme sous-jacent à l'unification où la partie "conditions" d'une règle comporte une unification et où l'on souhaite itérer la règle sur tous les nœuds résultats de l'unification.

multiple : toutes les règles seront déclenchées séquentiellement, sans qu'il y ait réévaluation des prémisses après déclenchement de la première. Cette valeur doit, de ce fait, être utilisée avec précaution ; il faut en effet être sûr que l'activation d'une des règles de l'ensemble de conflit ne va pas remettre en cause les conditions des règles suivantes. Aucune vérification ne sera faite à ce sujet. L'utilisateur travaillera donc à ses risques et périls.

end-of-conflict détermine le comportement du moteur en fin de cycle de base. Il peut prendre les valeurs :

quit : le cycle se termine (*valeur par défaut*) ;

again : le cycle courant est poursuivi par un nouveau cycle de base (reconstruction de l'ensemble de conflit et ainsi de suite, le filtre, s'il y a lieu, entrant ici en action).

filter détermine les conditions que les règles doivent satisfaire pour être candidate à la reconstruction de l'ensemble de conflit. Ces conditions ne sont pas testées lorsque commence un cycle¹¹, en particulier lors de la première construction de l'ensemble de conflit. Elles sont exprimées sous la forme d'une fonction lisp ou ATOME. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, le filtre couramment utilisé qui précise que le coefficient d'importance de la règle courante ne doit pas être supérieur au coefficient d'importance de la dernière règle déclenchée dans le même environnement (c'est-à-dire lors de la même activation de spécialiste ou de paquet).

end-of-cycle détermine le comportement du moteur lorsqu'un cycle est terminé. Ses valeurs sont :

quit : l'activation est terminée (*valeur par défaut*) ;

again : on commence un nouveau cycle. Il y a donc reconstruction de l'ensemble de conflit à partir des règles non déclenchées de l'ensemble des règles utilisables, et ceci sans tenir compte du filtre puisqu'il s'agit d'un début de cycle.

Pour ce qui est de la façon d'affecter une valeur à un paramètre, nous conseillons au lecteur de se reporter au paragraphe 2.4.3 ci-après. Nous y avons en effet entrepris la démarche¹² de définir progressivement un des modes prédéfinis, selon une méthode que l'utilisateur pourra réappliquer pour toute autre définition de mode. Pour le nom du mode, nous laissons libre cours à son imagination . . . notons toutefois que ce nom sert de repère au moteur d'inférence car c'est par lui que le mode de fonctionnement d'une spécialiste est retrouvé. L'attribution d'un mode de fonctionnement à une spécialiste se fait en effet par la seule indication du nom du mode, les modes et les spécialistes pouvant être définis séparément.

11. "Cycle" et non "cycle de base".

12. Cette démarche est reproduite dans le manuel d'utilisation du nouveau moteur de ATOME [Warin *et al.* 92]. Plusieurs modes y sont définis et constituent autant d'exemples pour un utilisateur novice. Il pourra ainsi calquer la démarche et définir facilement de nouveaux modes.

d - La résolution de conflit

Comme nous l'avons vu dans ce qui précède, le moteur comporte un paramètre lui permettant d'intervenir lorsque l'ensemble de conflit est construit. Il s'agit alors de savoir si l'on ne déclenchera qu'une seule des règles de cet ensemble ou si toutes le seront. C'est le paramètre "conflict" qui fait ici office de décideur. Il n'en reste pas moins vrai que, dans les deux cas, le problème du choix de la règle à déclencher se pose : dans le premier cas, il faudra choisir l'unique règle à déclencher ; dans le second, il faudra déterminer l'ordre de déclenchement des règles, c'est-à-dire de choisir, à chaque instant, la prochaine règle à déclencher.

Une fonction de résolution de conflit a donc été introduite dans ce but. Là encore, loin de figer une fois pour toutes la méthode de résolution de conflit, nous avons opté pour quelque chose de modifiable et de facilement adaptable à toute application spécifique. Nous proposons donc une fonction de résolution de conflit paramétrable, certains paramètres étant prédéfinis. Des outils permettent d'en définir de nouvelles.

Les fonctions prédéfinies correspondent à des méthodes de résolution de conflit somme toute assez classiques : la règle choisie peut être celle de plus fort coefficient d'importance (option *best-ic*), la première de l'ensemble de conflit (option *first*) ou encore le résultat du hasard (option *hasard*). Les fonctions "à définir" sont laissées, là encore, à l'imagination de l'utilisateur ATOME. Notons qu'il peut être intéressant de combiner plusieurs modes de résolution, l'ordre dans lequel il sont donnés déterminant alors l'ordre d'imbrication des fonctions de sélection.

Voici quelques exemples de définition de fonctions de résolution de conflit :

`($conflict-choice)`

Aucun paramètre n'étant précisé, le système optera pour le mode de résolution de conflit par défaut : il choisira la règle ayant le plus fort coefficient d'importance.

`($conflict-choice first)`

Le système choisira la première des règles de l'ensemble de conflit.

`($conflict-choice hasard best-ic)`

Le système choisira une règle au hasard parmi celles ayant le meilleur coefficient d'importance.

e - Exemple : définition d'un mode de fonctionnement particulier

Nous avons choisi de décrire ici un des modes de fonctionnement prédéfinis de ATOME : le mode cyclique. Notre choix s'est porté sur ce mode car il reproduit le comportement du mode de même nom du moteur d'ordre 0⁺ (cf. le paragraphe 2.1). Nous allons donc rappeler le comportement d'une spécialiste en mode cyclique d'ordre 0⁺ avant de présenter la démarche qui nous permet de définir ce même mode en termes de moteur d'ordre 1.

Les règles des spécialistes sont dotées de coefficients de priorité qui définissent un ordre selon lequel les règles vont être examinées. Le moteur, en mode cyclique, fait un

premier passage sur l'ensemble des règles de la spécialiste : il déclenche, dans l'ordre, toute règle dont la partie "conditions" est vérifiée ; à chaque déclenchement de règle, seules les règles de priorité inférieure à celle qui a été déclenchée sont reconsidérées (après réévaluation des prémisses). Un second cycle est ensuite effectué sur l'ensemble des règles de la spécialiste après suppression des règles déjà déclenchées. Ce processus recommence jusqu'à ce qu'il n'y ait plus aucune règle déclenchable.

Il s'agit maintenant de transcrire ce fonctionnement à l'aide des paramètres du moteur d'ordre 1. Nous allons pour cela les reprendre un par un et, pour chacun, :

- nous poserons la question pour savoir comment le positionner,
- nous répondrons à la question en nous reportant au fonctionnement du moteur d'ordre 0⁺ en mode "cyclique",
- enfin, nous attribuerons la valeur qui convient.

Ces questions retracent à peu près la démarche que nous avons suivie pour aboutir à la définition des paramètres du nouveau moteur. Nous nous les sommes posées, en envisageant les alternatives possibles et avons introduit les divers paramètres regroupant ces alternatives. Il s'agit maintenant de les utiliser "à contre-courant", de façon à obtenir la valeur de chaque paramètre et non plus le paramètre lui-même.

- Le paramètre *rule*.
Faut-il qu'il y ait bouclage sur toute règle qui est déclenchée ?
Le mode "cyclique" ne déclenche qu'une seule fois chacune des règles activables. Aussi ne doit-il pas y avoir de bouclage. Le paramètre donc être positionné à *simple*.
- Le paramètre *conflict*.
Toutes les règles de l'ensemble de conflit doivent-elles être déclenchées d'un seul bloc ?
Répondre "oui" à une telle question suppose, après déclenchement d'une première règle de l'ensemble de conflit, de ne pas reconstruire cet ensemble. On ne réexamine donc ni les prémisses des autres règles de ce même ensemble, ni les règles de la spécialiste qui ne figurent pas dans l'ensemble de conflit à cet instant. Or, en mode cyclique, on reconsidère, après chaque activation de règle, toutes les règles de priorité inférieure, ce qui correspond à une reconstruction de l'ensemble de conflit en ordre 1. Il faut donc répondre par la négative à la question : la valeur du paramètre *conflict* doit être *simple*.
- Le paramètre *end-of-conflict*.
Faut-il recommencer un nouveau cycle de base du moteur, une fois le premier achevé (i.e. après une première construction de l'ensemble de conflit et une première activation de règles) ?
Ne pas recommencer le processus revient à ne construire qu'une seule fois l'ensemble de conflit, ce qui n'est pas conforme au fonctionnement en mode cyclique. Le paramètre *end-of-conflict* doit donc prendre la valeur *again*.

- Le paramètre *filter*.
Une règle doit-elle être placée dans l'ensemble de conflit uniquement parce que ses conditions sont vérifiées ?

Tous les modes de fonctionnement du moteur d'ordre 0⁺ prennent en compte un ordre de priorité sur les règles. On ne considère pas uniquement la satisfaction des prémisses mais aussi cette priorité. Il faut appliquer un filtre aux règles. Le paramètre *filter* doit donc être exprimé par une fonction indiquant les contraintes qui pèsent sur les règles (cf. la description de cette fonction ci-dessous).

- Le paramètre *end-of-cycle*.
Faut-il commencer un nouveau cycle une fois l'ensemble de conflit vide, sachant que l'utilisation du filtre a pu laisser certaines règles de côté ?

C'est le propre du mode cyclique que de reconsidérer des règles écartées du fait de leur position trop élevée dans la liste ordonnée des règles. Il faut donc réexaminer ces règles en débutant un nouveau cycle. D'où la valeur *again* pour le paramètre *end-of-cycle*.

Nous obtenons donc pour le mode cyclique :

```
($defmode mode-cyclic
  (:rule          simple)
  (:conflict      simple)
  (:end-of-conflict again)
  (:filter        (<= ($ic) ($ic-last-ctxt)))
  (:end-of-cycle  again)
  (:documentation "Mode cyclique ordre 1"))
```

La résolution de conflit, quant à elle, doit être gérée selon un ordre de priorité fourni par les coefficients de vraisemblance associés aux règles. La fonction de résolution de conflit est donc définie par la fonction par défaut : (*\$conflict-choice*).

Il suffit maintenant, pour définir tout autre mode de fonctionnement de suivre les indications fournies ci-dessus (question, réponse et positionnement du paramètre) et de voir comment se fait la résolution de conflit.

f - On pense à l'utilisateur !

L'utilisateur dispose ainsi d'un moteur au fonctionnement variable, qu'il peut configurer au gré des schémas de pensée de l'expert et des problèmes qu'il a à traiter. Ce fonctionnement peut paraître complexe à maîtriser, étant donné son degré élevé de paramétrisation. A cela, nous objecterons que nous avons porté un grand souci à la facilité d'utilisation de ce nouveau moteur :

- nous l'avons vu plus haut, un compromis a été réalisé entre le développement d'un moteur d'ordre 1 et le fait de pouvoir retrouver, dans ce nouveau moteur, le comportement de l'ancien. Il y a compatibilité entre les deux moteurs. Une personne qui aurait par ailleurs déjà utilisé ATOME en ordre 0⁺ retrouve des

modes de fonctionnement familiers. De plus, les modifications à apporter pour passer d'un moteur à l'autre sont minimales ;

- l'utilisateur n'a pas à se préoccuper, dans un premier temps, de définir des modes de fonctionnement. Il en existe en effet de prédéfinis, qui devraient se révéler suffisants pour bon nombre des applications développées avec ATOME. Les modes "simple", "multiple" et "cyclique"¹³ du moteur d'ordre 0⁺ sont pour l'instant à disposition ainsi qu'un mode "classique" correspondant au fonctionnement d'un moteur d'ordre 1 classique. Il est ainsi possible de se familiariser avec les autres potentialités du nouveau moteur (structuration, manipulation des connaissances, ...) avant de s'intéresser à son fonctionnement à proprement parler ;
- les modes de fonctionnement peuvent exister indépendamment des spécialistes. Cela présente l'avantage de pouvoir conserver tout nouveau mode défini, que ce soit dans la bibliothèque des modes de fonctionnement de ATOME (qui contient déjà tous les modes prédéfinis) ou dans toute autre bibliothèque propre à l'utilisateur. Ces modes pourront ainsi être réutilisés pour d'autres spécialistes de l'application en cours de développement ou pour toute autre application ;
- l'utilisateur dispose, dans la démarche suivie au paragraphe précédent, d'un guide pour construire de nouveaux modes de fonctionnement. Nous pensons ainsi lui faciliter la tâche lorsqu'il entreprendra une telle construction.

2.4.4 L'ensemble des règles utilisables : charnière entre structuration des connaissances et modes de fonctionnement

La notion de "règle utilisable" est primordiale car elle constitue la charnière entre la manipulation des paquets de règles et le comportement du moteur. C'est en effet en agissant sur le contenu de l'ensemble des règles utilisables que l'on pourra sélectionner un sous-ensemble de connaissances à activer avec un mode de fonctionnement particulier. Il est donc important de voir comment est faite la mise à jour d'un tel ensemble. Celle-ci étant liée au concept d'environnement¹⁴, nous reviendrons tout d'abord sur cette entité avant de présenter les deux types de mises à jour qui interviennent.

a - Notion d'environnement

Nous avons vu, au paragraphe 2.4.2, que l'utilisateur pouvait explicitement désigner, au moyen de méta-règles d'activation (cf. la figure 2.5), les règles avec lesquelles il faut temporairement poursuivre le raisonnement. Dans pareil cas, le raisonnement se poursuit dans un nouvel environnement (environnement *appelé*), où le nouvel ensemble de règles utilisables est constitué des règles désignées, où il peut y avoir un mode de fonctionnement différent de celui de la spécialiste si telle est la volonté de l'utilisateur. On débute ainsi de nouveaux cycles, un peu comme s'il y avait activation

13. Le mode cyclique est présenté dans sa version "moteur d'ordre 1" au paragraphe précédent.

14. Nous avons fourni une première esquisse de ce qu'est un environnement au paragraphe 2.4.2.

d'une sous-spécialiste au sein de la spécialiste initiale. Une fois ces cycles terminés, il y a retour dans l'environnement de départ (environnement *appelant*). Les inférences reprennent alors dans cet environnement, l'ensemble des règles utilisables étant mis à jour en fonction de ce qui s'est passé dans les environnements appelés. Les environnements appelés pouvant eux-mêmes devenir des environnements appelants et donner naissance à d'autres environnements, le processus correspond à un emboîtement d'environnements les uns dans les autres, les environnements appelants contenant les appelés (cf. la figure 2.8).

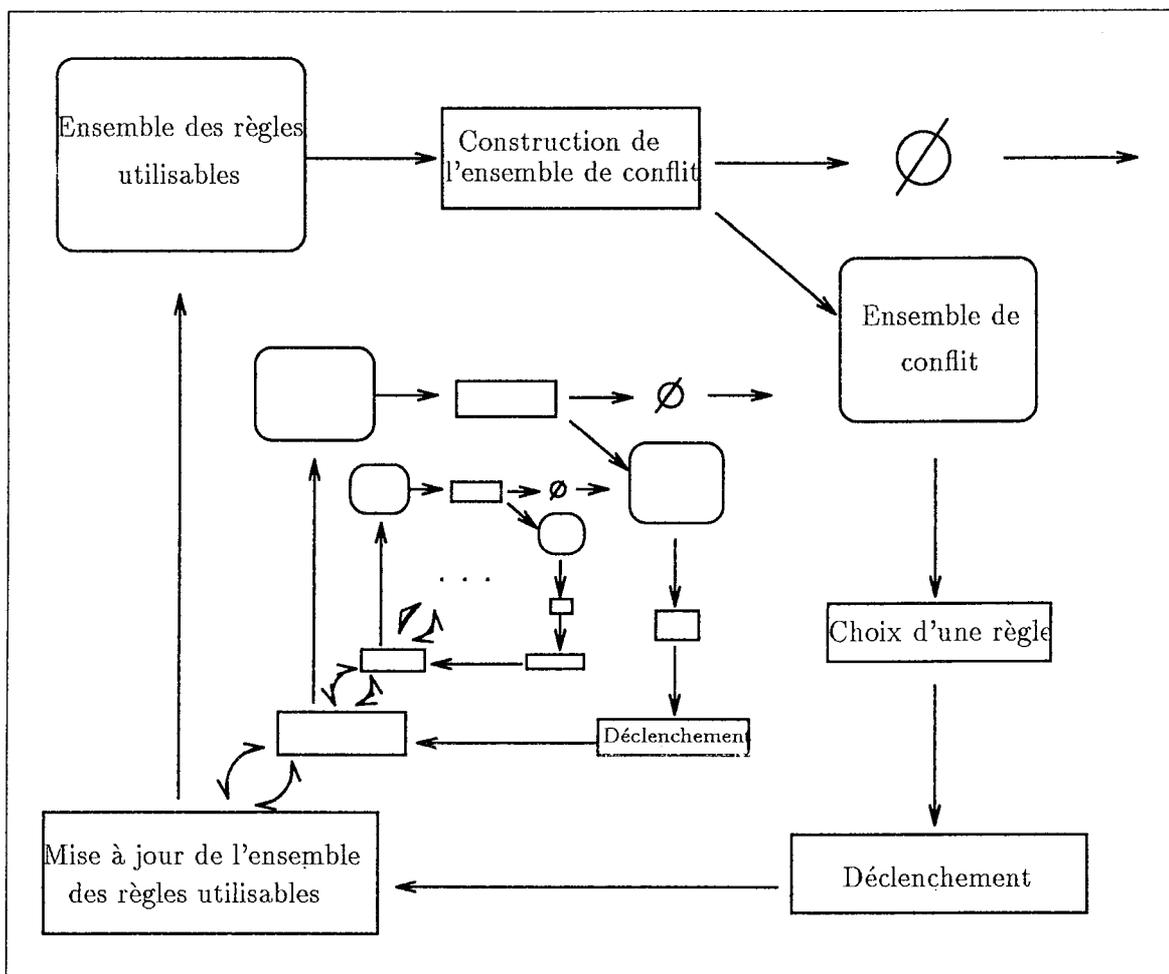


Figure 2.8. Interaction entre structuration des connaissances et modes de fonctionnement : définition et emboîtement d'environnements.

Un ensemble de règles utilisables étant attaché à un environnement, le problème de sa mise à jour se pose à deux niveaux. Il faut d'une part voir comment cet ensemble évolue au sein même de l'environnement, d'autre part voir ce qu'il advient lorsqu'on passe d'un environnement à un autre. Cela est présenté dans les deux paragraphes qui suivent.

b - Mise à jour dans un environnement

La première des mises à jour intervient de façon locale dans un environnement, après chaque déclenchement de règles¹⁵. C'est alors le type de la règle qui va la déterminer :

- si la règle est une méta-règle autre qu'une méta-règle d'activation, l'ensemble de règles initial subira les conséquences de l'action de cette méta-règle : modification du contenu d'un paquet, création de nouveaux paquets, masquage de règles, ... (cf. § 2.4.2);
- s'il ne s'agit pas d'une méta-règle, il y aura marquage de la règle déclenchée.

Ces mises à jour sont élémentaires et ont lieu après chaque cycle de base du moteur (i.e. après chaque exploitation de l'ensemble de conflit).

c - Mise à jour d'un environnement à un autre

La seconde est plus conséquente. Elle a lieu lorsque le moteur a fini d'exploiter l'ensemble des règles d'un environnement appelé, activé par une méta-règle. Entre le moment du déclenchement de la méta-règle et celui où il faut faire cette mise à jour, il peut y avoir eu de nombreux cycles de base du moteur, voire des cycles complets. La connaissance peut donc avoir subi de nombreuses modifications. Le problème est alors de savoir que faire de ces modifications : doit-on conserver ce qui a changé dans la structuration des paquets de règles (retrait d'une règle d'un paquet, adjonction à un autre, fusion de deux paquets, ...)? Qu'en est-il des règles qui ont été masquées et/ou démasquées dans les environnements appelés?

Nous nous sommes également posé la question de savoir comment il fallait considérer la connaissance utilisée dans ces environnements : faut-il ne supprimer que les règles qui ont été déclenchées?

Nous répondons à ces questions dans ce qui suit. La portée des actions de méta-opérations ayant déjà fait l'objet d'un paragraphe (cf. § 2.4.2), nous nous contenterons de rappeler brièvement les choix qui ont été faits et de les expliquer. Nous détaillerons davantage ce qui concerne le marquage de règles.

Les modifications dues aux méta-opérations

Nous avons vu au paragraphe 2.4.2 que la portée des modifications dues aux méta-opérations est limitée à un environnement. Des inférences y sont faites en fonction

15. Il existe deux exceptions à cela :

- le cas d'un mode de fonctionnement où le paramètre *conflict* serait positionné à *multiple*. La mise à jour ne se ferait alors qu'après le déclenchement de toutes les règles figurant dans l'ensemble de conflit;
- le cas d'un mode de fonctionnement où le paramètre *rule* serait positionné à *cyclic*. Il faudrait alors attendre la fin des divers déclenchements de cette règle pour faire la mise à jour.

du focus courant. Un raisonnement local y est mené. Il semble donc pertinent que les modifications sur les connaissances soient également locales. Un environnement appelant retrouvera donc sa configuration initiale, telle qu'elle était avant l'activation de l'environnement appelé, aux marquages de règles près¹⁶. Nous pouvons alors dire que les actions des méta-opérations dans un environnement appelé sont invisibles dans l'environnement appelant correspondant (cf. la figure 2.9).

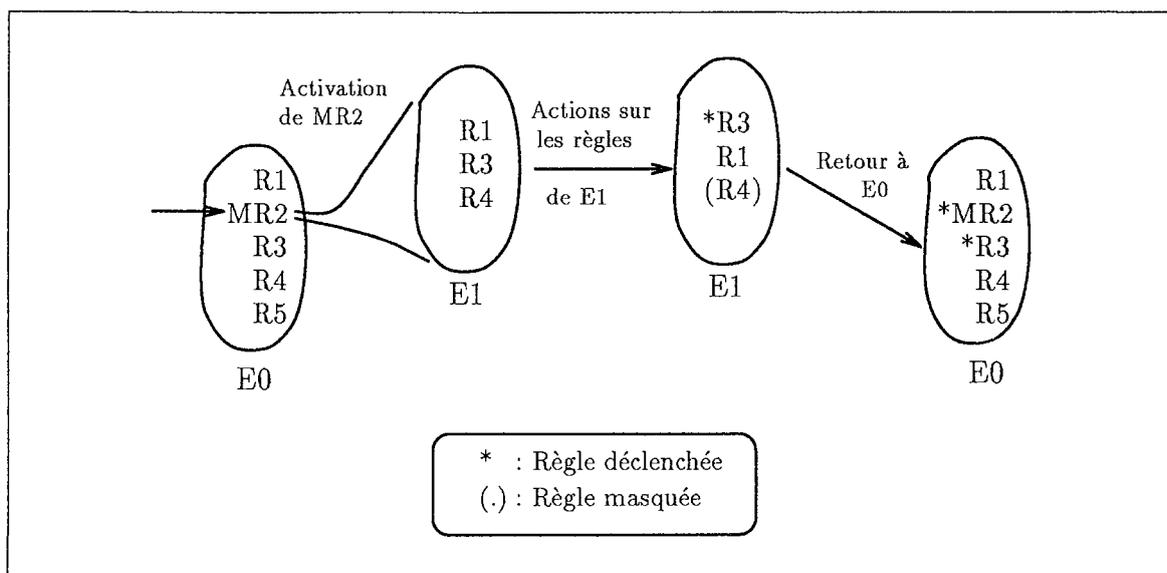


Figure 2.9. Caractère temporaire et propre à un environnement de l'action des méta-opérations.

Au contraire, ces mêmes actions survenant dans un environnement appelant vont être visibles depuis un environnement appelé. Celui-ci hérite en effet des connaissances de l'environnement appelant dont il dépend. Ainsi, si ces dernières ont subi l'action de méta-opérations avant qu'il y ait passage dans l'environnement appelé, celui-ci conservera les modifications (cf. la figure 2.10).

Cette façon de faire est à rapprocher du concept informatique de gestion de pile lors d'appels récursifs. Les environnements sont gérés "en pile" : il y a transmission de paramètres (i.e. ensemble des règles utilisables, mode de fonctionnement et méthode de résolution de conflit) lors de l'empilement, c'est-à-dire lors du passage dans un nouvel environnement ; il y a restauration du contexte initial (i.e. ensemble des règles utilisables de l'environnement appelant) au retour.

Ceci n'est bien entendu valable que pour ce qui concerne les modifications introduites sur les règles et les paquets par les méta-opérations.

Les règles déclenchées

16. Nous rappelons que toute règle déclenchée est marquée par le moteur de façon à ne plus être déclenchée.

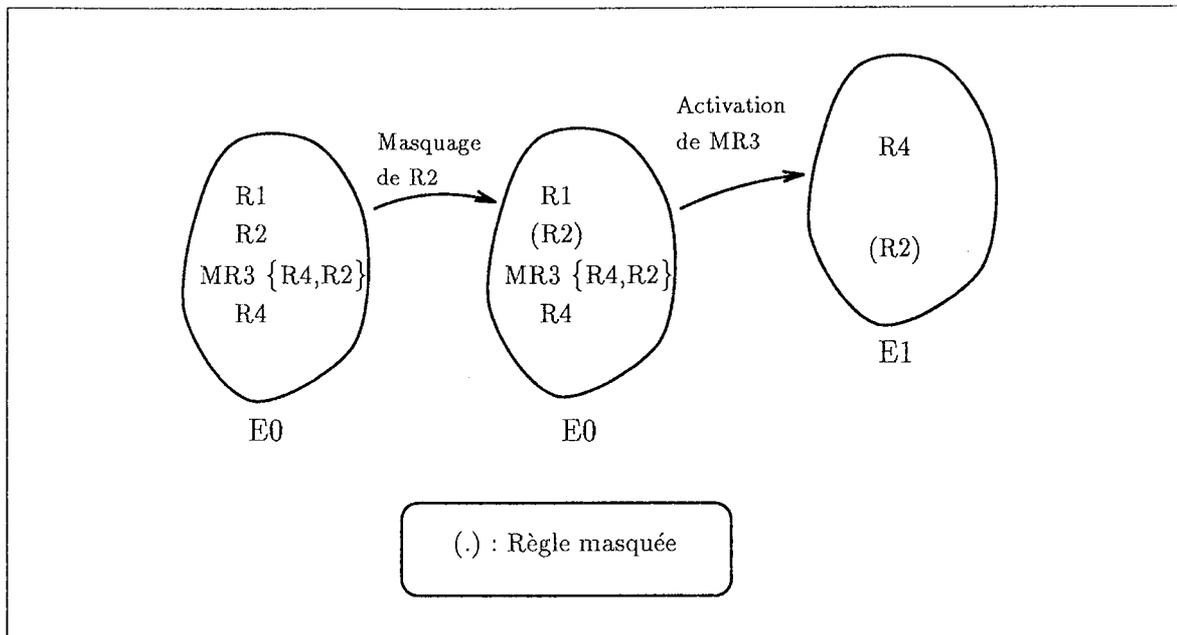


Figure 2.10. Héritage des connaissances modifiées d'un environnement appelant.

Nous avons dit jusqu'à présent que les règles déclenchées, quel que soit l'environnement où ce déclenchement a lieu, étaient marquées. Or, il nous semble qu'elles ne soient pas les seules à devoir être marquées.

Considérons en effet le problème fictif représenté sur la figure 2.11. Nous avons d'un côté un environnement de départ E_0 avec son ensemble de règles utilisables, de l'autre un environnement E_1 appelé depuis E_0 , avec un sous-ensemble de règles qui a été activé par la méta-règle MR_1 et qui contient les règles R_3 et R_4 . Supposons que R_3 soit déclenchée dans E_1 et pas R_4 . R_3 va alors être marquée (cf. les "*" sur la figure). Que se passe-t-il lorsqu'il y a retour dans E_0 ? Conformément à ce que nous avons vu jusqu'à présent, seuls les marquages de règles persistent d'un environnement appelé à un appelant. Le nouvel ensemble de règles à considérer devrait donc correspondre à $\{R_2, R_4\}$ (cf. la figure 2.12).

où R_3 a effectivement conservé son masquage et où R_4 apparaît. Le fait que cette dernière règle se retrouve dans E_0 comme si elle n'avait jamais figuré dans E_1 , comme si elle n'avait jamais été utilisée, nous a troublé. Il nous semble en effet que toute règle est utilisée, lors du raisonnement, au moment opportun; on estime donc que l'utilisateur, lorsqu'il désigne un sous-ensemble de règles à activer à un instant donné, ne souhaite pas qu'une des règles de ce sous-ensemble soit utilisée à un autre moment ni dans d'autres circonstances (à moins, bien entendu, qu'il ne le mentionne explicitement). Or, les ensembles de règles utilisables des environnements appelés sont inclus dans ceux des environnements appelants; on retrouve donc toute règle d'un environnement appelé dans un environnement appelant (c'est le cas notamment pour notre problème fictif). Une règle mise en avant dans un environnement appelé, à un instant donné du raisonnement, se retrouvera à nouveau candidate au déclenchement dans

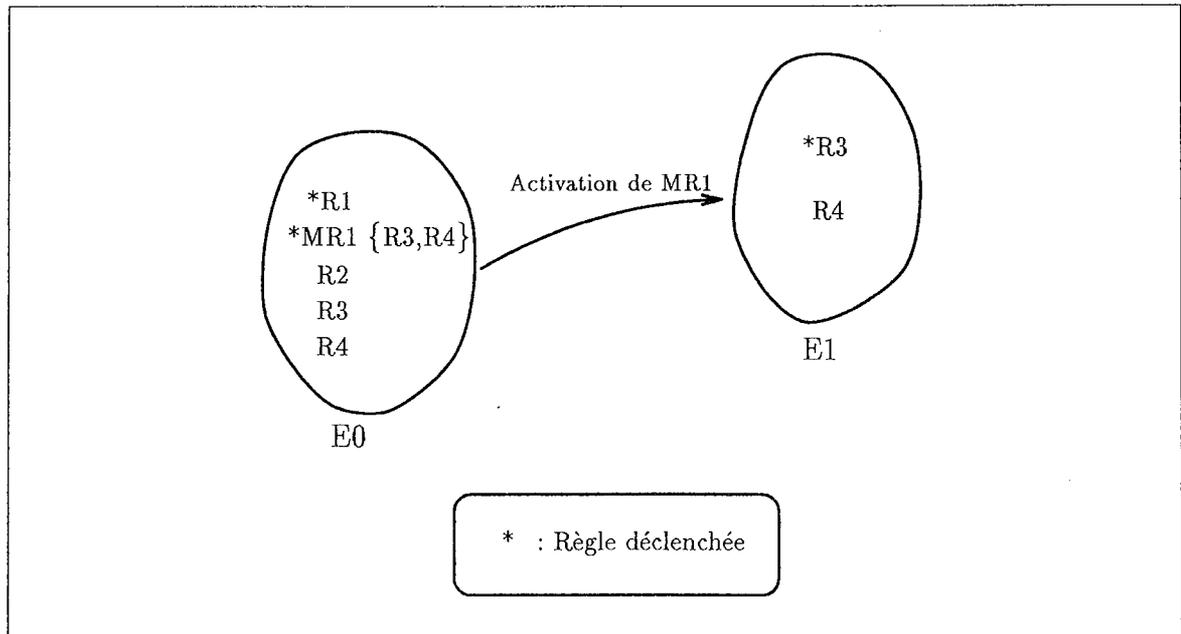


Figure 2.11.

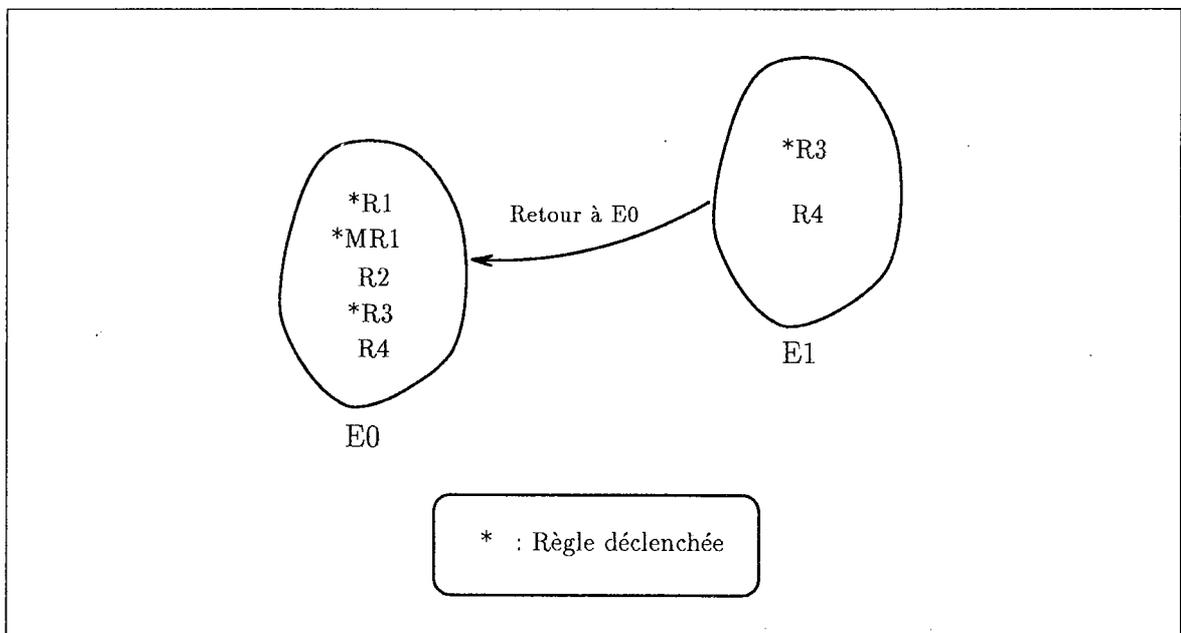


Figure 2.12. Mise à jour de l'ensemble des règles utilisables : marquage des règles déclenchées.

l'environnement appelant, ceci contre toute attente de l'utilisateur. Celui-ci considère en effet que l'activation d'un paquet de règles lui fournit, entre autres, les moyens de pouvoir modifier dynamiquement les priorités relatives des règles de l'environnement appelant. Aussi avons-nous jugé préférable d'écarter toute règle ayant appartenu aux ensembles de règles utilisables des environnements appelés.

Nous avons donc opté pour le marquage de toute règle ayant fait partie de l'ensemble des règles utilisables d'un environnement appelé (i.e. règle qui a été désignée par une méta-opération dans ce but), qu'elle y ait été ou non déclenchée, que ses prémisses y aient été ou non testées. Cela revient à faire évoluer la sémantique de la notion de marquage : elle passe de *règle déclenchée* à *règle envisagée, utilisée*.

Ainsi, dans notre exemple, le nouvel ensemble de règles à considérer n'est pas $\{R_2, R_4\}$ (cf. la figure 2.12) mais $\{R_2\}$ (cf. la figure 2.13).

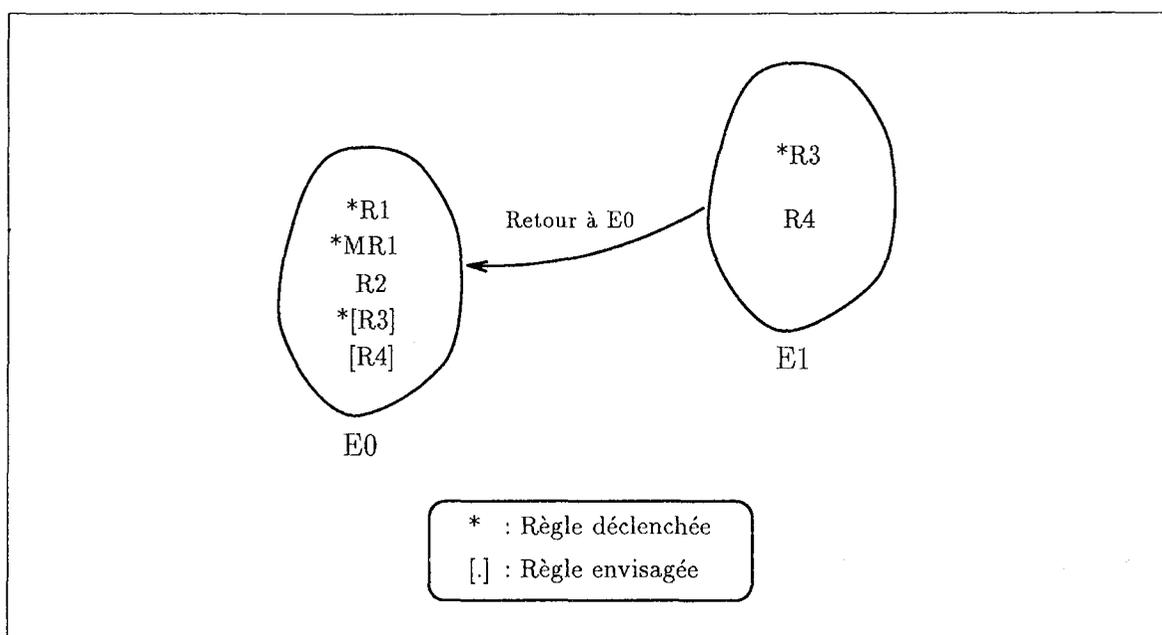


Figure 2.13. Solution retenue pour la mise à jour de l'ensemble des règles utilisables : marquage de toute règle ayant été déclenchée.

Une solution temporaire

La solution retenue (le marquage de toute règle ayant appartenue à un environnement appelé) semble remettre en cause les nombreuses questions que nous nous sommes posées sur le devenir des règles et paquets en revenant d'un tel environnement. Notre démarche a en fait été guidée par le souci de répondre à des préoccupations bien réelles dans la façon de mener le raisonnement et par le fait que la notion de marquage est condamnée à brève échéance. Elle n'a en effet été introduite que pour pallier l'absence d'un mécanisme de gestion de contextes de déclenchement d'une règle dans ATOME. La solution que nous envisageons ci-dessus n'est donc que temporaire.

Ainsi, si ces questions ne semblent plus avoir de sens dans le cadre de cette solution,

elles retrouvent toute leur signification dans des cas cognitifs bien réels :

- une règle de spécialiste peut en effet être déclenchée dans des contextes différents. L'introduction dans ATOME de mécanismes de gestion de tels contextes permettra "d'abolir" le concept de marquage de règles. Il sera alors nécessaire de connaître la portée des actions de méta-opérations pour pouvoir poursuivre correctement le raisonnement ;
- on peut de même être conduit à reconsidérer les connaissances de la spécialiste. C'est le cas typique d'un fonctionnement en mode cyclique. Lorsqu'un nouveau cycle de moteur est entamé au cours de la même activation de spécialiste, il faut tenir compte des inférences précédentes. La solution que nous avons retenue n'est, de ce point de vue, pas satisfaisante. Dans l'exemple précédent (cf. la figure 2.13), s'il semble pertinent de ne pas reconsidérer R_4 au retour dans E_0 lors du même cycle, cela devient contestable lorsqu'un nouveau cycle débute. Il en est de même pour MR_1 : on est en droit de se demander si une telle méta-règle, doit être déclenchée à nouveau ou pas. La réponse à cette question nous paraît alors dépendre de ce qui se sera passé dans l'environnement appelé. Le problème de la portée des modifications survenues dans de tels environnements se repose alors, ne serait-ce que parce que des démarquages de règles (R_4 et MR_1) sont envisagés ;
- sans même songer à des perspectives d'avenir, il y a actuellement moyen de démarquer une règle. Cette facilité suffit à elle seule à redonner tout son sens au problème de la portée des actions de méta-opérations.

La mise à jour de l'ensemble des règles utilisables d'un environnement appelé se résume donc, pour l'instant, à la suppression de toute règle ayant appartenu à l'ensemble des règles utilisables d'un environnement appelé.

Nous sommes conscients du fait que cette solution n'est pas pleinement satisfaisante. Elle est due à l'absence de mécanismes de contextes de déclenchement de règles et ne peut, de ce fait, être que temporaire. Elle sera à reconsidérer lorsque nous disposerons de tels mécanismes. Il faudra alors tenir compte à la fois des contextes et de ce qui nous a poussé à marquer toutes les règles ayant appartenu à l'ensemble des règles utilisables d'un environnement appelé, ces motivations étant fondées sur le plan cognitif. Dans la même ligne, le marquage systématique des méta-règles sera également à revoir.

2.4.5 Nouvelle structure d'une spécialiste

La définition du nouveau moteur de ATOME nous a conduits à modifier la façon dont une spécialiste est créée. Ses caractéristiques sont présentées sur la figure 2.14.

Nous pouvons constater, en comparant avec les anciennes propriétés d'une spécialiste (cf. la figure 1.1), que seules deux modifications ont été apportées :

- d'une part, le champ *base de règles* a disparu. Ceci est dû au fait que les règles des spécialistes sont maintenant définies indépendamment de celles-ci. Il en résulte

1. *Nom* : nom de la spécialiste
2. *Variables locales* : leur principal rôle est de fournir le contexte de travail de la spécialiste. Celle-ci ne travaille en effet pas sur l'ensemble des blackboards de l'application mais avec une petite partie de ces blackboards. Les données nécessaires lui sont donc fournies par ces variables auxquelles des fonctions de filtrage sur les blackboards sont associées.
Cet ensemble de variables est divisé en deux parties :
 - (a) *Variables de précondition* : ces variables sont liées lors de la phase de vérification de la précondition de la spécialiste et restent accessibles lors de sa phase d'activation. Elles peuvent donc être manipulées dans sa précondition ainsi que dans ses règles.
 - (b) *Variables d'action* : ces variables sont liées lors de la phase d'activation de la spécialiste et peuvent apparaître dans les règles associées à celle-ci.
3. *Précondition* : liste de conditions que la spécialiste doit vérifier pour devenir activable.
4. *Connaissances initiales* : il s'agit d'un prédicat qui détermine l'ensemble de règles avec lequel la spécialiste pourra commencer son raisonnement.
5. *Mode de fonctionnement* : cette propriété permet de préciser le mode d'interprétation de la base de règles. Le mode est à définir par ailleurs (cf. § 2.4.3).

Figure 2.14. Nouvelles caractéristiques d'une spécialiste.

une plus grande modularité et une plus grande efficacité. En effet, d'un point de vue pratique, un utilisateur n'a plus à redéfinir l'ensemble d'une spécialiste lors d'une exécution mais uniquement les connaissances qui ont été modifiées ou ajoutées ;

- d'autre part, le champ *connaissances initiales* fait son apparition. Ce champ permet de limiter l'ensemble des règles qui seront potentiellement déclenchables lors de l'activation de la spécialiste. Jusqu'alors, une spécialiste disposait en permanence de la totalité de ses règles lors de son raisonnement. Etant donné les motivations premières qui ont conduit au développement du nouveau moteur (i.e. mieux cibler le raisonnement des spécialistes en leur permettant de choisir la connaissance pertinente en fonction d'un focus donné), il nous fallait donner cette possibilité de restriction à l'utilisateur. Cela évite ainsi d'avoir à parcourir une première fois toute la connaissance.

Ce champ est représenté par un prédicat, qui permet de retranscrire un focus à la fois très précis et variable. Cette variabilité est due au fait que le prédicat

peut porter sur l'une des caractéristiques des événements qui autorisent le déclenchement de la spécialiste. Il y a alors une véritable transmission de focus de la tâche vers la spécialiste.

2.4.6 Incidence des aménagements de ATOME sur la méthode d'acquisition des connaissances

Les extensions de ATOME, présentées dans ce qui précède, introduisent de nouvelles possibilités de structuration des connaissances au sein des spécialistes, conformément au raisonnement expert. Il nous faut donc en tenir compte dans le cadre de la méthode d'acquisition des connaissances que nous proposons dans la partie III.

Contrairement à ce que nous avons proposé pour le découpage en sources de connaissances, nous ne procédons pas de façon cyclique (phase descendante - phase ascendante) pour le découpage au sein des sources de connaissances du domaine. En effet, si le processus cyclique de la figure 3.7 de la partie III nous semble bien adapté pour des découpages fonctionnels, tel que cela est le cas dans la démarche que nous avons décrite, il n'en est pas de même pour des découpages structurels. Or, les découpages sont ici structurels. Par exemple, pour la spécialiste *Sp-recherche-causes*, les connaissances ont été regroupées selon la dégradation, la cause, le type de causes, etc., qu'elles permettent de traiter. L'application des constructeurs n'a donc plus lieu d'être.

Aussi proposons-nous de procéder de façon progressive à l'acquisition des connaissances et de les structurer au fur et à mesure. Le focus de ce processus est constitué par le domaine de compétence de la spécialiste. Le premier mouvement consiste à expliciter quelques connaissances du domaine sans tenir compte d'éventuels regroupements. En effet, seul un premier aperçu sur les connaissances manipulées par la compétence-focus et sur le raisonnement qui est tenu par l'expert dans le cadre de cette compétence peut indiquer si de tels regroupements sont pertinents pour reproduire le raisonnement lui-même. Nous ne proposons pas d'expliquer la totalité des connaissances puis de les regrouper, tel que cela est fait dans [Bisseret 88], mais tout d'abord de se faire une première idée de ces connaissances avant d'en dégager des sous-ensembles cohérents. Cela correspond à une phase de caractérisation de la source de connaissances en cours de traitement. Le processus se poursuit alors en laissant à l'expert le soin d'exprimer son savoir-faire sur cette compétence particulière, dans un contexte de résolution de problème. Les nouvelles connaissances acquises sont placées dans un groupe adéquat, existant ou nouvellement créé.

Les divers groupes peuvent cependant fournir des focus structurels. Ainsi, le cognicien pourra parfois axer le processus d'acquisition sur la connaissance d'un groupe particulier. Le focus lui permettra alors de disposer d'un moyen systématique de cerner les connaissances du groupe.

Cette façon de procéder vient s'intégrer dans le processus d'acquisition que nous avons décrit au chapitre 3 de la partie III. Il ne s'agit que de premières réflexions et sont, de ce fait, à approfondir.

2.4.7 Conclusions

Il est courant de dire que les performances d'un système à base de connaissances sont conditionnées par la quantité et la qualité des connaissances représentées. Celles-ci dépendent en partie du potentiel de représentation des connaissances du générateur choisi. Notre travail a porté sur l'augmentation de ce potentiel pour l'outil à base de tableau noir ATOME. La tâche d'acquisition des connaissances est déjà suffisamment difficile pour qu'il y ait, en plus, à se poser le problème de savoir si le raisonnement expert pourra être représenté correctement.

Les besoins répertoriés à ce sujet lors du développement d'applications avec ATOME, notamment celui du système ROSY, sont à l'origine de ce travail. En concevant un nouveau moteur d'inférence, nous avons fourni aux agents-spécialistes de ATOME, sources de connaissances du domaine travaillant sur les données des tableaux noirs, les moyens d'agir sur leurs connaissances : les réorganiser dynamiquement, modifier la façon de les mettre en œuvre, choisir celles avec lesquelles elles vont travailler en fonction d'un focus donné, ... à l'aide des outils de structuration et de manipulation que nous proposons dans la version 1 du moteur, elles exploitent au mieux ces connaissances tout comme le fait l'expert. Grâce à ces fonctionnalités, elles permettent maintenant de représenter dans leur globalité les connaissances du niveau *inférence* de KADS. Nous avons en effet pu constater, en établissant le parallèle entre les trois niveaux de ATOME et les niveaux de KADS, que cet aspect de gestion de la connaissance manquait aux spécialistes pour être les représentantes fidèles des connaissances du niveau *inférence*. Il autorise des regroupements structurels de la connaissance, modélisant ainsi le "domain view" du niveau "inference" de KADS [Wielinga *et al.* 91].

Nous rejoignons aussi la définition que J. Ferber et M. Ghallab donnent d'un agent dans [Ferber et Ghallab 88], définition que nous rappelons en 1.2.1 de la partie I : ces agents y sont qualifiés "d'entités physiques ou abstraites *capables d'agir sur elles-mêmes*". Les spécialistes de ATOME sont devenues de telles entités.

Une autre des possibilités des agents a également été modélisée : celle de *création explicite* d'agents au cours du raisonnement. Cette propriété est associée, dans [Ferber et Ghallab 88], aux agents communiquant par envois de messages. Elle a été transmise aux spécialistes, agents communiquant non par envois de messages mais par partage d'informations, par le biais de la notion de *structuration dynamique des connaissances*. La "création"¹⁷ d'ensembles de règles au cours du raisonnement, en fonction des besoins et du cours de ce raisonnement, peut en effet y être assimilée : on "crée" en quelque sorte des sous-spécialistes au cours du processus de résolution. Ainsi, la spécialiste réagit de façon différente à des stimuli différents tout comme le fait l'expert, que ces réactions aient lieu avant le début du raisonnement ou au cours de celui-ci.

Notons également qu'un effort a été fait pour que l'utilisation de ce moteur soit aisée. Nous pouvons rappeler, à ce propos, la compatibilité avec le moteur d'ordre 0⁺,

17. Nous mettons création entre guillemets car il n'y a pas vraiment de création lorsqu'il s'agit de paquets implicites. Ce terme doit donc plutôt être entendu comme "regroupement dynamique de règles, avec création explicite ou implicite".

les modes de fonctionnement prédéfinis, les bibliothèques de modes assurant leur ré-utilisabilité ou encore le guide fourni pour construire de nouveaux modes. Un éventuel utilisateur de ATOME aura ainsi tout le loisir de découvrir progressivement les potentialités du nouveau moteur, au fur et à mesure du développement de son application.

Le moteur d'ordre 1 n'est cependant pas parfait. Nous avons en effet pu constater, tout au long de cette partie, le malaise introduit par le manque de contextes de déclenchement de règles. Cette absence nous a conduits à nous poser des questions troublantes sur le moteur. Il nous fallait y répondre et cela a parfois abouti à des réponses non satisfaisantes. Nous pouvons rappeler, à ce titre, l'introduction du paramètre *rule* (voir à la page 226), la possibilité de démarquer des règles (voir à la page 222) ou encore la mise à jour de l'ensemble des règles utilisables lors du retour à un environnement appelant (cf. § 2.4.4).

Il serait bon d'introduire de tels contextes. Il faudrait alors repenser les notions mentionnées ci-dessus et notamment réfléchir à ce que devient une méta-règle "appelante" au retour d'un environnement appelé. Notons qu'une étude préalable sur ce que peuvent être de tels contextes a été menée au début de l'année 1991, dans le cadre d'un projet d'étudiants de DESS IA. Les conclusions issues de ce projet conduisent à considérer un contexte comme une mémoire associée à une règle, dans laquelle seraient stockées les valeurs d'attributs ou les noms des nœuds des blackboards ayant permis le déclenchement de la règle. Suite à observation des règles utilisées dans les diverses applications réalisées avec ATOME, ces données ont été jugées suffisantes pour servir de contexte. Il ne semble notamment pas nécessaire d'estampiller un nœud intervenant dans un contexte et d'en créer ainsi plusieurs instances, chacune correspondant à l'état de ce nœud à un temps t donné, comme cela est fait dans OPS5.

Il n'en reste pas moins vrai qu'il est maintenant possible de modéliser certaines stratégies de raisonnement expert qui ne pouvaient l'être jusqu'à présent et de reproduire plus fidèlement ce raisonnement. Les spécialistes ont acquis un fonctionnement hétérogène, plus riche et plus élaboré que celui proposé dans le moteur d'ordre 0⁺. Le comportement opportuniste des sources de connaissances de ATOME ne réside plus seulement au niveau du contrôle (tâches et stratégie). Il a été étendu aux sources de connaissances du domaine. On peut en effet maintenant parler *du comportement de résolution opportuniste des spécialistes*.

Tout système développé avec ATOME bénéficie désormais d'un plus grand pouvoir de représentation de la connaissance experte. Nous avons contribué à augmenter ce qui a fait l'intérêt d'ATOME : une grande souplesse dans le choix de la solution adaptée à un problème, un processus de résolution incrémental et opportuniste et un contrôle variable et hybride, qui se trouve maintenant à tous les niveaux. Il s'agit maintenant de voir comment ces extensions peuvent être prises en compte dans le cadre de la méthode de développement de systèmes multi-experts présentée dans la partie III. Nous en avons donné un premier aperçu au paragraphe 2.4.6, qui doit être approfondi.

3

Réflexions sur le raisonnement d'une source de connaissances de contrôle

De même que le raisonnement au sein d'une spécialiste nous a posé des problèmes (que nous avons résolus comme indiqué au chapitre 2), nous nous sommes penchés sur ceux concernant l'association définie autour d'une source de connaissances de contrôle. Nous englobons dans cette notion d'"association" (ou "groupe de compétence") non seulement la source de connaissances (SC) elle-même et son raisonnement mais aussi :

- la structure de contrôle qu'elle consulte pour décider (liste d'événements pour les tâches, résumés des blackboards pour la stratégie),
- les sources de connaissances contrôlées,
- et la communication entre ces sources de connaissances et celle de contrôle.

Fort de notre expérience avec le système ROSY, nous avons en effet pu constater que certains des éléments mentionnés ci-dessus laissaient à désirer dans un tel groupe. Nous estimons en effet que la communication "SCs contrôlées - SC de contrôle" n'est actuellement pas suffisamment explicite. De même, la source de connaissances de contrôle n'a pas suffisamment d'emprise sur sa structure de contrôle. Il en découle des difficultés, au niveau du raisonnement, de même nature que celles que nous avons pu aborder au paragraphe 2.1. Le raisonnement modélisé n'est notamment pas toujours fidèle à la démarche experte. Parfois même il n'est pas possible de reproduire la démarche.

Nous présentons donc, dans ce qui suit, les réflexions que nous avons menées sur une telle association et les améliorations que nous envisageons, tout en expliquant pourquoi de telles modifications sont souhaitables. Ceci est illustré d'exemples extraits du système expert ROSY. Nous voyons ensuite quels peuvent être les impacts de ces changements sur le raisonnement des divers membres d'un groupe de compétence. Le développement de ROSY ayant, en majeure partie, porté sur la mise au point du raisonnement d'une tâche, nous nous plaçons au niveau d'une tâche. Nous étudions de ce fait la communication "spécialistes-tâche", les listes d'événements et les retombées sur la tâche et les spécialistes contrôlées. Nous verrons, à la fin de ce chapitre, comment une telle approche peut, à notre avis, être généralisée au niveau de la stratégie.

Nous entrons ici dans le domaine du futur. Les modifications que nous allons présenter n'ont en effet pas encore atteint le stade de la réalisation. Elles ont été cependant longuement et mûrement réfléchies. Elles sont le fruit non seulement des diverses expériences menées au CRIN en matière de réalisations de système expert avec ATOME (ROSY, ABYSSE [Chevrier *et al.* 90] ou GRAPHEIN [Chenevoy et Belaïd 91]) mais aussi de longues discussions avec toutes les personnes qui s'intéressent à ATOME. Ainsi, le foisonnement d'idées avait abouti, en juin 1990, à une réunion de travail sur l'évolution du générateur. Y participaient des personnes du CRIN travaillant à des systèmes multi-agents ou à l'introduction de raisonnements particuliers dans un tel environnement (raisonnements incertain [Doggaz 92], hypothétique [Boury-Brisset *et al.* 90] ou en temps réel [Lalanda *et al.* 90]) ainsi que des représentants des sociétés MATRA et MSII, travaillant eux aussi à des problèmes de raisonnement avec ATOME.

3.1 Le manque d'expressivité des événements

3.1.1 Un manque par rapport à la nature même des événements

Nous avons vu, au chapitre 1, que l'événement est un moyen de communication unilatéral entre une spécialiste et une tâche. C'est en effet à travers lui que la spécialiste indique à la tâche les actions qu'elle a entreprises sur les blackboards et qu'elle juge comme étant des informations importantes à signaler. Ces événements ont une structure fixée a priori, qui est la même pour toutes les tâches et qui ne permet d'exprimer que des changements sur les nœuds des blackboards (cf. § 1.2.3). Ils se situent à un niveau d'abstraction plus élevé que celui des nœuds des blackboards, ce qui a initialement été voulu. On a, en quelque sorte, pris modèle sur le monde de l'entreprise. Il est en effet possible de faire un parallèle entre l'architecture hiérarchique de ATOME et celle qui peut se rencontrer dans une industrie ou une usine. Les spécialistes peuvent alors être assimilées à des opérateurs œuvrant à la fabrication d'une même pièce, les tâches aux agents qui dirigent les travaux. Ces agents ont besoin de savoir ce que les opérateurs font pour fournir les directives de travail ; ils ne jugent pas sur les mêmes données qu'eux puisqu'ils n'ont pas le même genre de décisions à prendre. La tâche se trouve dans la même position vis-à-vis des spécialistes qu'elle contrôle.

Nous estimons qu'il faut augmenter le pouvoir d'expression des événements, tout en préservant leur degré d'abstraction. Il est en effet des cas où la spécialiste souhaiterait indiquer précisément à la tâche qu'elle a effectué telle opération, certes, mais avec telle valeur d'attribut ou sur un nœud particulier du fait d'une de ses valeurs d'attribut. Elle n'a pas les moyens de le faire, la structure d'un événement ne lui permettant de fournir qu'une information beaucoup moins précise que celle qu'elle souhaiterait fournir. Le cogniticien doit alors faire preuve de ruse pour parvenir à ce que l'événement représente malgré tout l'information initiale. Cela n'est malheureusement pas toujours possible et certains événements ne peuvent être différenciés. Par exemple, il n'est pas possible de distinguer la création de différents types de dégradations apparaissant sur une chaussée alors que cette distinction pourrait être utile à la tâche *Diagnostic*. Nous

retrouvons ici l'absence de hiérarchisation et de classification au sein des blackboards (cf. la partie IV). La consultation de la valeur d'un attribut est en effet rendue nécessaire par ce manque. Toute typologie, hiérarchie ou classification dans un niveau de blackboard est exprimée via des attributs particuliers qui sont attachés à la description d'un niveau. Ainsi, on distinguera les divers types de dégradations (fissures, arrachements, remontées ou déformations) via l'attribut *famille* du niveau *concept-dégradation*, l'accès à cet attribut se faisant, pour toute dégradation apparaissant sur une chaussée, via le lien qui les relie au niveau *concept-dégradation*.

3.1.2 Un manque dans les échanges des spécialistes vers la tâche

La spécialiste peut vouloir non seulement fournir une information plus précise à la tâche mais aussi une information différente, correspondant de façon plus explicite au travail qu'elle a fait ou qu'elle ne peut pas faire, rendant mieux compte de son action.

Nous nous sommes par exemple trouvée, lors du développement du système expert ROSY, dans des cas où la spécialiste ne pouvait effectuer son raisonnement que partiellement car il lui manquait une donnée, celle-ci pouvant par ailleurs être inférée par une ou plusieurs autres spécialistes. Ainsi, *Sp-recherche-causes* peut avoir besoin de connaître l'état d'un réseau particulier pour trouver la cause de la dégradation qu'elle est en train de traiter. *Sp-réseaux* est capable de fournir une telle information. La solution que nous avons retenue consiste à empêcher *Sp-recherche-causes* de se déclencher tant que l'état des réseaux de la chaussée n'est pas connu. Il suffit pour cela de mettre une condition adéquate dans la partie "préconditions" de la spécialiste. Cette solution n'est cependant pas satisfaisante car elle impose la nécessité pour *Sp-recherche-causes* de connaître l'état des réseaux. Or il n'est pas sûr *a priori* que cette spécialiste ait besoin d'une telle information. Elle peut très bien s'en passer : tout dépend en fait des cas qu'elle a à traiter.

Plutôt que d'opter pour une telle solution, qui relance le problème de la traduction fidèle du raisonnement expert (cf. § 2.1), il nous semble préférable que la spécialiste fasse une demande explicite de l'information dont elle a besoin à la tâche. Une véritable discussion pourrait alors s'engager entre les deux sources de connaissances, la première quémendant des informations pour pouvoir exercer pleinement ses talents, la seconde y répondant en activant la ou les spécialistes les plus à même de fournir ces renseignements. Un tel échange n'est actuellement pas possible, étant donné la structure des événements.

Il ne s'agit là que d'un exemple de communication particulière (par un message explicite) entre une spécialiste et une tâche. D'autres types de messages sont envisageables. Dans la ligne de ce que nous avons évoqué ci-dessus, il semble pertinent qu'une spécialiste puisse dire explicitement qu'elle a travaillé et fourni l'information qu'on lui demandait ou, au contraire, que, malgré tous ses efforts, elle n'est pas en mesure de fournir cette information. Il y a ici la notion d'un travail accompli mais qui n'a pas forcément abouti pour une raison ou une autre, ce que la tâche doit savoir.

De même, une spécialiste peut vouloir mentionner explicitement qu'elle a atteint le

but qui lui est assigné. Celui-ci se confond parfois avec le fait d'affecter une valeur à un des attributs d'un nœud donné, ce qui peut être traduit par un événement classique. Mais cela n'est pas toujours le cas. Le cognicien est, là encore, conduit à trouver un palliatif. Il fait en sorte que la spécialiste produise un événement qui, bien que mentionnant la mise à jour d'un certain attribut, devra être interprété par la tâche comme étant le message "j'ai atteint le but pour lequel je suis programmée" émanant de la spécialiste. L'événement est ici utilisé en tant que "remplaçant" du message qu'il est censé représenter, remplaçant de moindre qualité puisque ses capacités d'expression ne lui permettent de reproduire ce message que de façon détournée. L'utiliser pour indiquer une autre information que celle qu'il contient explicitement ne nous satisfait donc pas. Sans compter qu'une telle utilisation n'est pas toujours possible du fait de l'ambiguïté qu'elle engendre. Deux événements peuvent en effet voir des caractéristiques semblables et, de ce fait, être confondus alors qu'ils représentent des messages différents.

Il nous semble donc que la communication entre tâches et spécialistes doit être rendue plus explicite. De même que l'opérateur peut s'adresser directement à l'agent chargé d'organiser son travail lorsqu'il rencontre une difficulté dans celui-ci ou pour dresser un bilan de ce qu'il a fait, la spécialiste doit pouvoir faire un compte rendu explicite de ses actions à la tâche.

Nous avons pu constater, dans ce qui précède, que la structure d'événement ne fournit pas une richesse d'expression suffisante pour pouvoir représenter les divers comptes rendus possibles. Il nous faut donc agir pour faire en sorte qu'une spécialiste puisse indiquer ce qu'elle a fait. Ce but peut être atteint de deux façons : améliorer ce qui existe déjà (les listes d'événements et le mécanisme de création de ces entités) ou créer des choses nouvelles. Ces deux approches sont développées, à tour de rôle, dans le paragraphe 3.2 suivant.

3.2 Une communication "SC de contrôle - SCs contrôlées" plus explicite

Les modifications que nous envisageons ici ont pour but de faire évoluer les structures d'événement et de liste d'événements. L'objectif visé est l'accroissement du pouvoir expressif des événements et, au-delà, la possibilité pour la tâche de reproduire plus fidèlement le raisonnement expert puisqu'elle disposera d'une meilleure information sur ce que les spécialistes ont fait.

3.2.1 Actions sur les structures existantes

Le tout premier moyen de résoudre le manque de précision évoqué au paragraphe 3.1.1 consiste à intervenir sur le mécanisme de création des événements et à introduire une création conditionnelle. En donnant les moyens à la spécialiste de ne créer un événement que lorsque certaines conditions sont vérifiées, le pouvoir expressif de cet événement est augmenté. Il est enrichi du filtre qui a été appliqué lors de sa création,

ceci de façon implicite, ce filtre n'apparaissant pas dans le corps de l'événement. L'information que ce dernier véhicule est, de ce fait, précisée. L'événement créé est certes toujours plus général que l'information qu'il traduit mais, étant donné le fait qu'il n'est créé qu'après test sur des propriétés caractéristiques, il désigne cette information et pas une information plus globale. Ce ne sera pas "modification de l'attribut A" mais, par exemple, "modification de l'attribut A, avec telle valeur (ou tel coefficient de vraisemblance, ...)".

Cette solution ne demande pas de remaniements profonds de la structure d'événement. Elle ne permet cependant de résoudre qu'une partie des problèmes soulevés auparavant. Qui plus est, elle n'est pas pleinement satisfaisante car l'augmentation du potentiel expressif des événements n'est qu'un leurre du fait de son caractère non explicite. Il est ainsi possible de se trouver face à des événements qui, bien que créés dans des conditions différentes et exprimant des actions différentes, vont être semblables. La tâche sera alors dans l'incapacité de les différencier.

Il n'en reste pas moins qu'il s'agit d'une solution attrayante par sa simplicité qui, en cas d'événements non ambigus (i.e. d'événements qu'il ne sera pas possible de confondre), sera certainement appréciée et utilisée.

Les notions de hiérarchie et de classes d'objets au sein d'un niveau, évoquées ci-dessus, prennent ici également toute leur signification. Si l'on pouvait organiser hiérarchiquement les nœuds au sein d'un niveau, tel que cela a été mentionné dans la partie IV, le problème de la précision d'un événement serait résolu sans même avoir à modifier la structure d'événement. Il serait en effet possible de construire dans les blackboards tous les arbres hiérarchiques nécessaires à l'expression des événements dont la tâche peut avoir besoin pour raisonner. Ces événements comporteraient alors non seulement les renseignements qu'ils véhiculent actuellement (cf. § 1.2.3) mais aussi les noms des "sous-niveaux" (ou "sous-classes d'un niveau") où la spécialiste a agi. La hiérarchisation des niveaux des blackboards influencerait ainsi sur la représentativité des événements.

La création conditionnelle d'événements peut, dans un premier temps, être vue comme un palliatif du manque de classification dans les niveaux des blackboards. Elle permet en effet de faire comme si une telle classification existait. Il est alors possible de considérer que ce mécanisme devient obsolète à partir du moment où il est possible de construire de telles hiérarchies. Or on se rend rapidement compte que, même en structurant au maximum les niveaux des blackboards, il persiste des cas où il est impossible de distinguer un changement dans le blackboard d'un autre. Cela induisant une similarité sur les événements associés à ces modifications, la création conditionnelle redevient alors nécessaire. Ces deux solutions doivent donc cohabiter.

En les conjuguant, il nous semble que le problème de la précision des événements peut être totalement résolu, permettant déjà de progresser dans la recherche d'une communication plus explicite entre contrôleur et contrôlées. Le second aspect de cette communication (le côté diversification des types d'événements) n'est cependant pas abordé. Il ne peut, à notre avis, être traité que par une réforme plus profonde des

moyens de communication. C'est ce que nous présentons dans le paragraphe qui suit.

3.2.2 Définitions de nouvelles structures

Nous avons montré, au paragraphe 3.1.2, le besoin d'un meilleur compte rendu des actions des spécialistes à la tâche, cela pouvant en effet influencer de façon considérable sur le déroulement du raisonnement. Pour l'instant, nous avons répertorié quatre différents types de "messages" qu'une spécialiste peut vouloir transmettre à la tâche, comportant les informations suivantes :

- "il me manque telle ou telle information",
- "j'ai travaillé",
- "l'information qui m'a été demandée est fournie",
- et "but atteint".

La structure d'événement, telle qu'elle est actuellement définie, ne permet pas de traduire de telles informations. Il faut donc mettre en place de nouvelles structures dans ce but, pour pouvoir ainsi rendre explicite le rôle des spécialistes.

a - Plaidoyer pour une unique structure de contrôle

Il nous semble préférable de ne pas construire une structure en parallèle avec la liste des événements. Cela présente en effet plusieurs avantages :

- tout d'abord, il n'y a pas de nouvelle structure de contrôle à gérer. Les nouveaux types d'information transmis à la tâche sont en effet considérés comme des événements particuliers (des *événements-messages*) et pas comme des entités à part. Il y a eu évolution de la notion d'événements : il ne s'agit plus d'une liste d'événements mais d'une liste de signaux provenant des sources de connaissances contrôlées ;
 - cela implique qu'il n'y a pas non plus de nouveaux problèmes de priorité entre événements à traiter. Ceux-ci sont actuellement réunis au sein d'une unique structure d'accueil dans laquelle ils sont ordonnés. La tâche, lorsqu'elle raisonne, a recours à cet ordre sur les événements (notamment en mode "dirigé par les événements"). Si une seconde structure de contrôle vient se placer parallèlement à la première, il faudra savoir qui de la première ou de la seconde est à privilégier, ce qui suppose de donner la préférence *a priori* à un type d'événement. Ou encore, il faudra déterminer un interclassement entre les différents signaux indépendamment de leur structure d'accueil ; la séparation en deux n'a alors plus de sens.
- En mêlant les différents types d'événements dans une même structure, un tel problème ne se pose plus. Un ordre peut alors être instauré sur ces événements, toutes catégories confondues ;
- enfin, cela ne remet pas en question les modes de fonctionnement de la tâche, ce qui aurait pu être le cas si une seconde structure avait cohabité avec la première.

b - Un blackboard de contrôle

Nous avons opté ainsi pour une base de faits de contrôle, structure unique regroupant tout ce qui peut être transmis par une spécialiste à une tâche. Chaque tâche va donc voir une telle base se substituer à la liste des événements qu'elle a l'habitude de consulter. Dans l'état actuel de nos réflexions, deux grandes catégories d'événements sont envisageables : les *événements classiques* (ceux qui existent actuellement) et les *événements-messages* dont nous avons parlé jusqu'à présent. Mais la tâche peut parfaitement avoir besoin d'autres types d'information. La base de faits de contrôle doit donc non seulement permettre de représenter divers types d'événements, aux profils différents, mais aussi être suffisamment souple pour que de nouveaux types puissent être définis. Aussi, plutôt que de construire *a priori* une nouvelle structure de contrôle dont les éléments auraient un profil figé, proposons-nous d'associer à chaque tâche un *blackboard de contrôle* (ou *blackboard d'événements*, pour conserver le terme d'événement).

La structure de blackboard a été principalement retenue pour ses capacités à partitionner la connaissance en niveaux. Ceux-ci peuvent en effet être assimilés à des bases de données ayant chacune un modèle des entités qu'elles contiennent¹. Un niveau est un tel modèle pour les nœuds qu'il contient. Il est ainsi possible de définir autant de types d'événements différents qu'il y a de niveaux.

Utiliser un blackboard en tant que structure de contrôle associée à une tâche présente également les avantages suivants :

- il y a tout d'abord homogénéité par rapport à l'ensemble de l'architecture de ATOME ;
- cette homogénéité se retrouve également pour les nouveaux événements qui appartiennent à ces blackboards. Tous ont le statut de "nœuds-événements", ce qui permet de les manipuler de façon uniforme, indépendamment de leur type ;
- il n'y a pas à redéfinir les fonctions de test que la tâche utilisait pour repérer tel et tel événement dans sa liste d'événements. Cette dernière peut maintenant scruter son blackboard de contrôle en bénéficiant des nombreuses fonctions d'accès aux nœuds des blackboards et d'autres fonctions de test sur les attributs et liens de ces nœuds. Ces fonctions sont en effet automatiquement créées lors de la définition d'un blackboard ;
- enfin, la tâche a toute liberté dans le choix des événements qui l'intéressent. Elle peut non seulement décrire ceux qu'elles souhaitent récupérer, ce qui est actuellement le cas, mais aussi décrire explicitement la forme sous laquelle elle souhaite les récupérer. Nous lui offrons ici la possibilité de définir elle-même ses propres types d'événement, en fournissant la description des niveaux de son blackboard d'événements. Bien entendu, elle pourra opter pour les niveaux définis par défaut :

1. C'est d'ailleurs, en majeure partie, en tant que tels que les blackboards du système expert ROSY ont été utilisés (cf. la partie II).

- pour l'ensemble des tâches de l'application en cours (c'est alors le cogniticien qui fournit *a priori* la structure des événements),
- quelle que soit l'application. Il s'agit alors de niveaux de contrôle prédéfinis, fournis par ATOME.

Notons qu'il y a un danger à laisser à la tâche (c'est-à-dire au cogniticien) la possibilité de définir la structure des niveaux du blackboard de contrôle. La philosophie ATOME, qui prêche pour la conservation d'un certain niveau d'abstraction pour les événements, risque en effet de ne pas être respectée. Le cogniticien devra prendre garde à définir des nœuds-événements qui ne soient pas des nœuds des blackboards de données.

Deux exemples de blackboards de contrôle sont présentés dans la figure 3.1. Dans le premier, seuls deux niveaux ont été définis, correspondant aux événements classiques et aux événements-messages dont nous avons parlé ci-dessus.

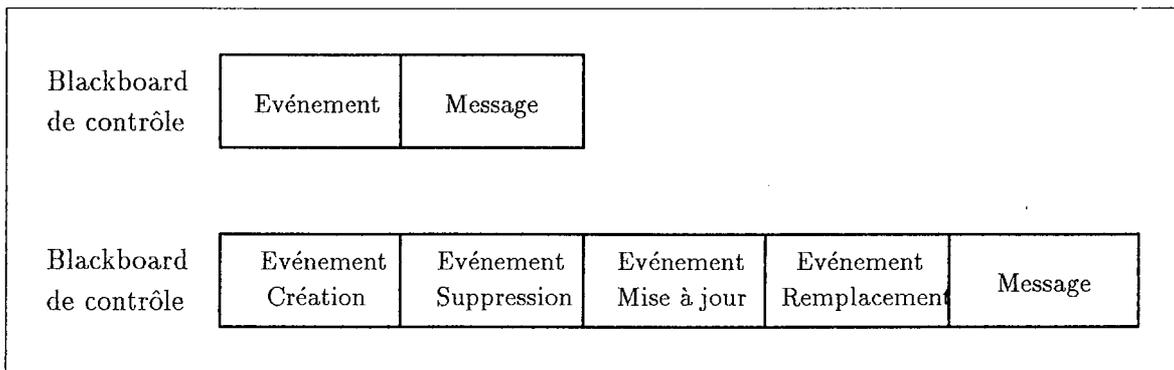


Figure 3.1. Exemples de blackboards de contrôle.

Dans le second blackboard, les niveaux correspondent aux différents types de mise à jour qui interviennent sur les nœuds des blackboards (création, suppression, mise à jour de la valeur d'un attribut par adjonction de la nouvelle valeur, remplacement de la valeur d'un attribut par une nouvelle valeur). Ils sont le résultat de la division du niveau "événement" du premier blackboard.

Ces deux exemples montrent, encore une fois, le malaise ressenti par le cogniticien en ce qui concerne la non-structuration au sein d'un niveau de blackboard. Ils pourraient en effet être équivalents si une telle structuration était introduite. Ils seraient alors représentés par un blackboard de contrôle du même type que celui des blackboards hiérarchiques de données dont nous avons parlé dans la partie IV et modélisés sur la figure 3.2.

Dans la suite de ce chapitre, nous distinguerons les nœuds-événements des événements tout court. Les premiers qualifient les nouveaux événements, entités appartenant aux blackboards de contrôle, les seconds les anciens (événements "classiques" des listes d'événements, ceux qui existent actuellement et qui ont été décrits au paragraphe 1.2.3 de cette partie).

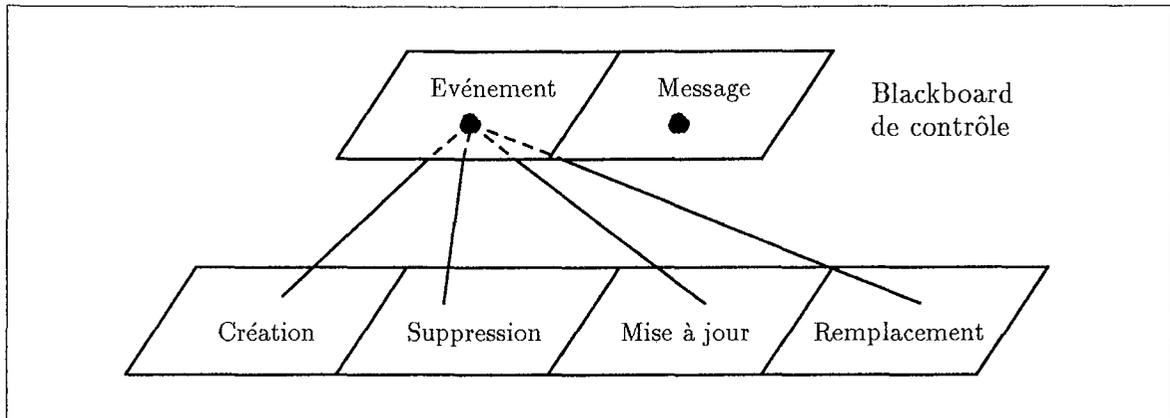


Figure 3.2. Exemple de blackboard hiérarchique de contrôle.

c - Création et propagation des nœuds-événements.

Le fait de disposer d'événements uniformes, à l'heure actuelle, présente l'avantage de faciliter la création et la propagation de ces événements. Tous ont en effet le même profil. La spécialiste les crée donc sans avoir à se soucier de leur format. Elle se contente d'indiquer qu'elle souhaite prévenir de son action les tâches éventuellement intéressées. C'est un mécanisme interne à ATOME qui se charge alors automatiquement de fournir les valeurs des champs constitutifs de l'événement à créer. C'est également lui qui propage les événements ainsi créés vers les tâches intéressées. La spécialiste ne se soucie donc pas non plus de savoir où ces événements seront envoyés.

Avec une structure telle qu'un blackboard de contrôle, un tel mécanisme ne peut plus fonctionner. Les événements n'ont plus la même structure. La spécialiste doit donc se préoccuper de leur format. Il lui faut indiquer précisément le niveau où le nœud-événement sera placé, ainsi que les valeurs de ses attributs. Cela suppose que les tâches intéressées par le même type d'informations aient des niveaux semblables, c'est-à-dire des niveaux ayant en commun leurs noms et leurs structures (attributs et liens)². Un mécanisme interne peut alors repérer les tâches intéressées (i.e. les tâches dont le blackboard de contrôle associé comporte un tel niveau) et mettre à jour, de façon automatique, des liens entre nœuds-événements permettant de conserver la notion de priorité entre ces entités.

Cette priorité entre événements est déduite de la position relative fournie par la spécialiste qui est à l'origine de la création d'un événement. Là encore, dans la version actuelle de ATOME, ces positions s'expriment de manière relativement simple, du fait de l'uniformité de la structure d'événements. La spécialiste peut en effet demander à ce que l'événement soit placé avant tel type d'événement, après tel autre, après un troisième mais avant un quatrième, ..., en tête de la liste des événements ou en queue. Avec la structure de blackboard, cela devient beaucoup plus compliqué

2. On peut cependant envisager qu'il n'y ait qu'un recouvrement partiel entre attributs de deux niveaux de même nom, certains étant présents dans un des niveaux et pas dans l'autre, et *vice versa*.

pour les placements "avant" et "après"³. Les différents types de nœuds-événements, correspondant aux différents niveaux des blackboards de contrôle, n'ont a priori pas de point commun d'un blackboard à l'autre. Il va donc falloir décrire de façon exhaustive tous les nœuds-événements susceptibles de se trouver avant ou après l'événement dont on recherche la position, tous niveaux de tous blackboards confondus.

La tâche semble rude. Nous avons choisi de la résoudre de façon indirecte. Elle ne pose en fait de problème que dans la mesure où c'est à la spécialiste qu'incombe la charge de fournir une telle position pour le nœud-événement. Or il ne nous semble pas logique que ce soit justement les spécialistes qui décident pour la tâche de l'ordre dans lequel cette dernière va consulter ses événements (ou ses nœuds-événements pour la nouvelle structure); nous reviendrons sur ce point au paragraphe 3.3.2. A partir du moment où nous contestons cette fonction aux spécialistes, le problème de l'expression de la position relative d'un nœud-événement par la spécialiste ne se pose plus.

d - Vers une structure d'événement-objet

La structure de blackboard de contrôle est un premier pas dans l'évolution de la structure de contrôle associée à une tâche. Son implantation peut être envisagée à court terme. Elle présente cependant l'inconvénient de compliquer le processus de création et de propagation des nœuds-événements. La spécialiste est en effet dans l'obligation de fournir le nom du niveau où les nœuds-événements créés doivent être rangés ainsi que les valeurs de leurs attributs (cf. ci-dessus).

Il serait alors appréciable que certaines de ces valeurs puissent être automatiquement déterminées par un mécanisme interne, tel que cela se passe actuellement lors de la création d'événements (les champs constitutifs d'un événement sont automatiquement renseignés). Il faudrait alors pouvoir attacher aux attributs d'un nœud-événement des méthodes de calcul de leurs valeurs, à la manière des facettes "si-besoin" des représentations objets.

Il est donc souhaitable que, à plus longue échéance, ces blackboards de contrôle évoluent vers des blackboards dont les nœuds seraient des objets. Nous rejoignons, là encore, l'évolution envisagée pour les blackboards de données dans la partie IV. Ceci fait apparaître un dernier avantage à utiliser un blackboard à la place d'une simple liste d'événements : tout blackboard de contrôle bénéficie des améliorations réalisées sur les blackboards de données puisqu'il s'agit des mêmes structures. Toutes deux évolueront donc en parallèle (notamment, ce qui a été décrit dans la partie IV devient valable pour les nœuds-événements).

3. Les positions "en tête" et "en queue" de liste ne posent pas de problème car elles sont absolues.

3.3 Une gestion explicite de la liste des événements

Pour plus de commodité, nous nous plaçons ici au niveau des événements et des listes d'événements qui existent actuellement. Tout ce qui va être dit peut néanmoins tout à fait être transposé aux nœuds-événements et aux blackboards de contrôle.

Toute tâche utilise, tout au long de son raisonnement, la structure de contrôle qui lui est associée, c'est-à-dire sa liste d'événements. La seule opération qu'elle entreprenne sur cette liste est la consultation. Elle ne peut en effet n'y bouleverser l'ordre des événements, ni supprimer certains de ces événements alors que le raisonnement s'y prêterait. Elle ne choisit même pas l'ordre dans lequel les événements qui l'intéressent seront rangés. Nous tenons à montrer, dans ce paragraphe, ce que la tâche gagnerait à gérer explicitement sa liste d'événements.

Nous insistons tout d'abord sur l'importance de l'ordre des événements dans la liste qui les accueille. Puis nous voyons pourquoi il nous semble pertinent que ce soit la tâche elle-même qui décide *a priori* de l'ordre des événements dans la liste d'événements. Enfin, nous proposons de lui donner les moyens de pouvoir agir sur ces événements.

3.3.1 Importance de l'ordre des événements

L'ordre des événements dans une liste d'événements est un facteur décisif dans le déroulement du raisonnement d'une tâche. Dans le cas d'un raisonnement "dirigé par les événements" (cf. § 1.2.2), le déroulement est totalement conditionné par cet ordre. Il peut également intervenir en mode opportuniste, si le rang de l'événement d'une ISP entre dans le calcul de la règle d'intégration qui détermine la priorité d'une ISP.

Il n'intervient pour l'instant pas en mode "dirigé par les règles" : avec un tel mode, une tâche parcourt en effet l'ensemble de sa liste d'événements pour y récupérer tous ceux qui satisfont les prémisses de la règle de tâche en cours de test. Le travail des spécialistes désignées en partie "actions" de cette règle s'effectue alors avec, en guise de focus, l'ensemble des événements ainsi constitué. Il n'est pas possible de ne rechercher qu'un événement dans la liste des événements et de faire travailler les spécialistes sur un seul des événements sélectionnés ou encore sur chaque événement à tour de rôle. L'ordre des événements n'est donc, pour l'instant, pas utilisé en mode dirigé par les règles mais on peut imaginer un avenir proche, et souhaitable, où il sera possible d'isoler un événement et de n'en avoir qu'un en tant que focus transmis à une spécialiste. Cet ordre sera alors, là aussi, déterminant dans l'enchaînement des actions des spécialistes.

Nous nous limitons donc, pour l'instant, au mode "dirigé par les événements" ou "opportuniste", dans l'attente de l'évolution du mode "dirigé par les règles". Etant donné l'impact de l'ordre des événements sur le raisonnement, il nous semble primordial de pouvoir rendre la gestion des listes d'événements explicite. Nous envisageons cela sous deux angles : d'une part, il faut donner les moyens à la tâche de pouvoir choisir elle-même l'ordre des événements qui l'intéressent ; d'autre part, elle doit pouvoir intervenir

à tout moment pour réorganiser sa liste d'événements. Ceci est exposé dans ce qui suit.

3.3.2 Le choix de l'ordre des événements

Ce sont actuellement les spécialistes qui décident non seulement de la création d'un événement mais aussi de la position qu'aura cet événement dans la liste des événements des tâches intéressées. Cette dernière fonction leur a initialement été assignée parce qu'on a supposé qu'elles jugeraient en fonction de l'importance qu'elles attribuent à un événement. Or il n'en est rien. Il ne faut en effet pas se leurrer, ce n'est nullement la spécialiste qui décide selon un quelconque critère d'importance mais la tâche qui, au travers du cognicien, fait en sorte que le placement indiqué par la spécialiste coïncide avec un ordre qu'elle a elle-même déterminé. A titre d'illustration de ce phénomène, nous pouvons citer le cas de la tâche *Diagnostic* : l'ordre qui est obtenu dans sa liste d'événements (cf. la figure 3.2.2, partie II) n'est en aucun cas le fruit du hasard ou d'une bonne inspiration commune aux spécialistes d'où proviennent les événements.

Le mécanisme de positionnement des événements par les spécialistes est donc dévié de sa fonction initiale. Plutôt que de continuer à faire comme si les spécialistes prenaient une quelconque décision, il est préférable de rendre tout de suite à la tâche une fonction qu'elle exerce déjà de façon détournée et qui lui revient de droit. Elle est en effet la mieux placée pour savoir dans quel ordre les événements dont elle a besoin doivent lui être présentés puisque c'est elle qui a la connaissance sur la façon d'organiser le travail des spécialistes.

De plus, la position relative fournie par une spécialiste pour un événement est la même pour toutes les tâches susceptibles d'être intéressées par cet événement. Toutes sont alors dans l'obligation de s'en accommoder. Or, bien souvent, une position qui convient à une tâche ne convient pas à une autre. Le mécanisme atteint ici ses limites, justifiant ainsi sa révision.

L'ordre des événements étant déterminant dans le raisonnement d'une tâche, il semble donc logique que la tâche en décide. Il faut ajouter à ses caractéristiques une propriété qui lui permettra de décrire, à la manière de ce qui se fait actuellement dans les spécialistes, l'ordre qu'elle préconise sur les événements. Cette description est faite *a priori*, de façon statique. Elle fournit en effet un critère de tri sur les événements, à appliquer systématiquement à tout événement qui intéresse la tâche. L'événement est alors placé dans la liste d'événements une fois pour toute, sa position ne pouvant alors plus être modifiée.

Cette nouvelle possibilité offerte à la tâche lui permet déjà de gérer sa liste des événements en l'organisant *a priori* comme elle l'entend. Elle n'est cependant pas suffisante, par son côté statique qui suppose de ne pas pouvoir revenir sur l'ordre des événements dans une liste. Ce que nous proposons dans le paragraphe qui suit libère la tâche de cette contrainte et lui permet d'avoir une complète maîtrise de sa liste d'événements.

3.3.3 Une gestion dynamique de la liste des événements

Au cours du développement du système expert ROSY, nous nous sommes plusieurs fois trouvée dans l’embarras du fait de l’impossibilité pour la tâche d’intervenir sur sa liste d’événements.

Un des deux exemples que nous allons citer se situe au niveau de la tâche qui initialise les blackboards décrivant l’état d’une chaussée donnée (tâche *Etat-de-la-rue*). Une de ses spécialistes (*Sp-fusion*) a en charge la fusion des instances de dégradation relevées sur une chaussée. Son action consiste à repérer, parmi toutes les dégradations qui ont été décrites, celles qui correspondent à une même, seule et unique détérioration de façon à les fusionner. Il s’agit maintenant de la traduire en terme de règles de tâche, d’événements, de modes de fonctionnement de la tâche et de la spécialiste.

Toute règle de tâche comporte une partie “prémisse” testant sur la présence d’événements particuliers dans la liste des événements de la tâche. Ces événements sont à l’origine d’un focus transmis à la spécialiste et ce focus peut conditionner le raisonnement de la spécialiste. Modéliser l’action ou le raisonnement d’une spécialiste revient, de ce fait, à trouver un compromis entre le mode de fonctionnement de la tâche, ce qui apparaît en partie prémisse de la règle déclenchant la spécialiste, le contenu de la liste des événements et la façon dont la spécialiste raisonne. Pour *Sp-fusion*, il a été difficile de réaliser un tel compromis. La solution que nous avons retenue n’est pas idéale et ne correspond pas à celle que nous avions rêvée. Elle est issue de deux échecs de modélisation, dus au manque d’expressivité des événements pour le premier, à l’absence d’une gestion explicite de la liste d’événements par la tâche pour le second.

Par exemple, pour la fusion de dégradations appartenant à un même bloc physique réparti sur plusieurs portions de dix mètres (cf. la figure 3.6 de la partie II), l’idéal aurait consisté à :

1. sélectionner, par la prémisse de la règle qui doit déclencher *Sp-fusion*, tous les événements correspondant aux dégradations sur dix mètres dont les nœuds associés sont liés entre eux (par le lien indiquant qu’ils font partie de la même dégradation)⁴,
2. activer ensuite la spécialiste en lui transmettant les nœuds ci-dessus en guise de focus,
3. fusionner ces nœuds en un représentant unique⁵,
4. recommencer le processus avec un autre groupe d’événements (et donc de nœuds).

Or, dans l’état actuel des choses, il n’est pas possible de réaliser l’opération 1. Une prémisse de règle de tâche ne peut en effet tester que les champs constitutifs d’un événement. Il n’est donc pas possible d’exprimer la condition “je recherche les événements dont les nœuds associés vérifient telle et telle conditions”, même si ces conditions

4. Ceci correspond à un mode dirigé par les règles.

5. La spécialiste doit ici travailler sur chacun des nœuds transmis et pas sur l’ensemble de ces nœuds, ce qui n’est pas compatible avec un mode dirigé par les règles.

semblent respecter la philosophie de ATOME (respect du niveau d'abstraction des éléments sur lesquels la tâche juge une situation)⁶.

Le déroulement idéal du processus de fusion n'a donc pu être respecté. Nous avons été conduits à envisager un second processus qui consiste à faire travailler la tâche *Etat-de-la-rue* en mode dirigé par les événements. Cela suppose donc de ne pouvoir tester, en partie prémisses de règle de tâche, qu'un événement à la fois. Le processus devient donc :

1. sélectionner un événement correspondant à une dégradation sur dix mètres ;
2. activer la spécialiste en lui transmettant le nœud associé à l'événement en guise de focus ;
3. mettre beaucoup plus que précédemment la spécialiste à contribution, du fait du focus sur chaque nœud.

Il lui faut tout d'abord voir si le nœud-focus est susceptible de faire partie d'une plus grosse dégradation. Si tel est le cas, elle récupère alors, dans un souci d'efficacité, tous les nœuds auxquels le nœud-focus est lié (il s'agit des autres "bouts" de la grosse dégradation) de façon à effectuer la fusion.

La spécialiste se sert du nœud-focus en tant que témoin de la présence d'un bloc continu de dégradation, puis en tant que point de ralliement des autres morceaux de dégradation. Elle peut ainsi traiter toutes ces portions de dégradation en une seule fois. Son travail terminé, elle rend le contrôle à la tâche ;

4. et recommencer le processus avec l'événement suivant.

Il y a problème dans ces deux dernières parties. La spécialiste a en effet recours à des nœuds autres que le nœud-focus. Ceux-là sont associés à des événements qui figurent toujours dans la liste de la tâche, lorsque celle-ci récupère le contrôle. Avant de recommencer le processus, la tâche devrait donc se débarrasser de ces événements, devenus inutiles du fait du traitement par la spécialiste des nœuds qui leur sont associés.

Cette mise à jour de la liste des événements ne peut être faite car aucune opération de gestion de cette liste n'a été définie. La tâche ne peut donc que subir ses événements, dans un ordre défini *a priori*.

Le même phénomène survient dans la tâche *Diagnostic*. Les événements sont regroupés rue par rue dans la structure de contrôle qui lui est associée (cf. la figure 3.2.2, partie II). Avec un seul de ces événements, il est possible de conclure directement sur l'état d'une chaussée. Il suffit par exemple que *Sp-fond* conclue. La tâche n'utilise alors que le premier des événements concernant la chaussée en cours de traitement (événement "création d'une chaussée"). Les autres (événements "création d'une dégradation") ne servent plus à rien. L'attitude de la tâche peut alors être double :

6. A ce propos, s'il ne nous semble pas correct de tester l'égalité entre la valeur d'un attribut de nœud et une valeur donnée, l'utilisation de conditions telles que celle mentionnée en 1 ou telle que "repérer les événements dont les nœuds associés ont même valeur d'attribut Attr" nous paraît tout à fait du niveau de la tâche. Elles ne nous semblent en effet pas remettre en cause le niveau d'abstraction de cette dernière, bien qu'elles obligent à consulter les blackboards.

- ou bien, comme dans l'exemple précédent, elle choisit de supprimer ces événements qui encombrant maintenant inutilement sa liste d'événements,
- ou bien, la prudence lui recommande de conserver ces événements. Ceux-ci seront alors renvoyés en fin de liste (ou ailleurs, selon ce que décide la tâche) et affectés d'une marque indiquant que la tâche les a déjà considérés.

L'expertise, dans le domaine de la voirie urbaine, est telle qu'il est préférable que la tâche opte pour la seconde solution. Il se peut, en effet, qu'il soit difficile de se décider pour une réfection ou une autre par manque de paramètres. Il serait alors peut-être bon de revenir sur les dégradations non prises en compte pour faire pencher la balance d'un côté ou de l'autre.

Il est donc nécessaire d'introduire des fonctions explicites de gestion des événements. De même que la spécialiste manipule ses connaissances à bon escient, la tâche doit pouvoir agir à sa guise sur ce qui conditionne son raisonnement : les événements. Elle doit pouvoir intervenir à tout moment pour :

- supprimer les événements obsolètes (événements devenus inutiles du fait de la tournure qu'a prise le raisonnement),
- réorganiser la liste d'événements (réordonner les événements).

3.4 Impacts sur les différents acteurs du raisonnement local

3.4.1 Sur les spécialistes...

La réforme que nous envisageons sur les structures d'événement et de liste d'événements (définition de nouveaux types d'événements et de blackboards de contrôle) concerne au plus haut point les spécialistes. Celles-ci vont en effet pouvoir mieux exprimer à la fois ce qu'elles ont fait et ce dont elles ont besoin (par exemple, une information complémentaire). Les événements ne sont plus seulement là pour qu'elles fassent un compte rendu de leur travail, celui-ci étant par ailleurs plus explicite, mais aussi pour qu'elles puissent faire état de la façon dont ce travail s'est déroulé. Elles peuvent en effet faire part d'une difficulté qu'elles rencontrent dans le déroulement de leur raisonnement et ainsi exprimer le fait qu'elles ont les moyens de faire mieux que ce qu'elles ont fait mais pas pour l'instant.

Dans le même ordre d'idée, elles peuvent dire qu'elles sont parvenues à la conclusion définie comme étant leur but ou que, au contraire, elles n'ont pu qu'apporter quelques éléments nouveaux. C'est par exemple le cas de *Sp-fond* qui peut ou bien conclure définitivement et sûrement sur l'état de la fondation d'une chaussée, ou bien n'en fournir qu'une première appréciation. Elles acquièrent donc une véritable capacité à apprécier leur travail et à le qualifier.

Le jugement que les spécialistes portent sur leur travail, notamment au travers de

messages tels que "but atteint" ou "il me manque telle information (sous-entendu, pour pouvoir faire mieux)", nous permet d'envisager deux améliorations dans la manière dont leur raisonnement va se dérouler. Elles vont de pair avec les messages cités : la première consiste à associer une condition d'arrêt à une spécialiste, la seconde vise à pouvoir stopper le raisonnement de la source de connaissances en cas de manque d'information. Elles sont présentées dans ce qui suit.

a - Associer une condition d'arrêt à une spécialiste

Nous envisageons d'associer une condition d'arrêt à une spécialiste. Cette condition permettrait d'explicitier le but de la spécialiste, ce qui n'est actuellement fait nulle part. Seule la tâche a connaissance des buts des diverses spécialistes qu'elle contrôle mais de façon implicite.

Le but dont nous parlons ici est un but idéal : il s'agit de la conclusion que l'on peut espérer obtenir, dans le meilleur des cas. Le véritable travail de la spécialiste est en fait "d'essayer d'atteindre ce but". En cas de réussite, but et travail se confondent alors. Ainsi, nous dirons que le but de la spécialiste *Sp-fond* est de "conclure sur l'état de la fondation d'une chaussée, avec un coefficient de vraisemblance supérieur à 80", son travail étant d'essayer de conclure dans de telles conditions.

Nous voyons deux intérêts à l'explicitation du but d'une spécialiste. Le premier, qui est à l'origine de l'idée d'associer une condition d'arrêt à une SC, consiste à pouvoir stopper le raisonnement de la SC, une fois le but atteint. Le second est envisageable à plus longue échéance et suppose d'exploiter une hiérarchie de buts. Nous les présentons dans ce qui suit.

Arrêt du raisonnement en cours

Le premier intérêt est que la spécialiste puisse stopper son raisonnement lorsque ce but est atteint, avant qu'elle n'ait envisagé l'ensemble de ses connaissances. Reprenons l'exemple de la spécialiste *Sp-fond*, dont le travail consiste à essayer de conclure "d'un premier coup d'œil" sur l'état de la fondation d'une chaussée. Lorsqu'elle ne conclut pas immédiatement (parce qu'elle connaît la composition de la fondation ou parce que les profils sont particulièrement déformés), il lui reste encore les moyens de le faire. Il lui faut alors analyser un certain nombre de paramètres qui peuvent renforcer ou diminuer la confiance qui est accordée à l'état de la fondation. A partir d'une certaine valeur du coefficient de vraisemblance associé à cet état (en l'occurrence 80), le but est jugé atteint.

Lorsque l'expert exécute cette tâche, il peut disposer de nombreux paramètres lui permettant d'apprécier, sans examen approfondi, cet état. Si une partie seulement de ces paramètres lui suffit à porter un jugement à coup sûr, il devient alors inutile de poursuivre le raisonnement sous prétexte que d'autres paramètres n'ont pas été pris en compte. L'expert ne se préoccupe pas des paramètres restants⁷. La spécialiste devrait

7. Notons que cette attitude est commune à tout être humain qui a une décision à prendre ou un jugement à porter.

agir de la même façon. Elle devrait mettre fin à son raisonnement lorsqu'elle a considéré suffisamment de règles pour parvenir à la conclusion attendue, ce qu'elle ne fait pas. De façon disciplinée, elle envisage l'ensemble de ses connaissances et ne s'arrête que lorsque celles-ci arrivent à épuisement. Elle se comporte exactement comme si elle ne savait pas elle-même où elle veut en venir. Une partie de son raisonnement est inutile et dénuée de sens aux yeux de l'expert, puisqu'elle continue à travailler pour un résultat déjà acquis.

En fait, elle continue son raisonnement car elle n'a aucun moyen de savoir si le but qu'elle poursuit a été atteint ou pas. En effet, celui-ci est le résultat de la combinaison de la valeur de l'attribut qu'elle modifie avec la valeur qu'elle fournit (combinaison de coefficients de vraisemblance) et non pas la modification en elle-même. De ce fait, elle n'a pas non plus les moyens de prévenir la tâche de son succès par un événement traditionnel (événement qui existe à l'heure actuelle). Un tel événement ne rapporte en effet que l'action entreprise par une spécialiste et pas le résultat de cette action.

Une façon de faire peu élégante, mais systématique, consisterait à créer une règle testant si le but a été atteint ou pas. Cette règle serait alors déclenchée après chaque activation des autres règles de la spécialiste et permettrait ainsi de stopper le raisonnement en cours. Cette solution ne résout pas pour autant le problème de l'avertissement de la tâche. Aussi vaut-il mieux transformer cette règle parasite en un but espéré. Une fois ce but atteint, il est alors possible d'envisager un envoi automatique du message "but atteint" à la tâche. La spécialiste n'a ainsi pas à se charger de ce type de message sauf si, bien entendu, elle tient, pour une raison ou une autre, à le faire.

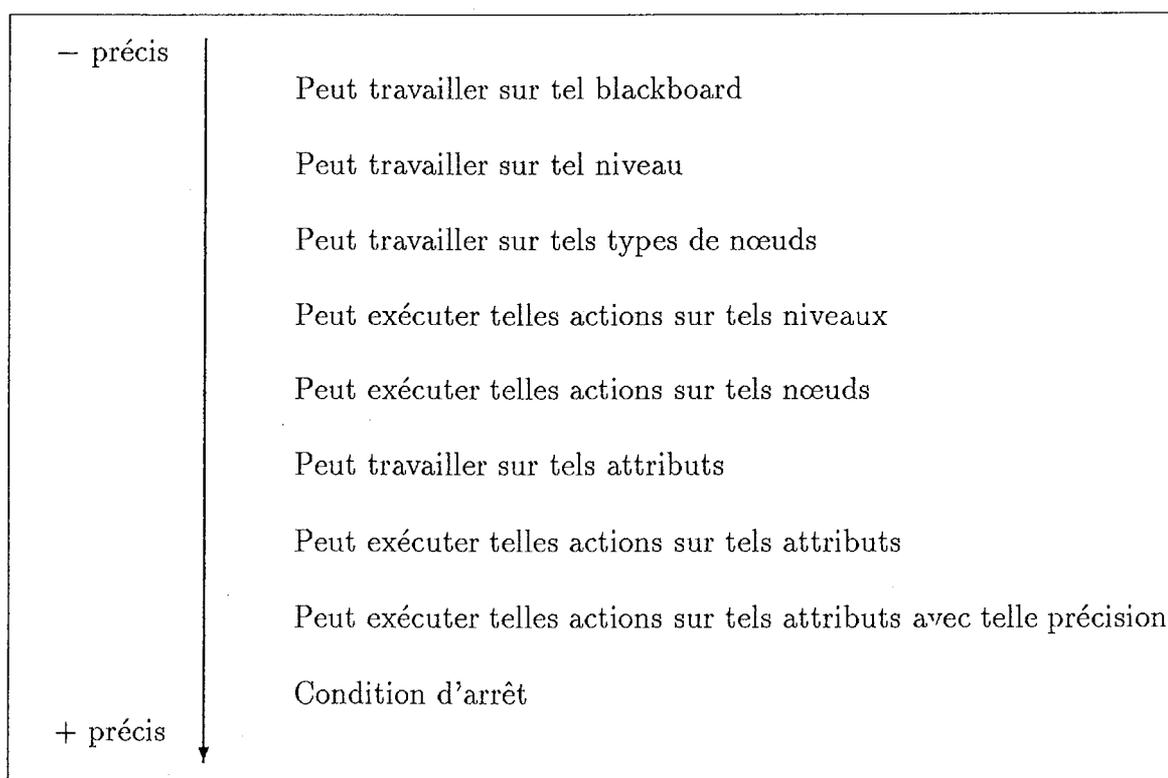
Notion de but hiérarchique

Le second des deux intérêts réside dans la façon de décrire et représenter le but. Il peut ne s'agir que de la seule condition d'arrêt de la spécialiste mais on peut également envisager d'y mettre :

- la liste des attributs susceptibles d'être mis à jour,
- la liste des nœuds que la spécialiste est susceptible de traiter,
- etc,

en bref, l'ensemble des buts (ou travaux potentiels) de la source de connaissances.

L'idée est ici d'avoir une représentation plus complète que la seule condition d'arrêt qui, elle, fait office de travail potentiel le plus souhaité, le plus précis et de raison d'être de la spécialiste (c'est "le travail potentiel par excellence"). Il s'agit d'une description très large de tout ce qu'une spécialiste peut faire, y compris son but premier (i.e. la condition d'arrêt). De la même façon que nous pensons à des représentations différentes d'un même concept (représentations à profondeur variable) avec des liens entre elles et la notion de hiérarchie (cf. la partie IV), il est possible d'envisager une représentation similaire des travaux potentiels, des moins précis aux plus précis. Les buts d'une spécialiste sont alors hiérarchisés, la précision servant de critère de classement dans la hiérarchie. Nous montrons ci-dessous un exemple d'une telle représentation :



La tâche peut alors consulter cette liste de buts et s'en servir :

- pour mener un raisonnement "à profondeur variable" (cf. la partie IV). La liste vient alors compléter les représentations à différents niveaux que nous avons envisagées dans la partie IV. Elle fournit à la tâche le moyen d'identifier les divers niveaux d'abstraction auxquels une spécialiste est capable de raisonner. Elle lui permet ainsi de choisir celle qu'elle activera en fonction du degré de précision qui lui est demandé par la stratégie ;
- pour répondre de façon dynamique aux demandes d'information qui lui ont été adressées. Il lui suffit de repérer les spécialistes capables de conclure sur ce qui fait l'objet de la demande. Cela présente l'avantage de pouvoir traiter en une seule règle de tâche toutes les demandes d'information. Ainsi, la règle :

Si une demande d'information est formulée alors activer la spécialiste dont le but est de fournir l'information qui fait l'objet de la demande.

va remplacer toutes les règles de type :

Si l'information I est demandée alors activer la spécialiste Sp.

La tâche n'a donc pas à se préoccuper *a priori* de toutes les informations qui sont susceptibles d'être demandées. En fait, le problème de la prévision de ces informations n'est que déplacé vers la construction des listes de buts des spécialistes. Il serait alors commode que ces listes puissent être créées de façon automatique, grâce à une analyse syntaxique préalable des règles, quitte à ce que le cognicien les revoie selon la nécessité.

b - Arrêt du raisonnement en cas de manque d'informations

Une spécialiste, lors de son raisonnement, peut en arriver à ce qu'une information lui manque. Si elle estime que cette information est importante, il serait alors préférable qu'elle puisse interrompre momentanément son travail, le temps que la tâche lui fournisse cette information, plutôt que d'essayer de continuer à résoudre le problème qui lui est posé. Nous avons déjà cité, à titre d'exemple, le cas de la spécialiste *Sp-recherche-causcs* qui peut avoir besoin de renseignements sur l'état des réseaux. De tels renseignements sont susceptibles de l'amener à conclure. La spécialiste a donc tout intérêt à arrêter son raisonnement et à faire une demande d'information.

Ne pas opter pour une suspension provisoire d'un tel raisonnement peut avoir des conséquences fâcheuses. La spécialiste mène en effet une première fois son raisonnement au bout, une information lui manquant. Puis elle va être conduite à raisonner une seconde fois sur les mêmes données, en disposant cette fois-ci de l'information initialement manquante. Il va y avoir déclenchement, dans le même contexte, de règles qui ont déjà été déclenchées la première fois. Une partie du raisonnement est donc tenue "en double", ce qui peut engendrer des erreurs dues à des mises à jour abusives de valeurs d'attributs. A défaut de pouvoir disposer de mécanismes de contextes qui ne sont plus seulement locaux à une spécialiste (cf. § 2.4.4, 2.4.2) mais propre à une tâche (on garde la mémoire des activations de spécialistes avec leur contexte de travail et, pour chacune, des règles qui ont été déclenchées), il vaut mieux éviter de se trouver dans une telle situation. Il est alors fortement conseillé ou bien de découper la spécialiste en deux lorsque cela est possible (ce qui n'est pas notre propos ici), ou bien de suspendre le raisonnement en cours.

D'un point de vue pratique, nous envisageons cet arrêt en trois étapes :

- dans un premier temps, il doit y avoir sauvegarde du contexte de travail de la spécialiste, avec notamment positionnement d'une marque qui indique où le raisonnement s'est arrêté;
- ensuite, il y a retour à la tâche qui active la spécialiste propre à fournir l'information manquante;
- enfin, la spécialiste qui a demandé l'information reprend la main : le raisonnement reprend là où il s'était arrêté.

Cette succession d'étapes pose le problème de la reprise du raisonnement. Entre le moment où une spécialiste dépose une demande d'information auprès de la tâche et le moment où l'information lui est transmise pour qu'elle poursuive son travail, la tâche peut en effet prendre en compte d'autres événements que la seule demande d'information dans sa liste des événements. D'autres spécialistes vont ainsi travailler pendant ce laps de temps, alors que la première est toujours en attente. Elle-même peut être sollicitée pour un autre travail. Le résultat de ces travaux risque alors de modifier le contexte dans lequel la spécialiste a débuté son raisonnement, compromettant ainsi la cohérence entre les diverses déductions qui peuvent être faites.

Nous préconisons donc un "arrêt-reprise" immédiat, sans que des travaux de spécialistes autres que ceux destinés à fournir l'information demandée puissent être in-

tercalés entre la demande et la réponse. Il faut donc que les événements de type "il me manque telle information" aient une priorité supérieure à celle des autres événements. Cela devrait réduire les risques de modification du contexte de travail de la spécialiste demandeuse d'information. Ces risques ne sont toutefois qu'amoindris et pas annihilés. Le problème du maintien de la cohérence restant ouvert, le cognicien devra cependant toujours y prendre garde, en veillant à ce que les spécialistes qui seraient sollicitées pour travailler à fournir l'information demandée n'agissent pas sur le contexte sauvegardé.

Cette solution correspond donc à une interruption momentanée du travail de la spécialiste, juste le temps nécessaire à l'obtention de l'information dont elle a besoin. Elle concorde de plus avec le fait que la tâche ait jugé opportun de faire travailler la spécialiste à ce moment-là, et non pas en partie maintenant, en partie plus tard.

3.4.2 Sur les tâches...

La tâche est la première concernée par les modifications que nous avons présentées auparavant. Il y a tout d'abord celles qui lui sont directement adressées, à savoir la possibilité de définir ses propres événements et d'agir comme bon lui semble sur sa structure de contrôle. En modifiant explicitement l'ordre des événements dans sa structure de contrôle, elle agit sur le déclenchement de ses propres règles. Ces nouvelles potentialités correspondent donc à l'introduction d'un niveau "méta" au sein d'une tâche, tout comme nous l'avons fait pour les spécialistes mais avec des moyens différents. La tâche dirige son raisonnement en agissant sur les éléments qui lui permettent de juger une situation.

Il y a ensuite les modifications concernant la définition de nouvelles structures : événements-messages et blackboard de contrôle. Les événements-messages lui permettent en effet de diversifier ses règles. Il est maintenant possible d'écrire :

Si telle spécialiste a travaillé alors activer telle autre.

ou encore :

Si une information a été fournie alors redonner la main à la spécialiste qui en a fait la demande.

L'augmentation du pouvoir expressif des événements est répercutée sur les règles de tâches qui deviennent, à leur tour, plus expressives.

Enfin, le fait de disposer d'un blackboard en tant que structure de contrôle nous laisse penser que la tâche pourra avoir une vue d'ensemble sur les événements quel que soit le mode de fonctionnement utilisé.

Seul le mode dirigé par les événements offre actuellement une telle fonctionnalité. En effet, l'ensemble de la liste des événements est parcouru pour trouver les événements qui satisfont les conditions d'une règle de tâche. En contrepartie, ce mode oblige chaque spécialiste à travailler sur l'ensemble des événements ainsi repérés : il n'y a pas moyen de travailler sur chacun d'entre eux. Les autres modes ne prennent en compte

qu'un événement à la fois. Il n'est alors pas possible d'écrire des règles de tâche telles que :

Si l'événement courant est de type T et s'il s'agit du dernier événement de ce type-là (il n'y en a pas d'autres après lui dans la liste des événements) alors ...

ou encore

Si l'événement courant est de type T et si on n'a pas conclu sur la rue en question (il n'y a pas d'événement de type "but atteint" émanant de telle ou telle spécialiste) alors ...

La structure de blackboard facilite une consultation plus large des événements qu'elle contient, permettant d'obtenir une telle vue d'ensemble. Là encore, cela permettra d'augmenter la mainmise de la tâche sur sa structure de contrôle, enrichissant ainsi le langage dont elle dispose pour exprimer ses règles.

Ces modifications ont été envisagées dans le but de permettre à la tâche d'avoir une meilleure maîtrise de son raisonnement et de pouvoir mieux l'orienter. Il en découle une reproduction plus fidèle de la démarche experte.

3.5 Conclusion

Nous avons présenté, au cours de ce chapitre, les modifications que nous envisageons d'apporter au niveau des tâches. Il est ainsi question de développer le pouvoir expressif des événements, de donner à la liste d'événements une structure lui permettant d'accueillir divers types d'événements et de fournir des outils à la tâche pour qu'elle puisse gérer cette liste selon les résultats du raisonnement.

Il nous semble que ces modifications ne doivent pas être l'exclusivité des tâches. En effet, un parallèle peut être fait entre les associations "tâche - spécialistes" et "stratégie - tâches". Toutes deux sont composées d'entités qui ont les mêmes fonctions, chacune dans son contexte, et qui peuvent, de ce fait, être mises en correspondance :

<i>SC de contrôle</i>	Tâche	←→	Stratégie
<i>SC contrôlées</i>	Spécialistes	←→	Tâches
<i>Structure de contrôle</i>	Liste d'événements	←→	Résumés des blackboards
<i>Entité de contrôle</i>	Evénement	←→	Nœud important

Il nous semble donc possible, voire souhaitable, d'appliquer à la stratégie et aux tâches les mêmes modifications que celles que nous avons envisagées sur un groupe de compétence "tâche - spécialistes".

Le but visé est le même que pour une tâche et ses spécialistes : obtenir une communication entre source de connaissances de contrôle et sources de connaissances contrô-

lées plus explicite, plus souple et plus efficace car plus expressive. Les stratégies et les tactiques expertes seront ainsi plus facilement modélisables et de façon plus fidèle.

Les propositions que nous avons émises dans ce chapitre respectent la philosophie sous-jacente à l'architecture hiérarchique de ATOME. Dans un tel cadre, les sources de connaissances d'un même niveau d'abstraction n'ont pas connaissance les unes des autres. Elles ne peuvent ainsi pas faire appel les unes aux autres. Cela sous-entend donc que toute communication est centralisée à un niveau d'abstraction supérieur et passe obligatoirement par ce niveau. Pour mieux reproduire le modèle que le cogniticien se fait du raisonnement expert, l'idéal consisterait à sortir de ce cadre en violant cette philosophie et en autorisant alors les communications au sein d'un même niveau d'abstraction. Si nous en revenons à la comparaison avec une usine, les opérateurs ont connaissance du travail qu'ils effectuent les uns les autres. Lorsque l'un d'entre eux a besoin du travail d'un autre et selon le type de travail requis, il s'adressera directement à celui-ci, sans passer par la voie hiérarchique. De même, les sources de connaissances d'un même niveau d'abstraction doivent pouvoir communiquer, mais dans des cas restreints. Nous pensons en effet que ces communications doivent être limitées à des cas où les échanges d'informations ne viennent pas changer le cours de la résolution globale du processus, c'est-à-dire n'altèrent pas le contrôle provenant du niveau supérieur. C'est notamment le cas, dans l'exemple que nous avons présenté auparavant, pour les spécialistes *Sp-réseau* et *Sp-recherche-causes*. La tâche *Diagnostic* n'a ici pas besoin de superviser l'interaction entre les deux spécialistes puisque celle-ci ne modifie pas le processus de résolution qu'elle peut établir. Il est même possible de considérer que cela facilite son travail, ne l'obligeant pas ainsi à s'occuper de raisonnements qui ne la concernent pas directement.

Nous aurions ainsi une architecture dans laquelle il y aurait à la fois des communications inter-niveaux et intra-niveaux, cette dernière étant limitée à ce qui ne relève pas du contrôle de la tâche. Cela permettrait de modéliser les relations intra-niveaux du modèle de l'expertise (cf. la partie III, paragraphe 3.3.1). Nous tenons cependant à émettre des réserves quant à l'introduction de telles relations dans ATOME. En effet, le problème pour le cogniticien est alors d'être capable de distinguer entre les deux types de relations. A défaut de pouvoir le faire, une dégénérescence complète du modèle sous-jacent à l'architecture de ATOME est à craindre⁸. Aussi nous semble-t-il indispensable d'établir des critères de distinction. Tant que le cogniticien ne dispose pas de tels critères, il nous semble dangereux de faire évoluer le modèle du blackboard de ATOME dans cette direction. De nouvelles recherches doivent donc être entreprises pour la définition de ces critères. Elles entrent dans la cadre de celles qui sont à mener sur l'intégration du modèle de l'expertise à la méthode de développement de systèmes multi-experts que nous avons proposée dans la partie III.

8. Cela nous semble d'autant plus risqué que l'utilisateur de ATOME est un novice. Il n'est en effet pas toujours aisé de distinguer entre les divers niveaux d'abstraction. Le cogniticien parvient cependant à "sentir" les différences après une certaine expérience de l'utilisation de l'outil, expérience que le novice n'a pas.

4

Conclusion

Cette partie a été consacrée au générateur de systèmes multi-agents ATOME. En développant le système ROSY, nous avons mis à jour des insuffisances dans la conception du générateur et dans les possibilités offertes à l'utilisateur. Nous avons cherché à les combler en orientant notre travail vers :

- le développement des capacités de raisonnement des spécialistes. Cela a abouti à la réalisation d'un nouveau moteur d'inférence, dans lequel des outils de structuration statique ou dynamique de la connaissance sont définis ;
- la structure de contrôle associée à une tâche et son impact sur le raisonnement, donc le contrôle, de la tâche. Les propositions qui ont été émises à ce propos doivent conduire à une implantation future.

Les modifications réalisées ou envisagées vont dans le sens des points positifs du générateur, tout en palliant ses points négatifs. Ses principaux avantages sont résumés dans [Haton 89]. ATOME y est décrit comme "offrant un contrôle *hybride*, à la fois global et *local*, variable selon les phases de résolution de problème, qui a été implanté de façon à fournir au concepteur d'un système particulier *une grande souplesse* dans le choix de la solution *adaptée* à son problème".

Le contrôle local auquel il est ici fait allusion est celui de la tâche. En développant le nouveau moteur, nous avons ajouté un autre type de contrôle local, non plus au niveau de la tâche mais au niveau de la spécialiste. Alors que la spécialiste, ne disposant pas d'un tel contrôle, se contentait de passer en revue ses connaissances et de les appliquer uniformément à tout cas qui se présentait, elle peut maintenant *penser* son raisonnement en fonction du cas à traiter et le *maîtriser* totalement. Ce que nous proposons pour la tâche va dans le même sens.

Les deux types de sources de connaissances ont maintenant à leur disposition des fonctionnalités nouvelles pour manipuler leurs connaissances lors du raisonnement, ce qui n'était pas possible avant. Le cogniticien avait certes le choix, lors de la définition d'une source de connaissances, entre divers modes de fonctionnement prédéfinis. Mais une fois l'un d'entre eux choisi, il n'y avait plus moyen d'intervenir sur ce mode. Le raisonnement de la source de connaissances se déroulait donc conformément au mode de fonctionnement associé, sans qu'il fût possible de l'adapter au cas particulier à traiter.

En définissant de telles fonctionnalités, nous avons enrichi et diversifié les modes de fonctionnement, cela de façon *dynamique* et non statique : il n'y a pas davantage de modes de fonctionnement prédéfinis mais des modes dont le comportement peut varier lors de la résolution d'un problème particulier. Le processus de résolution est donc plus riche, plus élaboré et beaucoup plus opportuniste que ce qu'il était, du fait de cette diversification : l'opportunisme qui existait au niveau des sources de connaissances de contrôle a pris de l'ampleur ; il a été installé au sein des spécialistes et fait maintenant partie intégrante de leur raisonnement.

Il s'ensuit une augmentation de ce qui fait qu'ATOME est apprécié : la souplesse [Chatain et Dury 91]. La tâche de modélisation du cogniticien est ainsi facilitée. Celui-ci peut en effet représenter le raisonnement expert beaucoup plus précisément et de façon plus fidèle.

L'image que nous pouvons donner des changements que nous avons développés ou envisagés est celle d'un joueur de cartes dans le jeu tout simple de la bataille. L'expert a, dans les mains, son jeu de connaissances qu'il range *a priori* comme il l'entend. A tout moment et en fonction de ce qui se passe sur le tapis de jeu, il choisit la bonne carte à appliquer au cas à traiter. Les sources de connaissances, sans les propositions que nous avons faites, tentent de reproduire le déroulement du jeu (c'est-à-dire le processus de résolution) mais en jouant, à une différence près, à la bataille *fermée*. Elles ne voient pas leurs cartes-connaissances et se contentent de les tirer dans l'ordre où elles les ont *a priori* rangées. C'est en cela que le comportement des sources de connaissances diffère du jeu de la bataille fermée où il n'est pas permis d'agir *a priori* sur l'ordre des cartes. Toute spécialiste a en effet la possibilité de trier ses connaissances avant une utilisation séquentielle. Nos propositions leur permettent maintenant de jouer cartes en mains, tout comme l'expert le fait.

Enfin, nous tenons à souligner le caractère original de la démarche qui a été suivie pour concevoir l'outil ATOME. La première réalisation est issue des travaux de H. Lâasri et B. Maître, qui a principalement porté sur le contrôle. Notre travail vient compléter le leur en fournissant une autre vision de l'outil, grâce à une application. ATOME a ainsi été conçu en deux phases (cf. la figure 4.1), l'une consistant à partir d'une étude bibliographique et à mettre au point un premier outil, l'autre consistant à utiliser cet outil dans le cadre d'applications et de développements particuliers et à en revoir certaines parties.

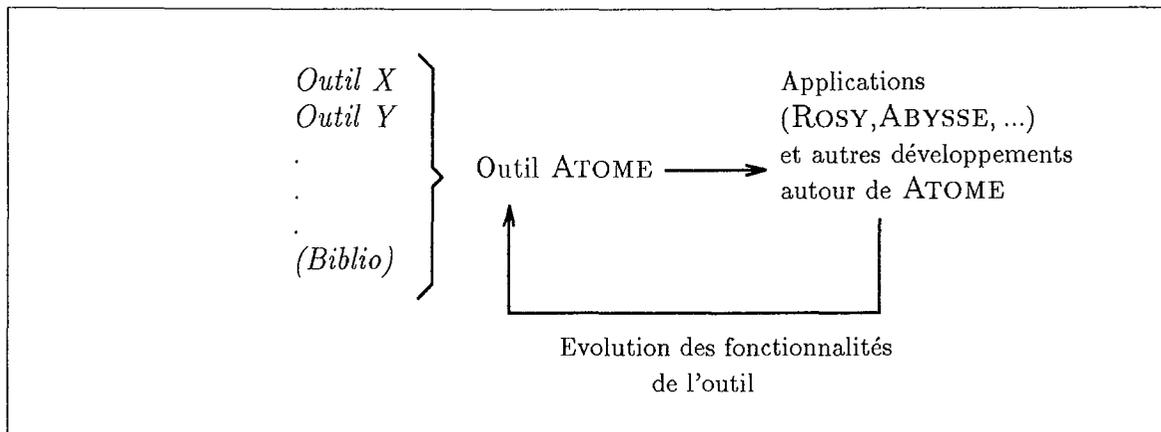


Figure 4.1. La démarche suivie pour la conception et la mise au point de ATOME.

Le résultat de cette démarche est un enrichissement permanent de l'outil, au fur et à mesure de l'avancement des développements d'applications et d'autres travaux qui se font autour du générateur (notamment, la prise en compte de différents modes de raisonnement).

Conclusion générale

Le travail que nous avons entrepris dans cette thèse s'oriente vers plusieurs axes du développement de systèmes à base de connaissances. Nous nous sommes ainsi intéressée aux aspects acquisition des connaissances, représentation des connaissances et modélisation des raisonnements dans les systèmes multi-agents, plus particulièrement dans le cadre du modèle du blackboard. En parallèle à ces travaux, le développement d'une application en génie civil urbain (le système multi-experts ROSY) nous a permis de valider certaines des idées qui ont été présentées. Cette application a été réalisée avec le générateur de système multi-agents ATOME fondé sur le modèle du blackboard.

Nous résumons ici les principales idées et réalisations que nous avons présentées dans cette thèse, en les regroupant autour des trois pôles auxquels nous nous sommes intéressée. Pour chacun, nous envisageons une poursuite des travaux entrepris.

Acquisition des connaissances

Les travaux en acquisition des connaissances ont eu comme objectif de fournir à tout cognicien intervenant dans la construction d'un système expert des guides et des outils pour lui faciliter la tâche. Nous avons ainsi dégagé des lignes de conduite de notre propre expérience (qui comportent notamment un processus de validation de la connaissance en deux étapes). Les suivre rend aisées la communication avec l'expert et la consolidation d'une équipe de travail, notion fondamentale sur laquelle tout processus d'acquisition des connaissances semble être fondée.

Nous avons également analysé un certain nombre de techniques adaptées à une expertise à forte composante visuelle. Nous en avons déduit la nature des connaissances auxquelles elles permettent d'accéder, leurs conditions d'utilisation qui situent dans le temps le moment où la technique peut être employée ainsi que les avantages et inconvénients de chacune. Ces informations fournissent un premier guide au cognicien quant au choix d'une technique adaptée pour acquérir un type de connaissances particulier à un moment donné.

En complément à ce premier guide, nous avons défini une méthode de développement de systèmes multi-agents multi-niveaux et d'acquisition des connaissances. Elle trouve son origine dans l'interaction que nous avons mise en évidence entre acquisition et construction et affinement de l'architecture logicielle de tels systèmes. Elle consiste en une succession d'applications, dans un ordre déterminé, de constructeurs descendants et ascendants, chacun se focalisant sur un ensemble de connaissances délimité.

Les premières de ces applications correspondent à la caractérisation du domaine de l'expertise, phase primordiale et antérieure à tout processus effectif d'acquisition. La méthode fournit ainsi un second guide pour la construction d'un système multi-agents, de même qu'elle facilite le choix d'une technique d'acquisition, de par les délimitations sur les connaissances qu'elle impose.

Cette méthode est le cadre principal dans lequel nos travaux en acquisition des connaissances peuvent être poursuivis. Il s'agirait alors de l'enrichir en élargissant les fonctions des constructeurs dans le domaine de la formalisation des connaissances et du raisonnement, en les dotant par exemple d'outils et de modèles tels que ceux des méthodes KADS ou KOD. Le cognicien serait alors encore plus guidé dans l'élaboration d'un système expert.

Représentation des connaissances

La démarche que nous avons suivie dans ce domaine a été de partir des problèmes que nous avons rencontrés pour modéliser les connaissances intervenant dans l'application ROSY et d'envisager leur résolution de manière générale. Nous avons donc été conduite à proposer la remise en cause ou l'enrichissement des formalismes de représentation de la connaissance proposés dans ATOME : structure des blackboards et règles de production.

Le premier problème a été celui de la modélisation des données visuelles et des divers points de vue sous lesquels elles sont utilisées dans le raisonnement expert. Nous avons montré que la mise en forme de ces connaissances à divers niveaux d'abstraction nécessite de pouvoir manipuler des hiérarchies de nœuds dans les blackboards, la notion d'héritage et celle de démon favorisant l'instanciation automatique de nœuds d'un niveau donné à partir des nœuds d'autres niveaux (essentiellement les éléments de base qui sont fournis au système lors de son initialisation). Ces notions étant inexistantes dans les blackboards, nous proposons de les introduire en faisant évoluer la représentation des nœuds dans les blackboards vers une structure d'objet.

Les connaissances graduelles constituent la seconde difficulté. Nous avons montré comment nous avons modélisé certaines de ces connaissances à l'aide de règles de production. Ce formalisme se révèle cependant insuffisant et inefficace à prendre en compte toutes les formes de ces règles. Aussi avons-nous envisagé une façon de les intégrer dans ATOME.

Les travaux dans ce domaine sont sous la forme d'idées. Leur poursuite découle donc tout naturellement. Il s'agit d'approfondir les réflexions que nous avons menées et de passer ensuite à la réalisation pour les intégrer au générateur ATOME. Notamment, le problème de la transformation de données symboliques en données numériques et *vice versa* doit être abordé pour qu'il soit possible d'utiliser les règles d'inférence graduelles. De même, une nouvelle structure pour les blackboards doit être envisagée. Il semble que l'évolution vers une représentation à objets des nœuds des blackboards s'impose, ce qui a également été constaté dans les travaux entrepris autour de la modélisation

des raisonnements. Les diverses notions évoquées ci-dessus seraient alors incluses dans ATOME. D'autres voies de recherche, fort prometteuses, s'ouvrent alors : celle du raisonnement à profondeur variable et celle du raisonnement adaptatif, étroitement lié au premier.

Modélisation des raisonnements

Nous avons, dans ce domaine, entrepris la même démarche que précédemment, à partir des difficultés rencontrées dans la modélisation du raisonnement de l'expert en génie civil urbain. Le raisonnement au sein des spécialistes, sources de connaissance du domaine dans ATOME, a fait l'objet de la première étude sur ce sujet consignée dans cette thèse. Nous avons tout d'abord mis en évidence les différences entre le raisonnement de l'expert et celui que le formalisme de ATOME nous permettait de représenter. Nous avons alors décrit les fonctionnalités qui annuleraient ces différences, puis la façon dont nous les avons intégrées à ATOME en développant un nouveau moteur pour les spécialistes. Celui-ci comporte notamment la notion de gestion explicite et dynamique des connaissances de même qu'un mode de raisonnement variable en fonction du focus courant (donnée qui fournit l'orientation courante du raisonnement). Il autorise ainsi une représentation fidèle du raisonnement de l'expert.

Dans le même but, nous avons envisagé d'améliorer la communication entre les spécialistes et les sources de connaissance qui les contrôlent : les tâches. Il s'agirait alors d'intervenir sur les structures de contrôle associées à ces tâches, c'est-à-dire les listes d'événements et les événements composant ces dernières. Nous avons montré comment il faudrait les faire évoluer de façon que les événements soient plus expressifs et que la tâche puisse gérer explicitement sa liste d'événements, décidant ainsi de son propre raisonnement. La dernière évolution envisagée consiste à créer des blackboards de contrôle (au lieu de listes) composés d'objets. Tâches et spécialistes pourraient alors bénéficier de fonctionnalités nouvelles, enrichissant le potentiel de raisonnement au sein de chaque tâche.

La réalisation pratique des idées émises sur l'évolution du raisonnement des tâches et leur éventuelle extension à celui de la stratégie constituent une excellente poursuite de ce travail. Il serait également intéressant d'adapter les modifications introduites dans les spécialistes de manière à en faire profiter les autres sources de connaissance. Enfin, la dernière perspective que nous avons envisagée est l'introduction dans les spécialistes de contextes de déclenchement associés aux règles, nécessitant de revenir sur certains des choix effectués pour le nouveau moteur.

Les travaux que nous avons présentés se situent à plusieurs niveaux, allant de la réalisation complète à la proposition de solutions. De plus, certaines des idées qui ont été évoquées ne se limitent pas au modèle du blackboard ; c'est par exemple le cas des développements qui ont été réalisés sur les agents spécialistes de ATOME, qui

sont valables pour tout agent ou tout système expert. Elles doivent donc pouvoir être utilisées dans tout système multi-agents, voire dans tout système expert, d'aide à la décision .

Bibliographie

- [AFIA 91] Bulletin de l'AFIA.
Association Française pour l'Intelligence Artificielle, n° 6, juillet 1991.
- [d'Agapeyeff 88] A. d'Agapeyeff.
Practical elicitation for business applications.
Actes des 8^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, volume 1, p. 625, Avignon, 1988.
Exposé d'introduction à la table ronde "L'extraction de l'expertise et du savoir-faire".
- [Alengry 88] P. Alengry.
Connaissances profondes et connaissances de surface pour la modélisation du raisonnement.
Psychologie française, n° 33-3, J.P. Caverni éditeur, novembre 1988, p. 171-176.
- [Alexander et al. 87] J.H. Alexander, M.J. Freiling, S.J. Shulman, S. Rehfus et S.L. Messick.
Ontological Analysis : an on Going Experiment.
International Journal of Man-Machine Studies, 1987, n° 26, p. 473-485.
- [Anscombre et Ducrot 83] J.C. Anscombre et O. Ducrot.
L'argumentation dans la langue.
Bruxelles, Mardaga.
- [Aussenac 89] N. Aussenac.
Conception d'une méthodologie et d'un outil d'acquisition de connaissances expertes.
Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, octobre 1989.
- [Aussenac et Soubié 89] N. Aussenac et J.L. Soubié.
Apport d'une méthode associée à un outil d'aide à l'acquisition de connaissances.
Actes des journées du pôle 4 du PRC Intelligence Artificielle : " L'acquisition des connaissances. Méthodes et outils", Pont-à-Mousson, 24 et 25 janvier 1989.
- [Ayel et Laurent 91] J. Ayel et J.P. Laurent.
Système multi-agents pour coordonner les activités de gestion de production.
Actes du 8^{ème} congrès Afcet-RFIA, volume 1, p. 371-379, Lyon-Villeurbanne, 25-29 novembre 1991.

- [Bachimont 90] B. Bachimont.
Représenter des connaissances de contrôle dans un tableau noir : l'architecture ABACAB.
Actes des 10^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, conférence "systèmes experts de seconde génération", p. 253-267, Avignon, 1990.
- [Bennett 85] J.S. Bennett.
A knowledge-based reasoning system for acquiring the conceptual structure of a diagnostic expert system.
Journal of Automated reasoning, volume 1, p. 49-74.
- [Berry 87] D. C. Berry.
The problem of implicit knowledge.
Expert Systems, August 1987, volume 4, n° 3.
- [Bisseret 86] A. Bisseret. *Psychologie pour la conception ergonomique de l'assistance informatique.* Fascicule "Cours et séminaires", "Les nouveaux outils du spécialiste de l'information", INRIA Rocquencourt, 1986.
- [Bisseret 88] A. Bisseret, C. Figeac-Létang et P. Falzon. *Modélisation de raisonnements opportunistes : l'activité des spécialistes de régulation des carrefours à feux.* Psychologie française, n° 33-3, novembre 1988.
- [Boose 84] J.H. Boose .
Personal Construct Theory and the Transfer of Human Expertise.
ECAI 84, "Advances in Artificial Intelligence", T. O'Shear editor, 1984, p. 51-60.
- [Boose et Bradshaw 87] J.H. Boose et J.M. Bradshaw.
Expertise transfer and complex problem : using AQUINAS as a knowledge acquisition workbench for expert systems.
International Journal of Man-Machine Studies, 1987, n° 26, p. 3-28.
- [Bouchon-Meunier et Després 90] B. Bouchon-Meunier et S. Després.
Acquisition numérique/symbolique de connaissances graduelles.
Rapport de recherche n° 90-2 de l'Ecole des Hautes Etudes en Informatique (EHEI), février 1990.
- [Boury-Brisset et al. 90] A.C. Boury-Brisset, F. Charpillet et J.P. Haton.
Truth Maintenance in Multi-Agent Reasoning systems.
Cognitiva 1990, Madrid, novembre 1990.
- [Boy et al. 88] G. Boy, B. Faller et J. Sallantin.
Acquisition et ratification de connaissances.
Actes des deuxièmes journées nationales du PRC GRECO Intelligence Artificielle, Editions Teknea, Toulouse, 1988.
- [Bruxelles et Raccah 87] S. Bruxelles et P.Y. Raccah.
Information et argumentation : l'expression de la conséquence.
Cognitiva 1987, Paris, La Villette, mai 1987, p. 445-452.

- [Buisson et Prade 89] J.C. Buisson et H. Prade.
Un système d'inférence pratiquant l'interpolation au moyen de règles à prédicats graduels - une application au calcul de rations caloriques.
Convention IA 1989, volume 1, p. 43-57, Paris, 23-27 janvier 1989.
- [Caverni 88] J.P. Caverni.
La verbalisation comme source d'observables pour l'étude du fonctionnement cognitif.
Extrait de "Psychologie cognitive, modèles et méthodes", sous la direction de J.P. Caverni, C. Bastien, P. Mendelsohn et G. Tiberghien, PUG (Presses Universitaires de Grenoble), 1988, p. 253-273.
- [Caverni et Bastien 88] J.P. Caverni et C. Bastien.
La psychologie cognitive face à ses enjeux.
Avant-propos de "Psychologie cognitive, modèles et méthodes", sous la direction de J.P. Caverni, C. Bastien, P. Mendelsohn et G. Tiberghien, PUG (Presses Universitaires de Grenoble), 1988, p. 7-10.
- [Chandrasekaran 87] B. Chandrasekaran.
Towards a functional Architecture for Intelligence Based on Generic Information Processing tasks.
Proceedings of the 10th International Joint Conference on Artificial Intelligence - IJCAI 87 - Invited Talk, p. 1183-1192, Milan, Italie, 1987.
- [Chatain et Dury 91] J.N. Chatain et B. Dury.
Apports du modèle du blackboard aux systèmes experts d'aide au diagnostic.
Convention IA 1991, Paris, 15-17 janvier 1991.
- [Chehire et de Lastic Saint-Jal 88] W. Chehire et T. de Lastic Saint-Jal.
KIRK : un environnement de développement de systèmes experts et une application : l'interprétation de photographies aériennes.
Actes des 8^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, volume 3, p. 391-408, Avignon, 1988.
- [Chenevoy et Belaïd 91] Y. Chenevoy et A. Belaïd.
Hypothesis Management for Structured Document Recognition.
Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition - ICDAR 91 - St Malo, France, septembre 1991.
- [Chevrier et al. 90] V. Chevrier, S. Brunessaux et J.P. Haton.
A Blackboard-based Expert System for Noise Measurement Planning.
International Conference on Artificial Intelligence Applications and Neural Networks - IASTED - June 25-27, 1990, Zurich, Switzerland.
- [Choulet et al. 91] C. Choulet, A. Haurat, F. Sandoz et M. Tebaa.
Méthode générale d'acquisition de la connaissance experte.
Convention IA 91, Editions Hermès, p. 113-126, Paris, 1991.
- [Chouvet et Haton 91] M.P. Chouvet et M.C. Haton.
Influence du transfert et de la modélisation de l'expertise sur l'expertise elle-même : discussion autour d'une expérience.

- Proceedings of the First International Conference on Knowledge Modeling and Expertise Transfer - KMET 1991 -, Sophia-Antipolis (France), 22-24 Avril 1991 (IOS Press).
- [Clancey 85a] W.J. Clancey.
Review of J.F. Sowa's Conceptual Structures.
Artificial Intelligence, volume 27, p. 113-128.
- [Clancey 85b] W.J. Clancey.
Heuristic Classification.
Artificial Intelligence, volume 27, n° 3, p. 289-350, décembre 1985.
- [Collinot 88] A. Collinot.
Revising the BB1 Basic Control Loop to Control the Behavior of Knowledge Sources.
Proceedings of the AAAI-88 Workshop on Blackboard Systems, p. 19-36, St-Paul, Minnesota, August 1988.
- [Corby 87] O. Corby.
BB1 en SMECI.
Actes du 6^{ème} congrès Afcet-RFIA, 1987.
- [Corby et al. 90] O. Corby, F. Allez et B. Neveu.
A multi-Expert System for Pavement Diagnosis and Rehabilitation.
Transportation Research Journal, volume 24A, n° 1, p. 53-57, 1990.
- [Cormier et al. 91] Y. Cormier, B. Ouazan et C. Vogel.
KODMS : une méthode pour maîtriser le cycle de développement de systèmes experts au service national d'informatique de France Telecom.
Actes des 11^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, volume 1, 27-31 mai, Avignon, 1991.
- [Corkill et al. 86] D.D. Corkill, K.Q. Gallagher et K.E Murray.
GGB : a Generic Blackboard Development system.
Proceedings of the 5th National Conference on Artificial Intelligence - AAAI 86 - p. 1008-1014, Philadelphia, Pennsylvania, August 1986.
- [Corkill et al. 87] D.D. Corkill, K.Q. Gallagher et P.M. Johnson.
Achieving Flexibility, Efficiency, and Generality in Blackboard Architectures.
Proceedings of the 6th National Conference on Artificial Intelligence - AAAI 87 - p. 18-23.
- [David et Krivine 88] J.M. David et J.P. Krivine.
Acquisition de connaissances expertes à partir de situations types.
Actes des 8^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, volume 1, p. 45-58, Avignon, 1988.
- [David et Krivine 91] J.M. David et J.P. Krivine.
L'acquisition des connaissances vues comme un processus de modélisation : méthodes et outils.
Intellectica, 1991/2, n° 2, p. 101-137.

- [Davis 89] H. Davis.
Using models of behaviour in expert systems.
Actes des 9^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, volume "conférence générale", p. 393-404, Avignon, 1989.
- [Davis 79] R. Davis.
Interactive transfer of expertise : acquisition of new inference rules.
Artificial Intelligence, volume 12, 1979, p 121-157.
- [Després 88] S. Després.
Un apport à la conception de systèmes à base de connaissances : les opérations de déduction floues.
Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, 1988.
- [Després 90] S. Després.
Interpréter des informations numériques en vue d'une représentation symbolique.
Actes des 10^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, conférence générale, volume 2, p. 601-614, Avignon, 1990.
- [Dieng 87] R. Dieng.
Génération de topoi à partir des règles d'un système expert.
CC20 International Congress, Communication and Cognition applied Epistemology, décembre 1897.
- [Dieng et Trousse 88] R. Dieng et B. Trousse.
3DKAT, a dependency-driven dynamic-knowledge acquisition tool.
Proceedings of the Third International Symposium on Knowledge Engineering, p. 85-93, Madrid, octobre 1988.
- [Dieng et Trousse 89] R. Dieng et B. Trousse.
Utilisation de connaissances graduées en intelligence artificielle.
Actes des 9^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, volume "conférence générale", p. 405-415, Avignon, 1989.
- [Doggaz 92] N. Doggaz.
L'incertitude et l'imprécision dans les systèmes à multi-sources de connaissances : le système ATOMIC.
Actes de la deuxième conférence maghrébine en génie logiciel et Intelligence Artificielle, Tunis, 13-16 avril 1992 (à paraître).
- [ENPC 85]
Nouvelles techniques pour la route.
Publication de l'Ecole Nationale Supérieure des Ponts et Chaussées, 1985.
- [Engelmore et Morgan 88] R.S. Engelmore et T. Morgan editors.
Blackboard Systems.
Addison Wesley, 1988.
- [Engelmore et Terry 79] R.S. Engelmore et A. Terry.
Structure and Fonction of the CRYSLIS System.
Proceedings of the 6th International Joint Conference on Artificial Intelligence - IJCAI 79 - p. 250-256, Tokyo, Japan, 1979.

- [Erceau et Ferber 91] J. Erceau et J. Ferber.
L'intelligence artificielle distribuée.
La recherche, n° 233, juin 1991, volume 22, p. 750-758.
- [Erman *et al.* 80] L.D. Erman, F. Hayes-Roth, V.R. Lesser and R.D. Reddy.
The Hearsay-II Speech Understanding System : Integrating Knowledge to Resolve Uncertainty.
ACM Computing Surveys, 12 : 213-253, 1980
- [Erman *et al.* 81] L.D. Erman, P.E. London et S.F. Fickas.
The Design and an Example Use of Hearsay III.
Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence - IJCAI 81 - p. 409-415, Vancouver, British Columbia, 1981.
- [Ernst 85] C. Ernst.
Introduction aux systèmes experts de gestion.
Editions Eyrolles, 1985.
- [Fajon et Corby 88] M. Fajon et O. Corby.
Entretien routier assisté par système multi-expert.
Actes des 8^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, volume "Conférences spécialisées", p. 589-601, Avignon, 1988.
- [Farreny et Ghallab 87] H. Farreny et M. Ghallab.
Eléments d'intelligence artificielle.
Hermès 1987.
- [Ferber 87] J. Ferber.
Des objets aux agents : une architecture stratifiée.
Actes du 6^{ème} congrès Afcet-RFIA, 1987.
- [Ferber et Ghallab 88] J. Ferber et M. Ghallab.
Problématique des univers multi-agents intelligents.
Actes des deuxièmes journées nationales du PRC GRECO Intelligence Artificielle, Editions Teknea, Toulouse, 1988.
- [Ferraris *et al.* 89] C. Ferraris, M.C. Haton, J-J. Davaine, P. Cuchet et G. Cornu.
Le diagnostic en voirie urbaine : utilisation d'un système expert.
Actes des Journées Européennes de Nancy - Colloque "La ville et les nouvelles technologies", Nancy, 12 et 13 octobre 1989.
- [Ferraris *et al.* 90] C. Ferraris, M.C. Haton, P. Cuchet, J-J. Davaine et G. Cornu.
Assisting the specialist for decision making about road maintenance : a multi-expert approach.
Proceedings of the Second European Conference on Applications of Artificial Intelligence and Robotics to Building Architecture and Civil Engineering - EUROP'IA 90 - p. 244-251, Liège, 15 et 16 mars 1990.
- [Ferraris *et al.* 91] C. Ferraris, V. Chevrier, M.C. Haton et J.P. Haton.
Raisonnement et démarche experte dans un système multi-agents.
Actes du 8^{ème} congrès Afcet-RFIA, volume 1, Lyon-Villeurbanne, 25-29 novembre 1991.

- [Ferraris et Haton 91] C. Ferraris et M.C. Haton.
Multi-level Architecture and Human Mental Activity : Connections and Feedback during Expert System Building.
Proceedings of the World Congress on Expert Systems, Orlando, Florida, 16-19 December 1991.
- [Gleizes et al. 90] M.P. Gleizes, P. Glize et S. Trouilhet.
La résolution distribuée de problèmes dans un environnement multi-agents..
Convention IA 90, Editions Hermès, volume 1, p. 121-135, Paris, 1990.
- [Gleizes et Trouilhet 91] M.P. Gleizes et S. Trouilhet.
Conception d'un système multi-agents : étude de la coopération dans SYNERGIC.
Actes du 8^{ème} congrès Afcet-RFIA, volume 2, Lyon-Villeurbanne, 25-29 novembre 1991.
- [Gong 87] Y. Gong et J.P. Haton.
Une société de spécialistes à niveaux multiples pour l'interprétation de signaux.
Actes du 6^{ème} congrès Afcet-RFIA, 1987.
- [Hajek et Haas 88] J. J. Hajek et C. Haas.
Applications of artificial intelligence in highway pavement maintenance.
3rd International Conference "AI in Engineering", volume "Diagnosis and Learning", 5 August 1988, Palo-Alto, California.
- [Haton MC 89] M.C. Haton.
L'acquisition en amont de la structuration des connaissances.
Actes des journées du pôle 4 du PRC Intelligence Artificielle : " L'acquisition des connaissances. Méthodes et outils", Pont-à-Mousson, 24 et 25 janvier 1989.
- [Haton 89] J.P. Haton.
Panorama des systèmes multi-agents.
Actes des onzièmes journées francophones sur l'informatique : "Architectures avancées pour l'Intelligence Artificielle", EC2 Editeur, Nancy, Janvier 1989.
- [Haton JP et Haton MC 89] J.P. Haton et M.C. Haton.
L'Intelligence Artificielle.
Collection "Que sais-je", n° 2444, PUF (Presses Universitaires de France), Paris.
- [Haton et al. 91] J.P. Haton, N. Bouzid, F. Charpillet, M.C. Haton, B. Lâasri, H. Lâasri, P. Marquis, T. Mondot et A. Napoli.
Le raisonnement en intelligence artificielle.
InterEditions, Collection iia, Paris, 1991.
- [Hayes-Roth 84] B. Hayes-Roth.
BB1 : An Architecture for Blackboard Systems that Control, Explain, and Learn about their own Behaviour.
Technical Report HPP-84-16, Heuristic Programming Project, Computer Science Department, Stanford University, December 1984.
- [Hayes-Roth 85] B. Hayes-Roth.
A Blackboard Architecture for Control.
Artificial Intelligence, volume 26, 1985, p. 251-321.

- [Hayes-Roth et Hewett 88] B. Hayes-Roth and M. Hewett.
BB1 : An Implementation of the blackboard Control Architecture.
Blackboard Systems, Addison Wesley, 1988, p. 297-313.
- [Hoc et Leplat 83] J.M. Hoc et J. Leplat.
Evaluation of different modalities of verbalization in a sorting task.
International Journal of Man-Machine Studies, 1983, n° 18, p. 283-306.
- [IVF 89]
Génie urbain - Aménagement et territoire (revue de l'association des Ingénieurs des Villes de France), Avril 1989, n° 356.
- [Kahn et al. 85] G. Kahn, S. Nowlan et J. McDermott.
Strategies for Knowledge Acquisition.
IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, volume PAMI-7, n° 5, septembre 1985.
- [Kayser 84] D. Kayser.
Examen de diverses méthodes utilisées en représentation des connaissances.
Actes du 3^{ème} congrès AFCET-RFIA, Paris, janvier 1984, tome II, p. 115-144.
- [Kayser 85] D. Kayser.
La représentation des connaissances : un cas typique de collaboration interdisciplinaire.
Cognitiva 85, Paris, 4-7 juin 1985.
- [Kayser 88] D. Kayser.
Le raisonnement à profondeur variable.
Actes des deuxièmes journées nationales du PRC GRECO Intelligence Artificielle, Editions Teknea, Toulouse, 1988.
- [Kitto et Boose 89] C.M. Kitto et J.H. Boose.
Selecting Knowledge Acquisition Tools and Strategies Based on Application Characteristics.
International Journal of Man-Machine Studies, 1989, n° 31, p. 149-160.
- [Koenig et Crochon 88] A. Koenig et E. Crochon.
TRAM : tableau noir pour robotique autonome automobile.
Actes des 8^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, tome 1, p. 493-510, Avignon, 1988.
- [Lâasri et al. 88] H. Lâasri, B. Maître et J.P. Haton.
Hybrid Control to Achieve Efficiency and Flexibility in Blackboard-Based Systems.
Proceedings of the AAAI-88 Workshop on Blackboard Systems, p. 59-72, St-Paul, Minnesota, August 1988.
- [Lâasri et Maître 89] H. Lâasri et B. Maître.
Coopération dans un univers multi-agents basée sur le modèle du blackboard : études et réalisations.
Thèse de l'Université de Nancy I, février 1989.

- [Lâasri *et al.* 91] B. Lâasri, H. Lâasri et V. R. Lesser.
An Analysis of Negotiation and its Role for Coordinating Cooperative distributed Problem Solvers.
Actes des 11^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, 27-31 mai, Avignon, 1991.
- [Lalanda *et al.* 90] P. Lalanda, J.C. Lementec, F. Charpillat, J.P. Haton, F. Desard, M. Collet, S. Bertuzzi et T. Joubert.
Etude d'un système d'aide au pilote pour l'autoprotection d'un avion de combat par des techniques multi-bases de connaissances.
Actes des 10^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, volume "conférence spécialisée défense et sécurité", Avignon, 1990.
- [Laske 86] O.E. Laske.
Competence and performance notions in expert system design : a critique of rapid prototyping.
Actes des 6^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, volume 1, p. 257-297, Avignon, 1986.
- [Laurière 82a] J. L. Laurière.
Représentation et utilisation des connaissances - 1^{ère} partie : Les systèmes experts.
TSI, 1(1) : 25-42, janvier/février 1982.
- [Laurière 82b] J. L. Laurière.
Représentation et utilisation des connaissances - 2^{ème} partie : Représentation des connaissances.
TSI, 1(2) : 109-133, mars/avril 1982.
- [Lesser et Corkill 88] V.R. Lesser et D.D. Corkill.
The Distributed Vehicle Monitoring Testbed : a Tool for Investigating Distributed Problem Solving Network.
AI Magazine, 4(3) : 15-33, Fall 1983.
- [Levy-Schoen 88] A. Levy-Schoen.
Les mouvements des yeux comme indicateurs des processus cognitifs.
Extrait de "Psychologie cognitive, modèles et méthodes", sous la direction de J.P. Caverni, C. Bastien, P. Mendelsohn et G. Tiberghien, PUG (Presses Universitaires de Grenoble), 1988, p. 329-347.
- [Godo *et al.* 88] L.I. Godo, R. Lopez de Mantaras, C. Sierra et A. Verdaguer.
Managing linguistically expressed uncertainty in Milord-application to medical diagnosis.
Actes des 8^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, p 571-596, Avignon, 1988.
- [Mahé et Vesoul 87] H. Mahé et P. Vesoul.
Acquisition des connaissances et adaptation à l'utilisateur : outils et méthodes.
Actes des 7^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, p 625-645, Avignon, 1987.

- [Marcus et McDermott 88] S. Marcus et J. McDermott.
SALT : a Knowledge Acquisition Language for Propose-and-Revise Systems.
 Artificial Intelligence, 1988, p 1-37.
- [Mariño 91] O. Mariño.
Classification d'objet composites dans un système de représentation de connaissances multi-points de vue.
 Actes du 8^{ème} congrès Afcet-RFIA, volume 1, Lyon-Villeurbanne, 25-29 novembre 1991.
- [Ministère 77] Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du territoire.
Catalogue 1977 des structures types de chaussées neuves.
- [Ministère 87] CETUR, LPC, Ministère de l'Équipement, du Logement, de l'Amélioration du territoire et des Transports.
Dégradations des chaussées urbaines.
- [Mouaddib et Charpillet 92] A. Mouaddib et F. Charpillet *Un modèle de raisonnement pour la garantie de temps de réponse.*
 Soumis aux 12^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, Avignon, 1992.
- [Moulin 90] S. Moulin.
SMAC : un outil d'acquisition de connaissances pour des problèmes de conception.
 Thèse de l'école nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, Toulouse, septembre 1990.
- [Musen et al. 87] M.A. Musen, L.M. Fagan, D.M. Combs et E.H. Shortliffe.
Use of a domain model to drive an interactive knowledge editing tool.
 International Journal of Man-Machine Studies, 1987, n° 26(1), p. 105-121.
- [Musen et Gruber 91] M. Musen et T. Gruber.
Tools for Knowledge Acquisition.
 Cours sur l'acquisition des connaissances dispensé lors de la conférence AAAI 91.
- [Nii et Aiello 79] H.P. Nii et N. Aiello.
AGE (Attempt to Generalize) : a Knowledge-Based Program for building Knowledge-Based Programs.
 Proceedings of the 6th International Joint Conference on Artificial Intelligence - IJCAI 79 - p. 645-655, Tokyo, Japan, 1979.
- [Nii et al. 82] H.P. Nii, E.A. Feigenbaum, J.J. Anton and A.J. Rockmore.
Signal-to-Symbol Transformation : HASP/SIAP Case Study.
 AI Magazine, 3(2) : 23-35, 1982.
- [Nii 86a] H.P. Nii.
Blackboard Systems (Part 1) : The Blackboard Model of Problem Solving and the Evolution of Blackboard Architectures.
 AI Magazine, 7(2) : 38-53, 1986.

- [Nii 86b] H.P. Nii.
Blackboard Systems (Part 2) : Blackboard Application Systems, Blackboard Systems from a Knowledge Engineering Perspective.
AI Magazine, 7(3) : 82-106, 1986.
- [Nwana et al. 91] H.S Nwana, R.C. Paton, T.J.M Bench-Capon et M.J.R. Shave.
Facilitating the Development of Knowledge Based Systems : a Critical Review of Acquisition Tools and Techniques.
Actes des 11^{èmes} journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, Conférence générale, volume 1, 27-31 mai, Avignon, 1991.
- [Olson et Rueter 87] J. Reitman Olson et H.H. Rueter.
Extracting expertise from experts : Methods for knowledge acquisition.
Expert Systems, August 1987, volume 3, n° 4, p. 152-168
- [Prade 88] H. Prade.
Raisonnement avec des règles d'inférence graduelles : Une approche basée sur les ensembles flous.
Revue d'intelligence artificielle, volume 2, n° 2, p. 29-44, 1988.
- [Racah et Bruxelles 89] P.Y. Racah et S. Bruxelles.
Raisonnement graduel et connaissance graduelle : utilisation d'un modèle linguistique.
Actes des journées nationales du PRC IA, janvier 1989, Paris.
- [Ritchie 87] S.G. Ritchie.
Expert Systems in Pavement Management.
Transportation Research Journal, volume 21A, n° 2, p. 145-152, 1987.
- [Ritchie et al. 87] S.G. Ritchie, A.M. ASCE, C. Yeh, J.P. Mahoney et N.C. Jackson.
Surface Condition Expert System for Pavement Rehabilitation Planning.
Journal of Transportation Engineering (ASCE), volume 113, n° 2, March 1987.
- [Rolland et al. 88] C. Rolland, O. Foucaut, G. Benci.
Conception des systèmes d'information : la méthode REMORA.
Editions Eyrolles, 1988.
- [Shaw et Gaines 87] M.L. Shaw et B.R. Gaines.
KITTEN : Knowledge initiation and transfer tools for experts and novices.
International Journal of Man-Machine Studies, 1987, n° 27, p. 251-280.
- [Vermersch 89] P. Vermersch .
Comment faites-vous ? L'accès aux connaissances inconscientes de l'opérateur est-il possible ?
Communication au 5^{ème} congrès international de psychologie du travail de langue française, Paris, 30 mai 1988. Actes du congrès parus en 1989.
- [Visser 90] W. Visser. *Acquisition de connaissances : l'approche de la psychologie cognitive illustrée par le recueil d'expertise en conception.* Actes des JAC 1990, p. 33-50, Lannion.

- [Vogel 88] C. Vogel.
Génie cognitif.
Editions Masson, collection "sciences cognitives", Paris, 1986.
- [Wielinga *et al.* 91] B.J. Wielinga, A.T. Schreiber et J.A. Breuker.
Kads: A Modelling Approach to Knowledge Engineering.
Rapport KADS-II/T1.1/PP/UvA/008/1.0 de l'Université d'Amsterdam,
8 mai 1991, à paraître dans la revue "Knowledge Acquisition".
- [Wielinga et Breuker 84] B.J. Wielinga et J.A. Breuker.
Interpretation of verbal data for knowledge acquisition.
ECAI 84, "Advances in Artificial Intelligence", T. O'Shear editor, 1984, p. 41-50.
- [Warin *et al.* 92] F. Warin, C. Ferraris et V. Chevrier.
Manuel d'utilisation de ATOME : moteur d'ordre 1
Rapport technique, CRIN, 1992 (à paraître).

Annexes

Annexe A

Les blackboards de l'application

Cette annexe comporte la description des niveaux des divers blackboards utilisés dans le système ROSY. Nous ne redétaillerons pas les niveaux qui ont déjà été présentés par ailleurs, c'est-à-dire le niveau tronçon du blackboard *Rue*.

A.1 Le blackboard Rue

A.1.1 Le niveau tronçon

Voir page 62 (paragraphe 3.1.1 de la partie II).

A.1.2 Le niveau Chaussée

Largeur

Voies : *liste de type de voies (stationnement, roulement)*

Famille de chaussées (desserte/ voie bus/ distribution/ transit/ voie-piétonne)

Vitesse (fort/ moyen/ faible)

Profil en long (bon/ moyen/ déformé/ très déformé)

Profil en travers (bon/ moyen/ déformé/ très déformé)

Bombé (bon/ moyen/ très)

Homogénéité

Aspect général

Etat_chaussée (Très abimé/ abimé/ moyen/ peu/ pas)

Etat_trottoirs (Très abimé/ abimé/ moyen/ peu/ pas)

Type_bordures (granit/ béton/ calcaire)

Bordures (droites/ tordues)

Type_caniveaux (absence/ béton/ pavés)

Fil_d'eau_caniveaux (régulier/ flaches)

Etanchéité_caniveaux (bonne/ moyenne/ faible)

Aspect général des fouilles

Quantité de fouilles
 Pas des fouilles (<= 10m / 10-50m / > 50m)
 Surface totale des fouilles

Dernière_réfection

Date
 Ce qui a été fait (fondation/tapis/type de maintenance)
 Conditions de mise en œuvre (bonnes/ moyennes/ mauvaises)
 Pointeurs sur les photographies-vidéodisque

Age = $f(date)$

Stagnation d'eau (oui/non)

Infiltration d'eau (nulle/ faible/ moyenne/ forte)

Coefficient de dégradation

Diagnostic

Qualité de la chaussée / sécurité
 Qualité de la chaussée / confort
 Qualité de la chaussée / pérennité
 Qualité de la chaussée / bruit
 Qualité de la chaussée / esthétique
 Diagnostic_fondation
 Diagnostic_surface
 Problèmes particuliers

Réfection à entreprendre :

Aménagements-prévus : *liste de (type, ampleur)*

Lien vers le Bb Réparation

FAIT_PARTIE_DE : *lien inverse de CONTIENT_CHAUSSÉES*

A_POUR_STRUCTURE : *lien vers le niveau Structure de ce même Bb*

A_POUR_TRAFFIC : *lien vers le niveau Trafic de ce même Bb*

ETAT : *lien vers le niveau Etat_actuel de ce même Bb*

CONTIENT_RESEAUX : *lien vers le niveau Réseau de ce même Bb*

A_SUBLFOUILLES : *lien vers le niveau Fouilles_et_interventions de ce même Bb*

TRAVAUX_ENVISAGES : *lien vers le niveau Aménagements_programmés de ce même Bb*

A.1.3 Le niveau Structure

Appréciation de la fondation (bonne/ bonne-a-priori/ pas-d-information/ mauvaise-a-priori/ mauvaise)

Type (souple/ rigide/ semi-rigide/ pavée/ inconnue)

Type fond (souple/ rigide/ semi-rigide/ inconnue)

Composition surface

liste de (couche, date, nom de matériau (ou lien vers Bb Matériau), épaisseur, compacité)

Composition fond (*cf ci-dessus*)

EST_STRUCTURE_DE : *lien vers le niveau Chaussée (inverse de A_POUR_STRUCTURE)*

A.1.4 Le niveau Trafic

Mesure de trafic (T0/ T1/ T2/ T3/ T4/ T5)

Estimation (important/moyen/faible/nul) = $f(\text{mesure_de_trafic})$

Augmentation-depuis-dernière-réfection (forte/ moyenne/ faible/ nulle)

Poids Lourds (important/moyen/faible/nul)

Bus (important/moyen/faible/nul)

Sens de circulation (Bi/ Unique/ Nul)

TRAFFIC_DE : *lien vers le niveau Chaussée (inverse de A_POUR_TRAFFIC)*

A.1.5 Le niveau Etat_Actuel

Pointeurs sur photographies-vidéodisque

Signalement des dégradations

Nombre de coups de téléphone

Nombre de lettres

Interventions prioritaires

Dates des interventions

Estimation des interventions

* (fortes/moyennes/faibles/nulles) = $f(\text{trois premiers paramètres})$

$f = \text{règles de physique qualitative}$

* (récente, ancienne) = $f(\text{dates de réclamations})$

$f = \text{règles de physique qualitative}$

Dégradations incriminées : *liste de noms de Dégradations*

Tests et mesures effectués

liste de (type, résultats, appréciation = $f(\text{résultats})$)

ETAT_DE_LA_CHAUSSEE : *lien vers le niveau Chaussée (inverse de ETAT)*

DEGRADATIONS_CONSTATEES : *lien vers le Bb Dégradations, niveau Dégradations_sur_le_terrain*

A.1.6 Le niveau Réseau

Concessionnaire
 Etat (bons/douteux/fichus) Densité des réseaux
 Densité des branchements
 Densité des émergences
 Date de dernière réfection : *liste de (qualificatif-réseau, date)*
 Type (souple/dur)
 Localisation (axe/ rive/ bande de roulement/ trottoir)
 EST_DANS_CHAUSSEE : *lien vers le niveau Chaussée (inverse de CON-
 TIENT_RESEAU)*
 RESEAU_DEGRADATION : *lien vers le Bb Dégradations, niveau Dégrada-
 tions_sur_le_terrain*

A.1.7 Le niveau Fouilles_et_interventions

Nature (Fouille/ intervention)
 Travail réalisé (fuite/ changement d'une conduite/ réalisation d'un ouvrage sou-
 terrain/ purge sur déformations/ nid de poule/ reprise partielle du tapis/ rem-
 blaiement-affaissement/ terrain-remblayé/ élargissement ...)
 Intervenant
 Date
 Type des fouilles (Longitudinales / Transversales/ autres)
 Localisation transversale (Axe /Rive /Bande de roulement /trace des roues)
 Surface touchée
 Apparente
 Adresse postale
 FOUILLE_DANS_CHAUSSEE : *lien vers le niveau Chaussée (inverse de A_SU-
 BI_FOUILLE)*
 INTERVENTION_DEGRADATION : *lien vers le Bb Dégradations, niveau Dé-
 gradations_sur_le_terrain*

A.1.8 Le niveau Aménagements_Programmés

Date
 Nature
 Ampleur (Chaussée/ Trottoir/ Les_2)
 PREVU_DANS : *lien vers le niveau Chaussée (inverse de TRAVAUX_ENVI-
 SAGES)*

A.2 Le blackboard Dégradations

A.2.1 Le niveau Concept_Dégradation

Voir page 65 (paragraphe 3.1.2 de la partie II).

A.2.2 Le niveau Cause

Voir page 65 (paragraphe 3.1.2 de la partie II).

A.2.3 Le niveau Dégradations_sur_tronçon

Nom de la dégradation

Etendue

Localisation longitudinale (Toute la chaussée/Moyennement/Localisé)

Localisation transversale (Axe /Rive /Bande de roulement /trace des roues)

Situation

Dégradations à proximité : Liste de (dégradation, degré de proximité (à_côté_de /au_même_endroit_que))

Périodicité spatiale

Périodicité temporelle

Gravité (très léger/ léger/ modéré/ grave/ très grave) ou *liste de (degré de gravité à choisir dans l'ensemble précédent, quantité ou %)*

Gravité_localisation_transversale : *liste de (degré de gravité, localisation transversale, %)*

Importance/sécurité (nulle/ faible/ moyenne/ forte/ très forte)

Importance/confort (nulle/ faible/ moyenne/ forte/ très forte)

Importance/pérennité (nulle/ faible/ moyenne/ forte/ très forte)

Origine (fondation/ surface)

Cause : Nom de la cause effective de la dégradation

DE_TYPE : *lien vers le niveau Concept_Dégradation (inverse de DONNE_NAISSANCE_A)*

APPARAIT_SUR : *lien vers le Bb Rue, niveau Etat_actuel (inverse de DEGRADATIONS_CONSTATEES)*

LIEE_AU_RESEAU : *lien vers le Bb Rue, niveau Réseau (inverse de RESEAU_DEGRADATION)*

LIEE_A_INTERVENTION : *lien vers le Bb Rue, niveau Fouilles_et_interventions (inverse de INTERVENTION_DEGRADATION)*

A.2.4 Le niveau Dégradations_sur_10_mètres

Nom de la dégradation

Etendue

Localisation longitudinale (Numéro de la portion de 10 mètres concernée)

Localisation transversale (Axe /Rive /Bande de roulement /trace des roues)

Situation

Dégradations à proximité : Liste de (dégradation, degré de proximité (à_côté_de /au_même_endroit_que))

Périodicité spatiale

Périodicité temporelle

Gravité (très léger/ léger/ modéré/ grave/ très grave)

Gravité_localisation_transversale : liste de (degré de gravité, localisation transversale, ‰)

DE_TYPE : lien vers le niveau Concept_Dégradation (inverse de DONNE_NAISSANCE_A)

MEME_DEGRADATION_QUE : lien vers le Bb Dégradations, niveau dégradations-sur-10m (est son propre inverse)

APPARAÎT_SUR : lien vers le Bb Rue, niveau Etat_actuel (inverse de DEGRADATIONS_CONSTATEES)

LIEE_AU_RESEAU : lien vers le Bb Rue, niveau Réseau (inverse de RESEAU_DEGRADATION)

LIEE_A_INTERVENTION : lien vers le Bb Rue, niveau Fouilles_et_interventions (inverse de INTERVENTION_DEGRADATION)

Annexe B

Description des dégradations et des causes utilisées dans le SE Rosy

B.1 Les dégradations

- Nom de la dégradation : **Désenrobage**.
Description : départ des granulats de l'enrobé de la couche de roulement .
Famille : arrachements.
Origine : surface.
Type de chaussée : pavée, souple.
Importance/sécurité : faible.
Importance/confort : faible.
Causes probables : enrobé trop vieux, stagnation d'eau, mauvaise mise en œuvre, mauvaise qualité des matériaux.
- Nom de la dégradation : **Pelade**.
Description : arrachement du revêtement par plaques.
Famille : arrachements.
Origine : surface.
Type de chaussée : pavée, souple, enduit.
Causes probables : absence ou insuffisance de couche d'accrochage, couche de roulement trop fine, mauvaise mise en œuvre.
- Nom de la dégradation : **Nid de poule**.
Description : trou de forme irrégulière et de taille variée, au fond duquel on aperçoit la fondation. Famille : arrachements.
Origine : inconnue.
Type de chaussée : souple.
Importance/sécurité : forte.
Importance/confort : forte.
Causes probables : infiltration d'eau, phénomène de gel-dégel, défaut de portance, stagnation d'eau, mauvaise mise en œuvre.

- Nom de la dégradation : **Nid de poule traité.**
Description : ancien trou qui a été rebouché avec de l'asphalte ou de l'enrobé.
Famille : arrachements.
Origine : inconnue.
Type de chaussée : souple.
Importance/sécurité : moyenne.
Importance/confort : moyenne.

- Nom de la dégradation : **Ruine.**
Description : destruction partielle ou totale de la couche de roulement. Le revêtement part en morceaux.
Famille : arrachements.
Origine : fondation (à 95%), surface (pour les 5% restant).
Type de chaussée : pavée, souple.
Importance/sécurité : forte.
Importance/confort : forte.
Causes probables : fatigue de la structure, sous-dimensionnement, phénomène de gel-dégel, mauvaise qualité des matériaux.

- Nom de la dégradation : **Affaissement.**
Description : enfoncements localisés pouvant créer des dénivelés importants.
Famille : déformations.
Origine : fondation (à coup sûr).
Type de chaussée : pavée, souple.
Causes probables : sous-dimensionnement, fatigue de la structure, défaut de portance, pollution du corps de chaussée, rupture de réseau, mouvement de la cheminée d'une émergence de réseau, mauvais compactage des matériaux, mauvaise qualité des matériaux, sous-dimensionnement d'une sur largeur, terrain remblayé, épaisseur de sable trop importante, présence d'arbres.

- Nom de la dégradation : **Orniérage.**
Description : dépressions ou déformations longitudinales se créant dans les traces des roues.
Famille : déformations.
Origine : fondation (à 90%), surface (à 10%).
Type de chaussée : souple.
Causes probables : fatigue de la structure, mauvais compactage des matériaux, bitume trop mou ou enrobé surcompacté, épaisseur des couches bitumineuses trop importante, mauvaise qualité des matériaux.

- Nom de la dégradation : **Bosses.**
Description : surélévation localisée du revêtement.
Famille : déformations.
Origine : inconnue.
Type de chaussée : pavée, souple.
Causes probables : remblai trop important, déformations, présence d'arbres.

- Nom de la dégradation : **faïençage**.
Description : ensemble de fissures plus ou moins rapprochées formant un maillage.
Famille : fissures.
Origine : surface (à 5%), fondation (à 95%).
Type de chaussée : souple.
Importance/sécurité : nulle.
Importance/confort : nulle.
Causes probables : déformations, fatigue de la structure, sous-dimensionnement, défaut de portance, phénomène de gel-dégel, sous-dimensionnement d'une surlargeur, mauvaise qualité des matériaux.
- Nom de la dégradation : **Fissures en dallot**.
Description : fissuration avec ramifications et création d'un dallot.
Famille : fissures.
Origine : fondation (à 65%), surface (à 35%).
Type de chaussée : rigide, souple.
Importance/sécurité : nulle.
Importance/confort : nulle.
Causes probables : fatigue de la structure, sous-dimensionnement, enrobé trop vieux.
- Nom de la dégradation : **Fissures longitudinales**.
Description : lignes de rupture longitudinales.
Famille : fissures.
Origine : inconnue.
Type de chaussée : rigide, souple.
Importance/sécurité : nulle.
Importance/confort : nulle.
Causes probables : sous-dimensionnement d'une surlargeur, mauvais compactage d'une surlargeur, mauvais compactage des matériaux, enrobé trop vieux, déformations.
- Nom de la dégradation : **Fissures transversales**.
Description : lignes de rupture transversales.
Famille : fissures.
Origine : inconnue.
Type de chaussée : rigide, souple.
Importance/sécurité : nulle.
Importance/confort : nulle.
Causes probables : fatigue de la structure, sous-dimensionnement, remontée de fissures depuis une grave hydraulique, mauvais compactage des matériaux.
- Nom de la dégradation : **Glaçage**.
Description : usure de la couche de roulement par arasement progressif des gravillons.
Famille : arrachements.
Origine : surface.
Type de chaussée : enduit, souple.

- Importance/confort : nulle.
Causes probables : enrobé trop vieux, granulats trop polissables.
- Nom de la dégradation : **Disjointoiement de pavés.**
Description : déchaussement des pavés avec ouverture des joints entre les pavés.
Famille : fissures.
Origine : inconnue.
Type de chaussée : pavée.
Causes probables : joints de pavés trop vieux, déformations, mauvaise mise en œuvre, présence d'arbres.
 - Nom de la dégradation : **Fissures au droit de joints.**
Description : ouverture de joints de tapis ou de joint de fouilles.
Famille : fissures.
Origine : surface (à 60%), fondation (à 40%).
Type de chaussée : rigide, souple.
Importance/sécurité : nulle.
Importance/confort : nulle.
Causes probables : mauvaise mise en œuvre, enrobé trop vieux, déformations, mauvais compactage des matériaux, sous-dimensionnement d'une surlargeur, mauvais compactage d'une surlargeur.
 - Nom de la dégradation : **Fissuration aléatoire.**
Description : lignes de rupture allant dans n'importe quel sens.
Famille : fissures.
Origine : inconnue.
Type de chaussée : rigide, souple.
Importance/sécurité : nulle.
Importance/confort : nulle.
Causes probables : déformations, mauvais compactage des matériaux, présence d'arbres, mouvement de la cheminée d'une émergence de réseau.
 - Nom de la dégradation : **Ressuage.**
Description : remontée de liant à la surface de la chaussée.
Famille : remontées.
Origine : surface.
Type de chaussée : enduit, souple.
Importance/confort : nulle.
Causes probables : bitume trop mou ou enrobé surcompacté, excès de liant.

B.2 Les causes

- Cause : **Mauvaise mise en œuvre.**
Description détaillée : Mise en œuvre par conditions météorologiques défavorables ou mise en œuvre des matériaux défectueuse.
Catégorie : mise en œuvre, fouille.
Origine : surface, fondation.

Est cause de : désenrobage, pelade, fissures au droit de joints, nid de poule, disjointoiment de pavés.

- Cause : **Stagnation d'eau.**

Description détaillée : Stagnation d'eau provoquant un arrachement des granulats de l'enrobé et accélérant sa dégradation jusqu'à la formation de nids de poule.

Catégorie : accident, mise en œuvre.

Origine : surface.

Est cause de : désenrobage, nid de poule.

- Cause : **Enrobé trop vieux.**

Description détaillée : Altération de la couche de roulement suite aux intempéries et aux charges qui ont été supportées pendant de longues années.

Catégorie : usure naturelle, fouille.

Origine : surface.

Est cause de : désenrobage, fissures en dallot, fissures longitudinales, fissures au droit de joints, glaçage.

- Cause : **Couche de roulement trop fine.**

Description détaillée : L'enrobé fin est pris en sandwich entre les charges roulantes et la fondation de la chaussée qui constitue un ensemble homogène. Il cède sous le trafic, ce qui va provoquer des cassures suivies d'arrachements de morceaux d'enrobé.

Catégorie : mise en œuvre, fouille.

Origine : surface.

Est cause de : pelade.

- Cause : **Absence ou insuffisance de couche d'accrochage.**

Description détaillée : La couche de roulement n'est pas bien accrochée sur celle du dessous. Des morceaux d'enrobé vont s'arracher par plaques sous le poids du trafic.

Catégorie : mise en œuvre.

Origine : surface.

Est cause de : pelade.

- Cause : **Fatigue de la structure.**

Description détaillée : A force d'être sollicité, le corps de chaussée perd ses propriétés par endroit.

Catégorie : usure naturelle, fouille.

Origine : fondation.

Est cause de : ruine, affaissement, orniérage, faïençage, fissures en dallot, fissures transversales.

- Cause : **Défaut de portance.**

Description détaillée : Saturation en eau du corps de chaussée qui n'a plus ses propriétés.

Catégorie : mise en œuvre, accident, fouille.

Origine : fondation.

Est cause de : nid de poule, affaissement, faïençage.

- Cause : **Pollution du corps de chaussée.**

Description détaillée : Il y a remontée de mauvais terrain dans le corps de chaussée. Celui-ci se fragilise, ce qui provoque des affaissements aux endroits fragilisés.

Catégorie : mise en œuvre, accident, fouille.

Origine : fondation.

Est cause de : affaissement.

- Cause : **Terrain remblayé.**

Description détaillée : Remblaiement de zones ou se trouvaient avant des constructions. Celles-ci ont été rasées pour laisser la place à une rue.

Catégorie : mise en œuvre, accident.

Origine : fondation.

Est cause de : affaissement.

- Cause : **Epaisseur des couches bitumineuses trop importante.**

Description détaillée : L'enrobé du dessus repose sur des couches molles. Sous les charges roulantes, il y a fluage.

Catégorie : usure naturelle, mise en œuvre.

Origine : surface.

Est cause de : orniérage.

- Cause : **Mauvaise qualité des matériaux.**

Description détaillée : Enrobé mal dosé; matériaux de fondation ou gravillons de l'enrobé ne répondant pas aux qualités souhaitées.

Catégorie : mise en œuvre, fouille.

Origine : surface, fondation.

Est cause de : désenrobage, affaissement, orniérage, faïençage.

- Cause : **Phénomène de gel-dégel.**

Description détaillée : Gel \implies Tout le corps de chaussée durcit et gonfle du fait de l'eau qu'il contient. DéGel \implies Le dégel se fait depuis l'enrobé vers la fondation. A un moment donné, la couche de base dégelée et amollie va être prise en sandwich entre l'enrobé et la couche de fondation, tous deux durs. Cela cède au niveau amolli.

Catégorie : usure naturelle.

Origine : fondation, surface.

Est cause de : nid de poule, ruine, faïençage.

- Cause : **Infiltration d'eau.**

Description détaillée : L'infiltration d'eau dans le corps de chaussée contribue à affaiblir celui-ci et à lui faire perdre son homogénéité donc ses propriétés. De graves problèmes peuvent alors survenir.

Catégorie : accident, fouille, mise en œuvre, usure naturelle.

Origine : fondation, surface.

Est cause de : nid de poule.

- Cause : **Sous-dimensionnement.**
Description détaillée : Insuffisance de l'épaisseur de la fondation vu pour le trafic et les conditions météorologiques (gel) que la chaussée a à supporter.
Catégorie : mise en œuvre, fouille.
Origine : fondation.
Est cause de : affaissement, faïençage, ruine, fissures en dallot, fissures transversales.
- Cause : **Déformations.**
Description détaillée : Toute déformation de la chaussée entraîne une fissuration de la couche de roulement.
Catégorie : accident.
Origine : fondation.
Est cause de : bosses, faïençage, disjoiement de pavés, fissures longitudinales, fissuration aléatoire, fissures au droit de joints.
- Cause : **Mauvais compactage des matériaux.**
Description détaillée : Compactage insuffisant \implies tassement des couches \implies affaissements.
Catégorie : mise en œuvre, fouille.
Origine : fondation.
Est cause de : affaissement, orniérage, fissures longitudinales, fissuration aléatoire, fissures au droit de joints, fissures transversales.
- Cause : **Rupture de réseau.**
Description détaillée : Un réseau qui casse ou fuit \implies pollution du corps de chaussée \implies affaissement.
Catégorie : accident.
Origine : fondation.
Est cause de : affaissement.
- Cause : **Épaisseur de sable trop importante.**
Description détaillée : Sur chaussée pavée une épaisseur de sable trop importante conduit à l'enfoncement des pavés dans celle-ci sous les charges.
Catégorie : mise en œuvre.
Origine : surface.
Est cause de : affaissement.
- Cause : **Mouvement de la cheminée d'une émergence de réseau.**
Description détaillée : la cheminée bouge et entraîne dans son mouvement le corps de chaussée autour d'elle.
Catégorie : mise en œuvre.
Origine : fondation.
Est cause de : affaissement, fissuration aléatoire.
- Cause : **Bitume trop mou ou enrobé surcompacté.**
Description détaillée : Sous les roues des véhicules, il y a fluage de l'enrobé qui est chassé de part et d'autre du passage des roues.
Catégorie : mise en œuvre.

Origine : surface.

Est cause de : orniérage, ressuage.

- Cause : **Remblai trop important.**

Description détaillée : Remblaiement d'un nid de poule ou d'une tranchée avec une quantité de matériaux trop importante.

Catégorie : mise en œuvre.

Origine : fondation, surface.

Est cause de : bosses.

- Cause : **Présence d'arbres.**

Description détaillée : Par pression sur le corps de chaussée ou sur les réseaux, les racines des arbres peuvent occasionner de gros dommages.

Catégorie : accident.

Origine : fondation.

Est cause de : affaissement, fissuration aléatoire, bosses, disjointoiement de pavés.

- Cause : **Sous-dimensionnement d'une surlargeur.**

Description détaillée : La surlargeur travaille, s'écarte du reste de la chaussée et provoque l'ouverture du joint surlargeur-chaussée.

Catégorie : mise en œuvre.

Origine : fondation.

Est cause de : fissures au droit de joints, faïençage, affaissement, fissures longitudinales.

- Cause : **Mauvais compactage d'une surlargeur.**

Catégorie : mise en œuvre.

Origine : fondation.

Est cause de : fissures longitudinales, fissures au droit de joints.

- Cause : **Remontée de fissures depuis une grave hydraulique.**

Description détaillée : retrait naturel et progressif du bloc rigide de fondation provoquant une fissuration de ce bloc à pas décimétrique.

Catégorie : usure naturelle.

Origine : fondation.

Est cause de : fissures transversales.

- Cause : **Granulats trop polissables.**

Description détaillée : L'usure des granulats conduit à l'apparition sur le tapis de plaques noires, lisses et brillantes, très glissantes en cas de pluie.

Catégorie : mise en œuvre.

Origine : surface.

Est cause de : glaçage.

- Cause : **Excès de liant.**

Description détaillée : Lorsqu'un enrobé est trop riche en bitume, celui-ci remonte à la surface du tapis sous l'action des charges roulantes. Il y a formation de plaques noires, lisses et brillantes, très glissantes en cas de pluie. Ce phénomène ne se produit qu'au début de la vie de l'enrobé.

Catégorie : mise en œuvre.

Origine : surface.

Est cause de : ressuage.

- Cause : **Joints de pavés trop vieux.**

Description détaillée : Usure naturelle (ou accélérée, suite à travaux défectueux) des joints de pavés due à l'action de l'eau, des balayeuses et du trafic.

Catégorie : usure naturelle, mise en œuvre.

Origine : surface.

Est cause de : disjoints de pavés.

B.3 Importance des dégradations pour les différents critères

DEGRADATIONS	CONFORT	SECURITE	PERENNITE
Désenrobage	+	+	+++
Pelade	depend	depend	++
Nid de poule	+++	+++	+++
Nid de poule traité	++	++	+
Ruine	+++	+++	+++
Affaissement	depend	depend	++
Orniérage	depend	depend	++
Bosses	depend	depend	++
Faïencage			+++
Fissures en dallot			+++
Fissures longitudinales			+++
Fissures transversales			+++
Fissures au droit de joints			+++
Fissuration aléatoire			+++
Disjointoiement de pavés	depend	depend	+++
Glacage		+++	+
Ressuage		+++	+

Figure B.1.

UNIVERSITE DE NANCY I

NOM DE L'ETUDIANT : Mademoiselle FERRARIS Christine

NATURE DE LA THESE : DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I
en INFORMATIQUE

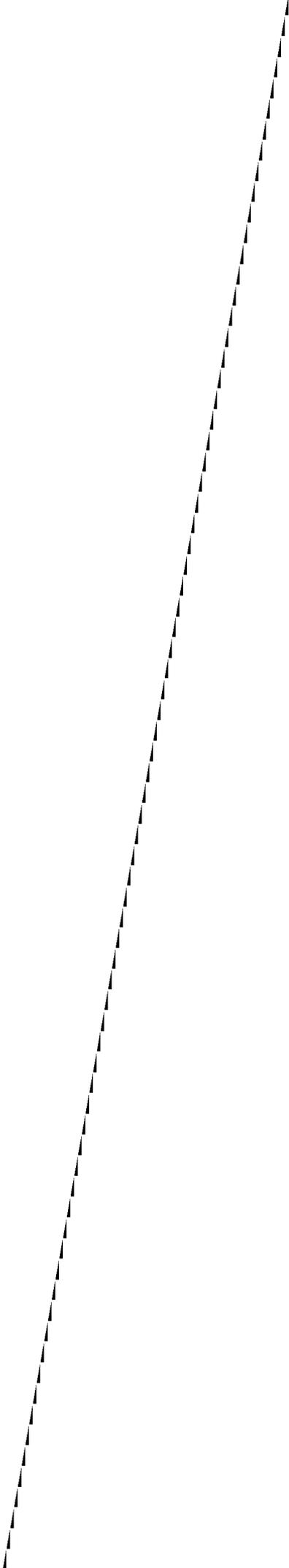
VU, APPROUVE ET PERMIS D'IMPRIMER

NANCY, le 3 FEV. 1992 n°52

LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I



M. BOULANGÉ





D 095 085577 8

Le raisonnement humain comporte un aspect à la fois mystérieux et complexe. Il n'est ainsi pas étonnant que de nombreuses études soient menées dans le but de tenter de le reproduire sur des machines. C'est un des buts des recherches en intelligence artificielle (IA), avec notamment la construction de systèmes à base de connaissances ou de systèmes experts. Lorsque le raisonnement à modéliser fait appel à diverses compétences, on parle alors de *multi-expertise*. De tels raisonnements peuvent être modélisés par des *systèmes multi-agents*.

C'est dans le cadre de ces systèmes que s'inscrit cette thèse. Elle explore les domaines de l'acquisition des connaissances, de leur représentation, de la modélisation et de l'exploitation des raisonnements experts dans les systèmes multi-agents. Les idées, propositions et réalisations qui y sont développées sont issues des difficultés que nous avons rencontrées en traitant le cas particulier d'un système multi-experts en maintenance de voirie urbaine : le système ROSY (ROAD SYSTEM). Ce système sert ainsi à illustrer nos propositions tout au long de cette thèse.

Après avoir introduit le domaine multi-agents en IA et présenté succinctement le générateur ATOME, avec lequel ROSY est développé, nous décrivons le système multi-experts en lui-même. Ce système est développé en collaboration avec la mairie de Nancy et est dédié à l'aide à la décision en maintenance de voirie urbaine.

Cette modélisation est issue de l'analyse de la démarche experte et de l'acquisition des connaissances nécessaires au raisonnement expert. Nous consacrons une partie à l'étude de l'acquisition de connaissances expertes, tout d'abord dans un cadre général puis en nous attachant au cas particulier de la voirie urbaine. Nous présentons alors les diverses techniques utilisées et en dégageons les intérêts. Nous proposons ensuite une *méthodologie* pour l'acquisition des connaissances dans un univers multi-agents, fondée sur la notion de *constructeurs*.

La nature des connaissances et du raisonnement à mettre en œuvre dans ROSY nous conduit ensuite à aborder les problèmes de la représentation de ces connaissances. Nous nous intéressons tout d'abord aux *données visuelles* (notion d'*héritage* et de *point de vue*) avant de traiter le cas des *règles graduelles*. Enfin, nous traitons de la modélisation du raisonnement. Les modifications apportées au système générique ATOME sont présentées : réalisation d'un moteur d'ordre 1 avec gestion dynamique des connaissances pour les spécialistes, propositions pour une gestion explicite du raisonnement des tâches et une meilleure communication entre tâches et spécialistes.

Les propositions émises quant à la modélisation des raisonnements et des connaissances peuvent être généralisées à tout système multi-agents, voire à tout système expert, dans le domaine de l'aide à la décision.