



**HAL**  
open science

# Méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances pour l'aide à la supervision des procédés automatisés complexes : application à la supervision du trafic téléphonique de l'Ile-de-France

Patrice Caulier

## ► To cite this version:

Patrice Caulier. Méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances pour l'aide à la supervision des procédés automatisés complexes : application à la supervision du trafic téléphonique de l'Ile-de-France. Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1997. Français. NNT : 1997VALE0001 . tel-03430465

**HAL Id: tel-03430465**

**<https://uphf.hal.science/tel-03430465v1>**

Submitted on 16 Nov 2021

**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.

1337 VALE 0001

# THÈSE



présentée à

**L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES  
ET DU HAINAUT-CAMBRÉSIS**

pour l'obtention du

**DOCTORAT**

*Spécialité Automatique Industrielle et Humaine*

par

**Patrice CAULIER**

*Maître ès Sciences*

---

**Méthodologie de capitalisation et de réutilisation  
de connaissances pour l'aide à la supervision  
des procédés automatisés complexes**

*Application à la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France*

---

Soutenue publiquement le 10 janvier 1997 devant le Jury composé de :

Patrick MILLOT  
Bernard DUBUISSON  
Jean ERCEAU  
Marie-Claude THOMAS  
Willemien VISSER  
Joëlle BLANQUET  
Bernard HOURIEZ

Université de Valenciennes  
Université de Compiègne  
ONÉRA  
Université de Nice-Sophia Antipolis  
INRIA  
France Télécom/CNET  
Université de Valenciennes

Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Invitée  
Directeur de thèse









# THÈSE

présentée à

**L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES  
ET DU HAINAUT-CAMBRÉSIS**

pour l'obtention du

**DOCTORAT**

*Spécialité Automatique Industrielle et Humaine*

par

**Patrice CAULIER**  
*Maître ès Sciences*

---

**Méthodologie de capitalisation et de réutilisation  
de connaissances pour l'aide à la supervision  
des procédés automatisés complexes**

*Application à la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France*

---

Soutenue publiquement le 10 janvier 1997 devant le Jury composé de :

Patrick MILLOT	Université de Valenciennes	Président
Bernard DUBUISSON	Université de Compiègne	Rapporteur
Jean ERCEAU	ONÉRA	Rapporteur
Marie-Claude THOMAS	Université de Nice-Sophia Antipolis	Examineur
Willemien VISSER	INRIA	Examineur
Joëlle BLANQUET	France Télécom/CNET	Invitée
Bernard HOURIEZ	Université de Valenciennes	Directeur de thèse



*À ma famille,  
à mes amis.*

*“Il y a un vif plaisir d’intelligence à entrevoir,  
dans une analogie, l’amorce d’une loi.”*

André Maurois  
1885 - 1967



---

## Avant-propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, au sein de l'équipe "Informatique Industrielle et Communication Homme-Machine" dirigée par Monsieur Patrick Millot, Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Je tiens ici à lui témoigner toute ma reconnaissance pour son accueil et pour la confiance qu'il m'a accordée au cours de ce long travail.

Je suis aussi très reconnaissant envers Messieurs Bernard Dubuisson, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne, Directeur du Laboratoire Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes de l'Université de Technologie de Compiègne, et Jean Erceau, Chef du Département Applications de l'Intelligence Artificielle et des Systèmes Complexes à l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire et d'en être les rapporteurs.

Je remercie très sincèrement Mesdames Marie-Claude Thomas, Professeur à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, Chercheur au Laboratoire d'Informatique, Signaux et Systèmes de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, Willemien Visser, Chargée de Recherche à l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, et Joëlle Blanquet, Responsable du Groupe d'Ergonomie pour les Services de Télécommunications au Centre National d'Études des Télécommunications, pour l'intérêt qu'elles portent à ce travail en acceptant de participer à mon jury de thèse.

Mes remerciements les plus chaleureux vont tout naturellement à Monsieur Bernard Houriez, Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, mon Directeur de thèse. Sa disponibilité et le flot continu de ses éclairages et de ses encouragements m'ont permis d'améliorer et d'enrichir ce travail. Il m'a également patiemment et pertinemment conseillé lors de la rédaction de ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de ma plus profonde gratitude.

Je tiens à remercier les membres des équipes de l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique de Rocquencourt et du Laboratoire d'Informatique de Paris Nord avec qui j'ai eu le plaisir de travailler. Merci également au personnel du Centre de Supervision du Réseau de Paris-Montsouris de m'avoir accueilli et d'avoir participé activement à la réalisation de ce travail.

Par leurs conseils, leur soutien et leur amitié, les chercheurs, ingénieurs et administratifs du Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis ont contribué, chacun à leur façon, à la progression de ce travail. Qu'ils veuillent bien trouver ici l'expression de ma gratitude.

Enfin, et surtout, je pense plus particulièrement en cet instant à mes parents. Ils m'ont donné les moyens de poursuivre mes études comme je le souhaitais. Je tiens ici à leur exprimer ma plus profonde reconnaissance.

Valenciennes, le 6 janvier 1997.

# Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre 1 — La supervision des procédés automatisés complexes.....</b>	<b>19</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>19</b>
<b>2 Organisation générale des procédés automatisés.....</b>	<b>20</b>
2.1 Classification des procédés automatisés.....	20
2.2 Sûreté de fonctionnement d'un procédé automatisé.....	21
2.2.1 Les critères de sûreté de fonctionnement.....	21
2.2.1.1 La disponibilité.....	22
2.2.1.2 La crédibilité.....	24
2.2.2 Les moyens de la sûreté de fonctionnement.....	24
2.3 Conception d'un système de surveillance.....	24
2.3.1 Objectif.....	25
2.3.2 Fonctions.....	25
2.3.3 Critères de qualité.....	25
2.3.3.1 Qualité de la procédure de détection.....	26
2.3.3.2 Qualité de la procédure de localisation.....	26
2.3.3.3 Qualité de la procédure de diagnostic.....	27
2.3.4 Contraintes pour la conception d'un système de surveillance.....	27
2.4 Méthodes pour la conception d'un système de surveillance.....	27
2.4.1 Méthodes sans modèle du procédé.....	28
2.4.2 Méthodes avec modèle du procédé.....	28
2.5 Du système de contrôle/commande réflexe au système de supervision.....	30
<b>3 L'opérateur humain dans le système de supervision.....</b>	<b>33</b>
3.1 Les tâches de l'opérateur humain dans le système de supervision.....	33
3.2 Mécanismes et capacités de raisonnement chez l'opérateur humain.....	34
3.2.1 Modèle de l'opérateur humain face à une tâche.....	34
3.2.2 Comportement décisionnel de l'opérateur humain.....	36
3.3 Discussion.....	37
<b>4 L'assistance à l'opérateur humain de supervision.....</b>	<b>38</b>
4.1 Classification des systèmes d'assistance.....	39
4.2 Intégration des systèmes d'assistance : la coopération homme-machine.....	40
4.2.1 Coopération horizontale.....	41
4.2.2 Coopération verticale.....	42
<b>5 Conclusion.....</b>	<b>43</b>

<b>Chapitre 2 — La résolution de problèmes : apports de la psychologie cognitive et de l'intelligence artificielle . . . . .</b>	<b>45</b>
--	-----------

<b>1 Introduction . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>2 La résolution de problèmes vue par la psychologie cognitive . . . . .</b>	<b>46</b>
2.1 Concepts de tâche et d'activité . . . . .	46
2.1.1 Concept de tâche. . . . .	46
2.1.2 Concept d'activité . . . . .	47
2.2 Stratégie de résolution de problèmes . . . . .	48
2.2.1 Concept de problème . . . . .	48
2.2.2 Compréhension du problème . . . . .	49
2.2.3 Élaboration d'une solution . . . . .	49
2.2.3.1 Stratégie de production de résultats <i>vs</i> stratégie de production de programmes . . . . .	50
2.2.3.2 Stratégie ascendante <i>vs</i> stratégie descendante. . . . .	50
2.2.4 Typologie de problèmes . . . . .	51
2.2.4.1 Problèmes de transformation d'états. . . . .	51
2.2.4.2 Problèmes d'induction de structures. . . . .	51
2.2.4.3 Problèmes de conception. . . . .	51
2.3 Stratégie de résolution de problèmes en supervision . . . . .	52
2.3.1 Diagnostic du problème . . . . .	52
2.3.1.1 Composantes de l'activité de diagnostic . . . . .	53
2.3.1.2 Typologie des stratégies de diagnostic . . . . .	53
2.3.2 Planification d'une solution . . . . .	55
2.3.2.1 Concept de plan . . . . .	56
2.3.2.2 Démarche ascendante et descendante de planification . . . . .	56
2.4 La réutilisation de connaissances. . . . .	57
2.4.1 Le raisonnement par analogie . . . . .	57
2.4.2 La récupération de connaissances épisodiques. . . . .	58
2.4.2.1 Les indices de récupération . . . . .	58
2.4.2.2 Les stratégies de récupération . . . . .	58
<b>3 Apports de l'intelligence artificielle à la résolution de problèmes . . . . .</b>	<b>59</b>
3.1 Les formalismes de représentation des connaissances . . . . .	59
3.2 Quelques modèles de raisonnement . . . . .	61
3.2.1 Le raisonnement logique . . . . .	62
3.2.2 Le raisonnement analogique. . . . .	63
3.2.2.1 Terminologie et formalisation du raisonnement analogique . . . . .	63
3.2.2.2 Stratégie de conduite du raisonnement analogique. . . . .	64
3.2.2.3 Raisonnement analogique et résolution de problèmes . . . . .	65
<b>4 Conclusion . . . . .</b>	<b>67</b>

<b>Chapitre 3 — Supervision d'un procédé automatisé complexe : le réseau téléphonique commuté . . . . .</b>	<b>69</b>
---	-----------

<b>1 Introduction . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>2 Présentation du réseau téléphonique commuté . . . . .</b>	<b>70</b>
2.1 Organisation du réseau téléphonique. . . . .	71
2.2 La fonction transmission . . . . .	72
2.3 La fonction commutation. . . . .	73
2.4 Méthodes d'acheminement. . . . .	75
2.4.1 Acheminement fixe. . . . .	76

2.4.2 Acheminement dynamique .....	76
2.5 Notion de trafic téléphonique .....	77
2.6 Gestion du réseau téléphonique .....	78
2.6.1 Niveau stratégique .....	78
2.6.1.1 Planification .....	79
2.6.1.2 Programmation .....	79
2.6.2 Niveau tactique .....	80
2.6.2.1 Gestion préventive .....	80
2.6.2.2 Gestion corrective .....	80
2.6.3 Niveau opérationnel .....	81
2.6.3.1 Supervision du trafic téléphonique en temps réel .....	81
2.6.3.2 Exploitation des équipements .....	81
2.7 Le réseau téléphonique de l'Île de France .....	82
<b>3 Supervision du trafic téléphonique de l'Île de France .....</b>	<b>82</b>
3.1 Le Centre de Supervision du Réseau de Paris-Montsouris .....	83
3.2 Le superviseur de trafic .....	83
3.2.1 Objectifs et fonctions .....	83
3.2.2 Architecture et principe de fonctionnement .....	84
3.2.2.1 Données brutes et indicateurs calculés .....	86
3.2.2.2 Élaboration d'une alarme qualifiée .....	87
3.3 La supervision du trafic téléphonique en temps réel .....	88
3.3.1 Composantes de l'activité .....	88
3.3.1.1 Détection d'une situation anormale .....	89
3.3.1.2 Diagnostic d'un incident de trafic .....	89
3.3.1.3 Planification des actions .....	91
3.3.2 Typologie des incidents de trafic .....	92
<b>4 Conclusion .....</b>	<b>94</b>

<b>Chapitre 4 — Méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances .....</b>	<b>95</b>
---	-----------

<b>1 Introduction .....</b>	<b>95</b>
<b>2 Capitalisation et réutilisation de l'expérience .....</b>	<b>96</b>
2.1 Notion d'expérience .....	96
2.2 Cycle pour la maîtrise du retour d'expérience .....	96
<b>3 Présentation générale de la méthodologie .....</b>	<b>98</b>
3.1 Objectifs fondateurs .....	99
3.2 Cadre méthodologique .....	99
3.3 Phases du cycle de développement .....	101
3.3.1 Analyse du problème .....	101
3.3.2 Spécification des connaissances .....	102
3.3.3 Conception .....	103
3.3.4 Réalisation et validation .....	105
3.4 Notions de point de vue et de contexte .....	106
3.4.1 Point de vue sur la résolution de problèmes .....	106
3.4.2 Contexte de la résolution de problèmes .....	106
<b>4 Acquisition structurée des connaissances .....</b>	<b>107</b>
4.1 Le recueil des données de l'expertise .....	107
4.1.1 Catégories de connaissances .....	108
4.1.2 Méthodes de recueil .....	109
4.2 La modélisation des connaissances .....	109
4.2.1 Construction du modèle de l'expertise <i>CommonKADS</i> .....	110
4.2.2 Le modèle de l'expertise <i>CommonKADS</i> .....	111

4.2.2.1	Modèle au niveau domaine .....	112
4.2.2.2	Modèle au niveau inférence.....	113
4.2.2.3	Modèle au niveau tâche.....	114
4.2.3	KADS-Tool : l'outil de modélisation .....	115
<b>5</b>	<b>Processus de raisonnement à partir de cas .....</b>	<b>116</b>
5.1	Introduction au raisonnement à partir de cas.....	116
5.2	Étapes constitutives du raisonnement à partir de cas .....	117
5.2.1	Mémoire de cas .....	118
5.2.2	Le cas : une structure en mémoire .....	118
5.2.3	Organisation de la mémoire de cas .....	119
5.2.4	Évaluation du problème à résoudre .....	120
5.2.5	Remémoration de cas .....	120
5.2.5.1	Extraction des candidats potentiels .....	121
5.2.5.2	Sélection du meilleur candidat .....	122
5.2.6	Adaptation de la solution.....	122
5.2.7	Évaluation de la solution.....	123
5.2.8	Stockage dans la mémoire de cas .....	123
<b>6</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>123</b>

<p><b>Chapitre 5 — Spécification et conception de SACRÉ : Système d'Assistance à la Capitalisation et à la Réutilisation de connaissances.....</b></p>	<b>125</b>
--	------------

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>125</b>
<b>2</b>	<b>Spécification de SACRÉ .....</b>	<b>126</b>
2.1	Recueil des données de l'expertise.....	126
2.1.1	Recueil des connaissances descriptives.....	127
2.1.2	Analyse de la tâche .....	128
2.1.3	Analyse de l'activité et des traces de l'activité.....	130
2.2	Modèle conceptuel de l'expertise.....	131
2.2.1	Modèle au niveau domaine .....	132
2.2.1.1	Concepts et propriétés .....	132
2.2.1.2	Expressions.....	132
2.2.1.3	Hiérarchies .....	133
2.2.1.4	Modèle du cas d'incident .....	133
2.2.1.5	Spécification d'une ontologie du domaine.....	135
2.2.2	Modèle au niveau inférence.....	135
2.2.2.1	Sélection d'un modèle d'interprétation.....	135
2.2.2.2	La réutilisation de connaissances.....	137
2.2.3	Modèle au niveau tâche.....	138
2.2.3.1	Tâche de supervision du trafic téléphonique.....	139
2.2.3.2	Méthodes de recherche d'informations en local .....	140
2.2.4	Vérification et validation du modèle conceptuel de l'expertise.....	141
2.3	Bilan et enseignements de la modélisation "CommonKADS" .....	142
2.3.1	Flexibilité des formalismes de modélisation.....	143
2.3.2	"Bon" niveau d'abstraction.....	143
2.3.3	Avantages et inconvénients de l'outil KADS-Tool .....	143
<b>3</b>	<b>Conception de SACRÉ .....</b>	<b>144</b>
3.1	Architecture logicielle de SACRÉ.....	144
3.1.1	Interface de gestion de la base de cas d'incident.....	145
3.1.2	Interface d'exploitation de la base de cas d'incident.....	146
3.2	Gestion de la base de cas d'incident .....	147
3.2.1	Représentation des cas d'incident .....	147

3.2.2	Catégorisation des classes d'incident .....	147
3.2.3	Description des cas d'incident. ....	148
3.2.4	Organisation hiérarchique de la base de cas .....	149
3.2.4.1	Choix des paramètres d'organisation.....	149
3.2.4.2	Construction d'un index.....	150
3.3	Exploitation de la base de cas d'incident .....	151
3.3.1	Description d'un incident à traiter.....	151
3.3.2	Recherche des cas proches.....	151
3.3.3	Évaluation de similarité .....	152
3.3.4	Proposition de procédures d'action .....	153
3.3.5	Apprentissage.....	153
<b>5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>154</b>
<hr/>		
<b>Chapitre 6 — Évaluation expérimentale et perspectives d'intégration et d'extensions de SACRÉ.....</b>		<b>157</b>
<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>157</b>
<b>2</b>	<b>Évaluation expérimentale de SACRÉ.....</b>	<b>158</b>
2.1	Exemple 1 : Arrêt DUPLEX d'un commutateur de transit.....	159
2.2	Exemple 2 : Inefficacité d'un faisceau de premier choix.....	164
2.3	Discussion.....	169
<b>3</b>	<b>Intégration de SACRÉ à l'environnement de supervision .....</b>	<b>169</b>
3.1	Organisation de la supervision du trafic téléphonique .....	170
3.2	Étude des interactions entre l'opérateur et SACRÉ .....	172
<b>4</b>	<b>Apports, limites et perspectives.....</b>	<b>174</b>
4.1	Apports méthodologiques et techniques .....	174
4.1.1	Apports méthodologiques .....	175
4.1.2	Apports de l'acquisition structurée des connaissances au raisonnement à partir de cas .....	175
4.1.3	Apports de SACRÉ à la supervision.....	176
4.2	Limites de SACRÉ .....	177
4.3	Perspectives.....	178
4.3.1	Quelques améliorations de SACRÉ.....	179
4.3.2	Vers un comportement temps réel de SACRÉ.....	179
4.3.3	Extension de la méthodologie à d'autres domaines d'application ..	180
<b>5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>181</b>
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>183</b>
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>187</b>
	<b>Index des sigles .....</b>	<b>199</b>
	<b>Index des figures.....</b>	<b>203</b>
	<b>Index des tableaux.....</b>	<b>207</b>
	<b>Annexe A — Organisation de la base de cas.....</b>	<b>209</b>
	<b>Annexe B — Approches de la notion de similarité .....</b>	<b>213</b>



---

## Introduction générale

*Dans cette introduction générale, nous situons les motivations et le contexte applicatif du travail de recherche exposé dans ce mémoire. L'objectif de la recherche ainsi que la méthodologie suivie sont ensuite introduits. Nous terminons par une description de la structure du mémoire et proposons quelques indications pour en faciliter la lecture.*

### Motivations et contexte du travail

Le thème de ce travail concerne le niveau supérieur de la structure de contrôle/commande des procédés automatisés complexes.

Confrontée à la mondialisation inéluctable de l'économie, chaque entreprise est contrainte à une course perpétuelle pour la compétitivité. Cette évolution économique a donné naissance à des procédés technologiques fortement automatisés et complexes. Actuellement, le degré d'automatisation, atteint grâce aux progrès de l'automatique et de l'informatique industrielle, débouche sur la mise en place de systèmes de supervision et de conduite des procédés hiérarchisés. L'objectif de tels systèmes est d'améliorer, d'une part, la sûreté de fonctionnement et donc la productivité du procédé et, d'autre part, d'optimiser la qualité du produit ou du service dû au client, dans le respect de contraintes de performances, de coût et de sécurité.

Libéré des tâches manuelles et pénibles de bas niveau par l'automatisation, l'opérateur humain reste intégré dans la boucle de contrôle/commande et se voit attribuer des tâches stratégiques de haut niveau pour maintenir ou ramener le procédé supervisé dans son mode de fonctionnement nominal. Ces tâches de résolution de problèmes sont essentiellement cognitives et de plus en plus complexes. Dès lors, l'homme est pressenti comme l'élément garant du procédé surtout lors de la gestion des perturbations et des pannes imprévisibles. De tels dysfonctionnements peuvent conduire à l'inefficacité des automatismes de bas niveau provoquant en cela des situations pour lesquelles la disponibilité, voire la sauvegarde de la sécurité du procédé, ne reposent plus que sur la seule décision humaine. En fonctionnement normal du procédé, l'activité de l'opérateur de supervision est réduite pour devenir rapidement importante, complexe et déterminante dès que la situation se dégrade. Elle se décline alors en tâches de détection d'événement anormal, de diagnostic et de planification de procédures d'action.

La difficulté de la mission des opérateurs émane de la gestion d'événements imprévisibles et inopinés, de la complexité structurelle et fonctionnelle du procédé, du peu de temps généralement disponible pour réagir et/ou de l'état de stress qui résulte des

enjeux. Dans un tel contexte, l'apport de systèmes logiciels d'assistance, capables de répondre aux besoins et contraintes de l'opérateur, est indispensable. C'est ce qui a motivé le travail de recherche exposé dans ce mémoire.

Le domaine d'application de la recherche se rapporte à la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Le travail s'inscrit au sein d'une coopération pluridisciplinaire de recherche entre le Centre National d'Études des Télécommunications (CNET), une équipe de psychologues du travail de l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA) et le Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines (LAMIH). Il a été soutenu par le Programme Interdisciplinaire de Recherche Cognisciences<sup>1</sup>.

## L'objectif

Le principal objectif du travail est la réalisation d'un système d'assistance performant, utile et utilisé par l'opérateur de supervision d'un procédé automatisé complexe en situation de résolution de problèmes. Le développement d'un tel système repose sur l'identification et le respect des particularités, des besoins et des contraintes de l'environnement socio-technique d'intégration. En effet, s'agissant de procurer une aide aux activités cognitives de l'opérateur, le développement ne peut s'effectuer indépendamment d'une analyse de l'activité de résolution de problèmes et du domaine de problèmes dans lequel l'expertise s'exerce. Volontairement inspiré par les caractéristiques générales du domaine d'application, le système d'assistance réalisé au cours de ce travail s'est orienté vers la mise en œuvre de la méthode de résolution de problèmes privilégiée par les opérateurs de supervision : la réutilisation d'incidents traités par le passé. L'aide procurée par le système revêt trois formes :

1. Aide à la capitalisation et à la pérennisation de l'expérience de supervision par l'apprentissage de "cas d'incident".
2. Aide au diagnostic par la remémoration de cas les plus proches d'un nouvel incident à traiter.
3. Aide au traitement des défaillances par la proposition de plans d'action déjà éprouvés.

La première forme d'assistance correspond à une tâche interprétative (synthétique). Les suivantes se rapportent à des tâches de résolution de problèmes (analytiques).

Atteindre cet objectif relève de la définition, de la mise en œuvre et de l'évaluation d'une méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances rigoureuse, interdisciplinaire et centrée sur l'utilisateur.

## L'approche

La méthodologie de développement de systèmes d'assistance aux opérateurs de supervision fondés sur la capitalisation et la réutilisation de connaissances s'inscrit dans le vaste champ de recherches interdisciplinaires que constituent les sciences cognitives [Guibert 91]. Gardner [85] en a synthétisé la problématique à l'aide de son "hexagone cognitif", figure IG.1. Les méthodes et outils développés jusqu'à présent par la plupart des disciplines qui se réfèrent aux sciences cognitives souffrent, en général, d'un

<sup>1</sup> Créé en avril 1990 par le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), le Programme Interdisciplinaire de Recherche Cognisciences est relatif aux sciences cognitives. Ses objectifs consistent à stimuler et amplifier l'activité de recherche en sciences cognitives, à accroître la collaboration entre les disciplines concernées et à préparer le transfert de la recherche fondamentale aux technologies cognitives [Holley 92].

manque de confrontation à des applications concrètes de type industriel et de taille significative. Ce travail tente de remédier à cet état.

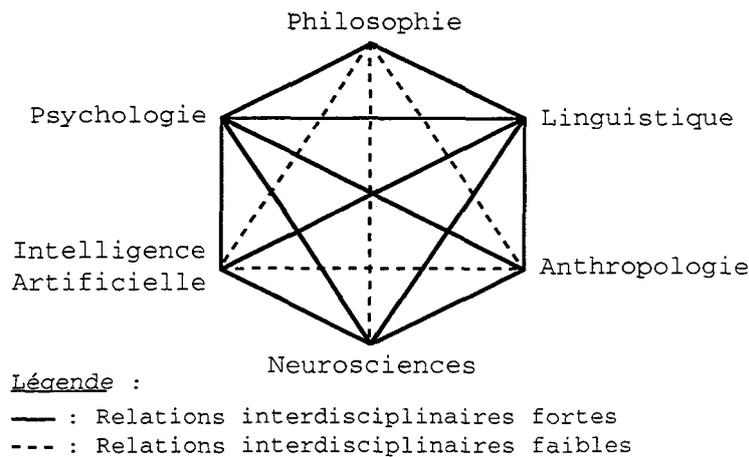


Figure IG.1 — *L'hexagone cognitif de Gardner [85].*

La méthodologie de développement de systèmes d'assistance présentée dans ce mémoire se réfère aux méthodes et outils de trois disciplines complémentaires des sciences cognitives : la psychologie, l'intelligence artificielle et l'automatique humaine.

La **psychologie** vise à repérer les invariants cognitifs et à reconstituer, voire à modéliser, les opérations qui sous-tendent les facultés et aptitudes humaines complexes, individuelles et sociales. La **psychologie cognitive**, qui porte sur l'étude des interactions entre l'homme et son environnement, participe efficacement au recueil des données de l'expertise et à l'analyse de la tâche et de l'activité de supervision. La **psychologie ergonomique**, pour sa part, permet d'assortir les caractéristiques des interfaces du système aux besoins cognitifs de l'utilisateur.

L'**intelligence artificielle** se propose de concevoir des systèmes capables de reproduire le comportement de l'être humain dans ses activités de raisonnement. L'**acquisition structurée des connaissances** contribue à la modélisation de l'expertise nécessaire à la mise en œuvre de la réutilisation de connaissances au sein du système d'assistance. Le **raisonnement à partir de cas** apporte les formalismes de représentation et de traitement des connaissances modélisées.

L'**automatique humaine** se préoccupe de considérer la structure homme-machine de contrôle/commande et se heurte, de nos jours, à de grandes difficultés dès lors qu'il s'agit d'introduire des modèles de raisonnement.

La méthodologie de développement s'appuie sur deux phases principales : la spécification des connaissances de résolution de problèmes et la conception du système d'assistance. La phase de spécification s'inscrit dans un cycle incrémental d'acquisition structurée des connaissances. Elle débouche sur le modèle conceptuel de l'expertise du domaine d'application. Les spécifications de ce modèle motivent le choix, d'une part, des objets structurés pour la représentation des incidents et, d'autre part, du mode de raisonnement à partir de cas pour l'implémentation des mécanismes de réutilisation des connaissances capitalisées. Ces phases laissent une large place au rôle du futur utilisateur en définissant et utilisant les notions de point de vue et de contexte.

Les fondements scientifiques, le domaine d'application, la description, l'application et l'évaluation de la méthodologie sont exposés dans ce mémoire suivant six chapitres.

## Plan du mémoire

La figure IG.2 situe les disciplines fondamentales impliquées dans le travail et précise l'objet des six chapitres qui structurent ce mémoire.

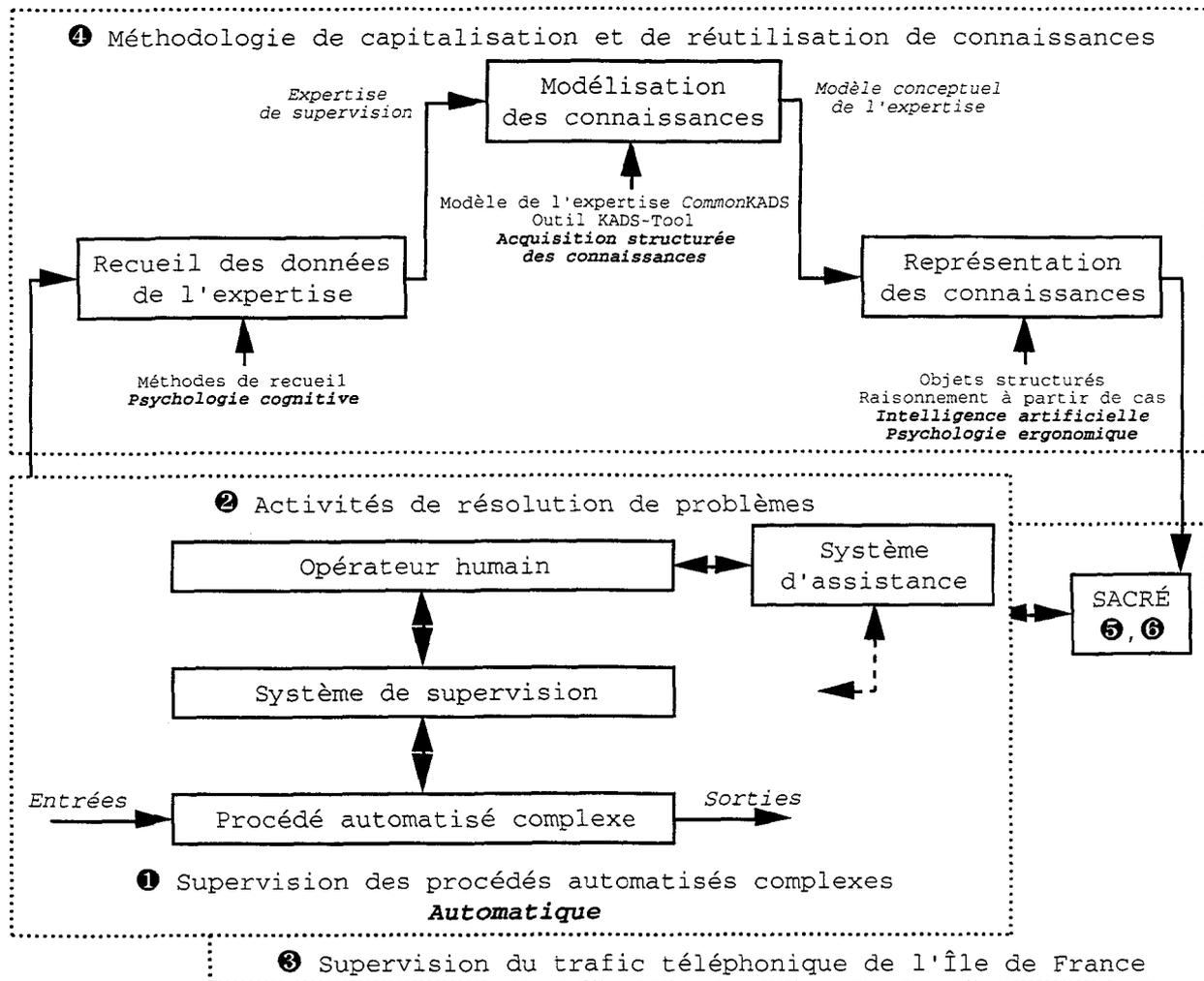


Figure IG.2 — Vue panoramique du mémoire.

Le premier chapitre positionne la problématique de la supervision des procédés automatisés complexes. Après une présentation des deux grandes classes de procédés et des critères de leur sûreté de fonctionnement, nous introduisons les caractéristiques et les méthodes de conception des systèmes de surveillance. Les progrès de l'automatique dans ce domaine débouchent sur la mise en place de structures de contrôle/commande hiérarchisées et centralisées. Cette première partie du chapitre conclut sur la nécessaire présence de l'opérateur humain dans ces structures notamment pour assurer la gestion des modes de fonctionnement anormaux imprévisibles du procédé supervisé. En ce sens, la seconde partie du chapitre s'intéresse aux capacités et au comportement de l'opérateur humain en situation de résolution de problèmes. Une discussion souligne la nécessité d'une assistance à l'opérateur pour ces situations. Ce besoin nous conduit à préciser les qualités et les différentes formes de systèmes d'assistance à la supervision. Pour être efficace, l'assistance doit s'établir dans l'esprit d'une coopération entre l'homme et la machine. Les concepts de coopération homme-machine "horizontale" et "verticale" sont alors présentés.

En relation avec les situations de résolution de problèmes auxquelles l'opérateur de supervision est amené à faire face et dans la perspective de la conception d'un système

d'assistance, le second chapitre est consacré à une étude des apports de la psychologie cognitive et de l'intelligence artificielle à la résolution de problèmes. Du point de vue de la psychologie cognitive, nous caractérisons les deux composantes d'une stratégie de résolution de problèmes que sont la compréhension du problème et la construction d'une solution, d'une façon générale puis relativement à la supervision de procédés. Nous nous intéressons alors aux modalités d'une méthode de résolution de problèmes particulière : la réutilisation de connaissances épisodiques. Les apports de l'intelligence artificielle à la résolution de problèmes concernent la définition de formalismes de représentation des connaissances et des modes de raisonnement. Nous insistons plus particulièrement sur la formalisation du raisonnement analogique en résolution de problèmes dont l'une des facettes est le raisonnement à partir de cas.

Avant de présenter la méthodologie, le troisième chapitre développe le domaine de la supervision du trafic téléphonique, objet de notre approche expérimentale. Dans un premier temps, nous décrivons les caractéristiques du procédé automatisé complexe que constitue le réseau téléphonique commuté et situons l'activité de supervision qu'il occasionne. Dans un deuxième temps, nous détaillons l'environnement humain et matériel de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Enfin, nous caractérisons les composantes de l'activité des opérateurs du Centre de Supervision du Réseau de Paris-Montsouris.

Le quatrième chapitre propose une méthodologie interdisciplinaire de développement de systèmes d'assistance à l'opérateur de supervision fondés sur la capitalisation et la réutilisation de l'expérience. La méthodologie s'inscrit résolument dans une approche de modélisation pour laquelle le modèle conceptuel de l'expertise de supervision est élaboré en préalable à la conception d'un système de raisonnement à partir de cas à même de capitaliser et de valoriser les connaissances de supervision. Notre principal apport se situe au niveau des phases de spécification et de conception que nous avons particularisées pour tenir compte d'une méthode de résolution de problèmes spécifique. Le chapitre expose l'organisation des phases de la méthodologie puis détaille, plus précisément, les phases prédominantes de spécification et de conception du système d'assistance.

Le chapitre 5 décrit les résultats de l'application de la méthodologie au domaine de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Une première partie expose le déroulement de l'activité de recueil des données de l'expertise au Centre de Supervision du Réseau de Paris-Montsouris. Le contenu de chacun des niveaux du modèle conceptuel de l'expertise est commenté en insistant, plus particulièrement, sur les principales spécifications dérivées du modèle et fondamentales pour la conception du système d'assistance : la définition du modèle du cas d'incident et les modalités de mise en œuvre de la réutilisation de connaissances. La seconde partie du chapitre présente SACRÉ, le Système d'Assistance à la Capitalisation et à la Réutilisation de connaissances dérivé de la phase de conception. L'architecture logicielle du système est donnée. Elle définit deux modes d'utilisation : un mode de gestion et un mode de réutilisation de la base de cas d'incident. Les composantes de chacun de ces modes sont détaillées.

Enfin, le dernier chapitre, consacré à l'évaluation, fait le bilan de la méthodologie. Il est structuré en trois parties. La première partie décrit et analyse les résultats du traitement de deux cas d'incident représentatifs par SACRÉ. La seconde partie discute du problème de l'intégration de SACRÉ dans son environnement opérationnel. Les interactions homme-machine à chaque étape du traitement d'un incident sont précisées. La dernière partie du chapitre dresse un bilan du travail. Les apports et limites, tant méthodologiques que techniques, sont discutés. En final, nous proposons des perspectives de développement et de recherche à ce travail. En ce qui concerne SACRÉ, nous proposons quelques pistes pour enrichir ses fonctionnalités et pour en améliorer les performances. Sur le plan méthodologique, nous proposons d'étendre notre approche à

d'autres domaines que la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France, tout en soulignant la nécessité de prolonger le travail sur les points clés du raisonnement à partir de cas que sont la représentation du cas, l'évaluation de similarité et l'adaptation de la solution.

## **Notes de lecture**

Le mémoire est composé de six chapitres. Les quatre premiers peuvent être lus de façon indépendante. La lecture des chapitres 3 et 4 est indispensable à la compréhension des chapitres 5 et 6.

Le langage opératoire du domaine des télécommunications comporte de nombreux sigles. Dans ce mémoire, nous en avons limité au mieux l'utilisation. Toutefois, pour ceux qui subsistent, notamment dans les exemples, le lecteur pourra se référer à l'index donné à la fin du mémoire.

# Chapitre 1

## La supervision des procédés automatisés complexes

### 1 Introduction

De nos jours, la complexité structurelle et fonctionnelle des procédés industriels impose la présence de systèmes de supervision destinés à garantir, autant que faire se peut, la qualité des performances et la sûreté de fonctionnement de ces procédés. En retour, l'exploitation de tels environnements confronte les opérateurs humains à des tâches de supervision complexes et difficilement automatisables. L'opérateur doit, d'une part, assurer le contrôle du fonctionnement normal et automatique du procédé et, d'autre part, détecter, diagnostiquer et corriger les éventuels dysfonctionnements. Cette présence humaine dans la boucle de supervision ne diminue en rien la complexité des tâches de supervision. Les résultats de nombreuses études sur les capacités et les limites de l'opérateur de supervision, rapportés dans [Millot 88], concluent que l'optimisation de l'efficacité passe par la nécessité de procurer une assistance au diagnostic et/ou à la prise de décision. L'objectif de ce chapitre est de présenter les aspects inhérents à la supervision des procédés automatisés complexes. Trois parties composent ce chapitre.

La première partie introduit les concepts liés aux procédés automatisés. Tout d'abord, elle considère les critères de sûreté de fonctionnement d'un procédé automatisé, puis évoque les caractéristiques et les méthodes de conception des systèmes de surveillance contribuant à l'amélioration de la sûreté de fonctionnement. Elle se poursuit par une description des structures de contrôle/commande qui ont successivement participé au développement des algorithmes de surveillance. Confronté aux limites actuelles de l'automatisation, l'exposé conclut à la nécessaire présence humaine pour la maîtrise de la complexité du pilotage du procédé en fonctionnements transitoire et anormal.

Dans le contexte de la supervision, l'opérateur humain est partie intégrante d'un système en boucle fermée où la prise de décision finale dépend directement, ou indirectement, des sorties du procédé contrôlé. La résolution de problèmes de supervision (prédominance de la surveillance) et de conduite (prédominance de l'intervention) du procédé est alors fonction des aptitudes physiques et mentales de l'opérateur, ainsi que de ses interactions avec les composants de l'environnement de supervision. En ce sens, la seconde partie du chapitre aborde les caractéristiques du comportement décisionnel de l'opérateur de supervision.

L'impossibilité d'automatiser l'ensemble des tâches attribuées à l'opérateur de supervision et le fait de ses capacités limitées justifient d'associer au système homme-machine de supervision des outils d'assistance au diagnostic et/ou à la prise de décision efficaces et robustes. La dernière partie présente les caractéristiques de tels outils destinés à réguler l'activité humaine et à conserver l'opérateur humain actif dans la boucle de contrôle et de commande. Leur intégration dans le contexte opérationnel entraîne une modification organisationnelle et fonctionnelle de l'environnement de supervision qu'il est alors nécessaire de repenser. Pour cela, nous introduisons les principes de coopération homme-machine.

## 2 Organisation générale des procédés automatisés

Dans une économie de marché, l'amélioration de la compétitivité<sup>2</sup> du produit, ou du service, constitue une exigence et un souci récurrents qui imposent une évolution structurelle et fonctionnelle permanente de l'outil de production ou de service. Les progrès de l'automatique et de l'informatique industrielle ont fortement contribué à cette évolution qui débouche sur des systèmes de supervision fortement hiérarchisés. Au sein de tels systèmes, l'opérateur humain voit la nature de ses tâches se modifier, leur niveau, et donc leurs exigences, augmenter, tout comme ses responsabilités vis-à-vis de la sûreté de fonctionnement du procédé. Afin de mieux cerner le rôle de l'opérateur de supervision, nous présentons, dans cette première partie, les critères de la sûreté de fonctionnement d'un procédé automatisé, les modalités de leur surveillance et, enfin, l'évolution des structures de contrôle/commande jusqu'aux systèmes de supervision actuels. Auparavant, nous définissons les deux grandes classes de procédés automatisés.

### 2.1 Classification des procédés automatisés

L'automatique est une discipline transversale qui s'intéresse, à des fins de surveillance et de commande, à deux grandes classes de procédés, selon la nature des transformations subies par les grandeurs qui les caractérisent : les **procédés à temps continu** et les **procédés à temps discret** [De Carfort *et al.* 87].

Pour les procédés continus toutes les grandeurs caractéristiques sont de nature continue. L'information associée à ces grandeurs est disponible à tout instant et peut prendre toutes les valeurs possibles entre deux limites. Une telle évolution conduit l'automaticien à approcher le comportement du procédé par un modèle mathématique. À l'intérieur de cette classe de procédés, les procédés continus lents, ou à longs délais de réponse comme les hauts fourneaux, s'opposent aux procédés continus rapides, tels que les centrales nucléaires. Cette opposition prend toute son importance si l'on considère la

<sup>2</sup> L'amélioration de la compétitivité globale d'un produit, ou d'un service, est obtenue par l'optimisation de plusieurs facteurs, tels que : les coûts de revient, la qualité du produit ou du service, la flexibilité et la sûreté de fonctionnement du procédé, et les conditions de travail des opérateurs humains. Cette optimisation passe par un souci constant d'innovation.

vitesse d'évolution du procédé supervisé par rapport au déroulement des activités cognitives de l'opérateur de supervision [Hoc 93].

Les procédés à événements discrets, en temps ou en amplitude, sont tels qu'au moins une grandeur caractéristique n'est pas disponible à tout instant. L'automaticien traite alors de transformations discontinues d'états discrets. Cette classe de procédés concerne, en particulier, les procédés industriels du domaine manufacturier, tels que les cellules robotisées, dont la gestion relève de la productique.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons, plus particulièrement, aux **procédés de traitement de flux** prestataires de services plutôt que de biens qui, au niveau de leur supervision, s'apparentent à la classe des procédés continus [Arpège 92]. Les procédés impliqués dans cette catégorie sont de conception et de comportement complexes de par la variété de leurs équipements et de leurs services, leur niveau d'interconnexion, leur dynamique et leur caractère évolutif. Les "grands réseaux" sont des représentants typiques des procédés de traitement de flux et peuvent se particulariser selon plusieurs types :

- les réseaux de transport par voie terrestre, aérienne, maritime ou fluviale ;
- les réseaux de distribution de fluides ou d'énergies ;
- les réseaux de communications informatiques ;
- les réseaux de télécommunications.

C'est ce dernier type de réseau qui constitue le domaine d'application de la méthodologie définie dans ce mémoire. De par leur évolutivité et la variété des points de vue selon lesquels il est possible d'aborder le domaine, les réseaux de télécommunications constituent un terrain d'expérimentation ardu. Considérés sous l'angle physique ou logique, ou encore en tant que support ou service, ils offrent une complexité qui résiste aux approches conventionnelles de l'automatisation. Avant de les présenter en détail dans le chapitre 3, nous allons centrer l'étude de la supervision dans le contexte général des procédés automatisés et de la résolution de problèmes.

## 2.2 Sûreté de fonctionnement d'un procédé automatisé

L'automatisation des procédés vise principalement deux objectifs. Le plus significatif est probablement le "faire mieux" qui cherche à optimiser le couple qualité/quantité du produit fabriqué, ou du service rendu, tout en veillant à la **sûreté de fonctionnement** du procédé. Souvent combiné avec le précédent, le second objectif : le "faire moins cher" amène au concept de contrôle/commande optimaux du procédé.

La conception des structures de contrôle/commande destinées à atteindre ces objectifs doit, avant tout, se préoccuper des aspects liés à la sûreté de fonctionnement du procédé automatisé.

### 2.2.1 Les critères de sûreté de fonctionnement

Dans le cadre des dernières évolutions technologiques, l'automatisation a donné naissance à des procédés de grande taille souvent composés de sous-procédés interconnectés ayant parfois des objectifs divergents. Une telle évolution pose à l'automaticien des problèmes nouveaux et importants en matière de surveillance et de commande. La résolution de ces problèmes passe par la prise en compte, dès la conception du système de contrôle/commande, des préoccupations relatives à la sûreté de fonctionnement du procédé.

La sûreté de fonctionnement caractérise les performances d'un procédé en ceci qu'elle rend compte de son aptitude à remplir sa mission [Staroswiecki 94]. Elle s'analyse selon deux critères principaux, figure 1.1 : la **disponibilité**, dont l'objectif est de caractériser les risques de dysfonctionnements et la capacité d'y faire face, et la **crédibilité** qui précise le comportement en cas de problèmes [Nussbaumer 87].

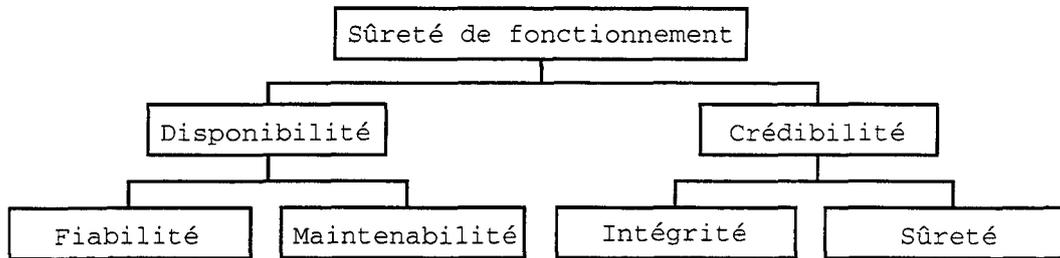


Figure 1.1 — Les critères de sûreté de fonctionnement.

La sûreté de fonctionnement des réseaux de télécommunications recouvre également le critère de **sécurité**<sup>3</sup> qui concerne la protection des données. En effet, pour être valide, un échange de données doit répondre à certaines exigences relatives au contrôle d'accès, à l'authentification des correspondants, à la confidentialité, à l'intégrité des informations échangées et à la non répudiation des données [Servin 96].

### 2.2.1.1 La disponibilité

En fonction des moyens mis en œuvre et de la fiabilité de chacun d'eux, la disponibilité d'un procédé  $P$ , notée  $D$ , est définie comme l'aptitude de ce procédé à remplir la mission pour laquelle il a été conçu à un instant  $t$  donné. Ceci s'écrit :

$$D_P(t) = \text{probabilité}(P \text{ non défaillant à l'instant } t)$$

La disponibilité se décline en termes de **fiabilité** et de **maintenabilité**.

La fiabilité d'un procédé  $P$ , notée  $F$ , est la probabilité pour que celui-ci fonctionne correctement pendant une durée donnée dans des conditions d'utilisation définies. En supposant que le procédé est disponible à l'instant initial  $t=0$ , sa fiabilité sur l'intervalle de temps  $[0, t]$  se traduit par la relation suivante :

$$F_P(t) = \text{probabilité}(P \text{ non défaillant sur } [0, t])$$

La maintenabilité, notée  $M$ , caractérise l'aptitude d'un procédé  $P$  à être maintenu ou rétabli dans un état tel qu'il puisse accomplir sa mission dans un temps déterminé, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits. Lorsque le procédé est défaillant à l'instant  $t=0$ , sa maintenabilité s'exprime comme le complément de la probabilité qu'il ne soit pas réparé pendant l'intervalle de temps compris entre les instants 0 et  $t$  :

$$M_P(t) = 1 - \text{probabilité}(P \text{ non réparé sur } [0, t])$$

Les différentes perturbations pouvant être cataleptiques (un équipement fonctionne ou ne fonctionne pas) ou aléatoires (défaillance statistiquement indépendante, la panne d'un équipement n'affecte pas les autres). Le comportement d'un procédé peut être

<sup>3</sup> D'une façon générale, la sécurité est définie comme l'aptitude d'un procédé à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. L'aptitude opposée est qualifiée d'**insécurité**. Les états d'insécurité sont généralement les défaillances ou les pannes non détectées et les commandes intempestives [Nussbaumer 87].

décrit dans le temps comme une suite d'états de bon fonctionnement et de panne. Cette observation permet de calculer deux paramètres importants :

1. Le **temps moyen de bon fonctionnement** ou MTBF (*Mean Time Between Failures*). Il est obtenu en divisant la somme des différents intervalles entre deux pannes par le nombre d'intervalles. Il correspond au temps moyen entre deux pannes successives.
2. Le **temps moyen de toute réparation** ou MTTR (*Mean Time To Repair*). Il est obtenu de façon similaire en divisant la somme totale des durées de pannes par le nombre de durées. Il représente le temps moyen nécessaire à la remise en état du procédé.

La disponibilité d'un procédé est alors définie comme le rapport entre son temps de bon fonctionnement moyen et son temps d'engagement total moyen :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

L'**indisponibilité**, notée  $I$ , s'énonce comme étant le complément :

$$I = 1 - D = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR}$$

Ces formules montrent que pour améliorer le taux de disponibilité d'un procédé, il est possible d'agir sur le MTBF ou le MTTR. Augmenter le MTBF consiste à investir dans des équipements de qualité garantie donc coûteux. Diminuer les temps d'indisponibilité revient à assurer une maintenance adéquate en vue de disposer d'équipements en état de fonctionnement quasi permanent et c'est la maintenance qui devient onéreuse.

L'indisponibilité d'un réseau de télécommunications peut résulter de trois facteurs [Servin 96] :

1. Des moyens de transmission de l'information.
2. Des équipements terminaux et de commutation.
3. Du fournisseur d'énergie.

La disponibilité des moyens de transmission et des équipements est améliorée par la redondance des moyens, tels que les lignes de secours et les équipements en réserve, notamment pour les équipements stratégiques dont la moindre défaillance entraîne une perturbation significative pour l'exploitation. Contre les défaillances du fournisseur d'énergie, il est possible, localement, de prévoir des onduleurs et/ou des groupes électrogènes.

En conclusion, la disponibilité, et plus particulièrement sa composante fiabilité, constitue le principal critère de performance d'un réseau de télécommunications. Elle traduit l'aptitude du réseau à assurer la continuité du service. Pour les abonnés, la disponibilité est le reflet de la qualité des services attendus, dans la mesure où elle caractérise les risques de perturbation. Pour l'opérateur du réseau, la disponibilité symbolise les services dus au client avec, pour corollaire, l'évocation de préoccupations d'ordre économique liées aux temps d'inaccessibilité et de perturbation du trafic. L'amélioration de la disponibilité du réseau dépend fortement de l'efficacité du comportement des opérateurs en charge de sa supervision.

Un second critère, plus subjectif, caractérise la sûreté de fonctionnement d'un procédé : la crédibilité.

### 2.2.1.2 La crédibilité

La crédibilité est définie comme l'assurance fournie par le procédé de sa capacité à reconnaître et signaler son état normal ou anormal et à résister à des entrées non autorisées ou incorrectes. Elle regroupe les notions d'intégrité et de sûreté.

D'une façon générale, l'intégrité est définie comme la garantie, donnée par le procédé, de son aptitude à exécuter correctement la mission qui lui est confiée, à informer d'un quelconque de ses états pouvant conduire à une situation contraire et, dans ce cas, à permettre une accommodation ou une reconfiguration, soit automatique, soit manuelle. La sûreté est définie comme l'assurance fournie par le procédé de sa capacité à refuser toute entrée non autorisée ou incorrecte et à pouvoir, éventuellement, en informer.

Nous avons précisé les critères de sûreté de fonctionnement des procédés automatisés. Dans la prochaine section, nous discutons des moyens de la sûreté de fonctionnement, c'est-à-dire des méthodes et des solutions destinées à procurer au procédé l'aptitude à délivrer un service de confiance.

### 2.2.2 Les moyens de la sûreté de fonctionnement

De façon générale, l'évolution des technologies permet une amélioration des performances des procédés automatisés mais conduit malheureusement à une augmentation de leur complexité et, donc, à une diminution de leur fiabilité. Si la complexité entraîne une diminution de la fiabilité, les possibilités de traitements numériques vont, par contre, contribuer à l'amélioration de la maintenabilité. En effet, l'implantation d'algorithmes de surveillance permet de diminuer les temps de localisation et de diagnostic, donc les temps de correction. La possibilité de détection précoce des dérives des performances du procédé permet également d'intervenir avant que de véritables dysfonctionnements n'aient pu s'installer et conduit à remplacer des opérations de maintenance subies par des opérations de maintenance programmées.

Les algorithmes de surveillance peuvent s'appuyer, non seulement sur l'information fournie par l'instrumentation résidente du procédé (capteurs proprioceptifs) qui n'est en général utilisée que pour la commande et la sécurité réflexe, mais aussi sur l'information fournie par une instrumentation externe (capteurs extéroceptifs) et accessible via des capacités de communication. La mise en place d'algorithmes de surveillance améliore aussi la crédibilité du procédé par l'amélioration de ses deux composantes : l'intégrité et la sûreté. L'intégrité suppose que toute panne interne soit signalée. Elle nécessite, d'une part, l'implantation d'algorithmes de surveillance permettant au procédé de valider son propre fonctionnement et, d'autre part, la possibilité pour le procédé de communiquer son état aux opérateurs de supervision.

La surveillance se révèle être un moyen de forte croissance de la sûreté de fonctionnement d'un procédé. Le paragraphe suivant aborde l'objectif, les fonctions, les critères de qualité et les contraintes de la conception des algorithmes de surveillance.

## 2.3 Conception d'un système de surveillance

Maîtriser la conception du système de surveillance d'un procédé automatisé nécessite d'élaborer des algorithmes de surveillance. À l'image d'un problème de commande, la conception du système de surveillance requiert la définition de quatre entités :

1. L'objectif à atteindre.
2. Les fonctions à réaliser.
3. Les critères de qualité à vérifier.

#### 4. Les contraintes de conception qui s'imposent.

Ces différentes entités sont développées dans les prochaines sections.

### 2.3.1 Objectif

Les algorithmes de surveillance constituent l'une des couches du système de surveillance d'un procédé automatisé. Un tel système repose sur une structure d'information composée de trois bases de données [Staroswiecki 94] :

1. La **base de données brute** renferme les données directement disponibles. Celles-ci sont produites par l'instrumentation du procédé.
2. La **base de données validée** reprend les données précédentes après avoir "prouvé" leur véracité, vérifié leur cohérence ou, à défaut, après les avoir remplacées par des estimations.
3. La **base de données enrichie** contient, de plus, des informations relatives aux causes des incohérences détectées au cours de la validation. Ces informations caractérisent les équipements du procédé et permettent son diagnostic.

L'objectif des algorithmes de surveillance est de transformer la base de données brute sur le procédé en une base de données validée et enrichie.

### 2.3.2 Fonctions

À partir des informations disponibles sur le procédé, les algorithmes de surveillance ont pour fonction de **détecter**, de **localiser** et de **diagnostiquer** les défaillances qui peuvent altérer la sûreté de fonctionnement et les performances du procédé. La défaillance est définie comme une modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques du procédé, ou de l'un de ses équipements, telle qu'une fonction ne puisse plus être remplie dans les conditions prévues. Si cette défaillance n'est pas signalée et corrigée l'intégrité du procédé n'est plus assurée. La défaillance se distingue de la panne dans la mesure où il n'y a pas perte de la fonction mais seulement dysfonctionnement.

La détection consiste à comparer le fonctionnement réel du procédé avec ce qu'il devrait être sous l'hypothèse du fonctionnement normal. Cela nécessite de disposer d'un modèle du fonctionnement normal. Le résultat de la procédure de détection est une alarme, signifiant que le modèle du fonctionnement normal n'est plus pertinent pour décrire le fonctionnement réel du procédé surveillé.

La localisation et le diagnostic conduisent à confronter le fonctionnement réel du procédé avec ce qu'il devrait être sous certaines hypothèses de défaillances. Ils se réfèrent à des modèles de certains fonctionnements anormaux. La localisation circonscrit la défaillance à un sous-ensemble d'équipements du procédé surveillé. Le diagnostic, pour sa part, fournit des paramètres qui caractérisent la défaillance, tels que l'amplitude et l'instant d'apparition.

Avant d'aborder la présentation de méthodes de conception d'un système de surveillance, nous présentons les critères d'évaluation de chacune de ses fonctions.

### 2.3.3 Critères de qualité

Au terme de la démarche de conception, le système de surveillance est amené à fournir des alarmes, des localisations et, parfois, des diagnostics des défaillances du procédé. Cependant, pour chacun de ces résultats, le système de surveillance n'est pas infaillible. Des critères de qualité permettent de mesurer les erreurs éventuelles.

### 2.3.3.1 Qualité de la procédure de détection

La procédure de détection se solde par la génération d'une alarme. Les problèmes susceptibles d'affecter le bon déroulement de la procédure de détection sont au nombre de trois [Nikiforov 94] :

1. La **fausse alarme**.
2. La **non détection d'alarme**.
3. Le **retard moyen de la détection**.

Plusieurs critères permettent de les déceler.

La fausse alarme est une alarme délivrée par le système de surveillance alors que le procédé réel ne présente aucune défaillance. Deux raisons principales font que les fausses alarmes doivent être évitées. La première raison est qu'une fausse alarme, non détectée comme telle par l'opérateur, induit chez ce dernier une image mentale infidèle de l'état du procédé qu'il supervise. Celle-ci peut entraîner des prises de décision inadaptées et donc risquées. La deuxième raison est qu'une fausse alarme, lorsqu'elle est détectée par l'opérateur, conduit à une perte de confiance de ce dernier dans les capacités du système de surveillance. Cette situation peut amener l'opérateur à ignorer certaines alarmes ultérieures qui, elles, pourraient être parfaitement justifiées. Les fausses alarmes sont des réponses du système de surveillance à des comportements du procédé surveillé non modélisés de façon déterministe. Un premier critère de qualité de la procédure de détection mesure la probabilité d'occurrence des fausses alarmes. Le temps moyen écoulé entre deux fausses alarmes successives permet également de traduire la qualité de la procédure de détection. Ces deux critères peuvent être considérés toutes alarmes confondues ou, au contraire, alarme par alarme, générant alors autant de critères d'évaluation qu'il y a de causes d'alarme présentes au cahier des charges du système de surveillance.

La non détection d'alarme correspond à la non délivrance d'une alarme par le système de surveillance alors que le procédé réel présente une, ou plusieurs, des défaillances inscrites au cahier des charges. La non détection d'alarme est à proscrire puisqu'elle révèle que la procédure de détection ne joue pas le rôle qui lui a été assigné. Le procédé surveillé, défaillant, n'est plus à même de remplir sa mission, sans que l'opérateur en charge de sa supervision n'en soit informé. Une telle situation peut mener à des évolutions catastrophiques. Comme pour les fausses alarmes, la non détection est un événement aléatoire. La qualité de la procédure de détection, vis-à-vis de cet événement, se mesure à l'aide de la probabilité de non détection, soit globalement, soit défaillance par défaillance. Le temps moyen entre deux non détections n'a que peu de sens ici, dans la mesure où l'événement "non détection" suppose d'abord l'occurrence de l'événement "défaillance".

Le délai de détection qui s'écoule entre l'instant d'apparition d'une défaillance et le moment où l'alarme est générée par le système de surveillance constitue un intervalle de temps pendant lequel on est en situation de non détection. La durée moyenne de cet intervalle peut être considérée comme un nombre déterministe ou aléatoire et constitue le dernier critère caractéristique de qualité de la procédure de détection.

### 2.3.3.2 Qualité de la procédure de localisation

La procédure de localisation limite la défaillance à un sous-ensemble d'équipements du procédé surveillé. Elle tente de déterminer le ou les paramètres défaillants. Dans la réalité, la procédure de localisation ne permet pas toujours de situer les paramètres défaillants de façon exhaustive. Elle se limite à la désignation d'un sous-ensemble de paramètres dans lequel certains sont probablement défaillants.

Pour chacune des défaillances, simples ou multiples, prévues au cahier des charges, la mesure de l'ensemble des paramètres suspects retourné par la procédure de localisation, en réponse à la défaillance considérée, constitue une évaluation de la qualité de la procédure de localisation. Lorsque l'ensemble des paramètres suspectés inclut l'ensemble des paramètres défaillants, cette évaluation est comparable à une mesure de l'entropie résiduelle du sous-ensemble des paramètres effectivement défaillants. Cependant, il peut arriver que certains paramètres défaillants ne figurent pas dans la liste des paramètres suspects fournie par la procédure de localisation. De la même façon, certains paramètres déclarés comme sûrement défaillants par la procédure de localisation peuvent en réalité être sains. Face à cette incertitude, l'évaluation de la qualité de la procédure de localisation doit prendre en compte, non seulement l'entropie résiduelle, mais également les erreurs éventuelles affectant son résultat. Une mesure de ces erreurs est donnée par l'ensemble des probabilités conditionnelles de fournir une localisation  $x$  sachant que l'ensemble des paramètres défaillants est  $y$ .

### 2.3.3.3 Qualité de la procédure de diagnostic

La défaillance se caractérise par la sortie d'un ou de plusieurs paramètres du procédé surveillé de leur domaine de valeurs normales. Ce débordement permet d'associer, à chaque défaillance, deux caractéristiques : la valeur réelle prise par le paramètre et l'instant d'apparition de la défaillance, c'est-à-dire le moment où la valeur du paramètre quitte son domaine normal. La procédure de diagnostic met en œuvre des algorithmes d'estimation de ces grandeurs.

### 2.3.4 Contraintes pour la conception d'un système de surveillance

La première contrainte rencontrée lors de la conception d'un système de surveillance concerne la construction de la base de données brute, c'est-à-dire la définition de l'ensemble des informations exploitées par les procédures, algorithmiques ou non, de détection, de localisation et de diagnostic. En effet, l'instrumentation disponible sur le procédé ne fournit pas toujours suffisamment d'informations pour respecter les objectifs du système de surveillance prescrits par le cahier des charges. La levée de cette contrainte passe par la conception d'une architecture d'instrumentation optimale permettant de respecter le cahier des charges [Turbatte *et al.* 94].

Une seconde contrainte pour la conception d'un système de surveillance est liée au fait que tous les critères de qualité cités précédemment ne peuvent pas être optimisés simultanément. Les critères non optimisés sont alors traités comme des contraintes par l'affectation d'un domaine de valeurs admissibles.

Enfin, d'autres contraintes apparaissent dès la phase de formulation du problème de conception du système de surveillance. Elles s'expriment, par exemple, en termes de coût de l'instrumentation mise en place pour la surveillance et de contraintes de disponibilité du procédé. Nous évoquons maintenant les différentes méthodes pour la conception d'un système de surveillance.

## 2.4 Méthodes pour la conception d'un système de surveillance

Le principe général des algorithmes de surveillance d'un procédé consiste à confronter les données de son fonctionnement réel avec la connaissance que l'on en a, pour la détection, de son fonctionnement normal ou, pour la localisation et le diagnostic, de ses fonctionnements défaillants. La forme sous laquelle est disponible cette connaissance, et donc les propriétés des outils de représentation qu'il est possible de mettre en œuvre, conditionne les méthodes utilisées pour concevoir les algorithmes de surveillance.

Le niveau de connaissance minimal est obtenu à partir d'un certain nombre d'observations pour chacun des modes de fonctionnement considérés. Les méthodes de ce niveau sont dites "**sans modèle**" du procédé. Lorsque les différents modes de fonctionnement du procédé à surveiller sont décrits par des modèles de comportement numériques ou qualitatifs, le niveau de connaissance atteint est plus complet. Les méthodes sont alors dites "**avec modèle**" du procédé.

#### 2.4.1 Méthodes sans modèle du procédé

En l'absence de modèle du comportement normal et des comportements défectueux du procédé, l'automaticien va "apprendre" à partir de l'observation des données expérimentales relatives aux différents modes de fonctionnement. La population d'apprentissage couvre plusieurs modes de fonctionnement du procédé : état nominal, état défectueux de type 1, état défectueux de type 2, etc. Elle est utilisée, dans une première phase qualifiée d'apprentissage, pour élaborer un modèle liant les valeurs des variables caractéristiques et celles des conclusions. Dans une seconde phase, le modèle est utilisé pour la surveillance. Les valeurs des variables caractéristiques du procédé, stockées dans la base de données brute au cours du fonctionnement, permettent de déduire, à partir du modèle appris, les conclusions relatives à son état, sous l'hypothèse que le procédé reste régi par les mêmes règles.

Plusieurs méthodes d'apprentissage peuvent être mises en œuvre, telles que l'analyse discriminante et l'analyse de convexité. Ces méthodes proviennent de l'ensemble des méthodes dites de la "reconnaissance des formes" [Dubuisson 90].

#### 2.4.2 Méthodes avec modèle du procédé

La comparaison des résultats fournis par la réalité (la base de données brute) avec ceux procurés par le(s) modèle(s) (la connaissance) est, dans le cas des méthodes avec modèle, plus complète, plus précise et plus immédiate.

L'existence d'un ou de plusieurs modèles permet de réaliser une surveillance du procédé par comparaison des données brutes avec celles obtenues par simulation. Dans ce cas, la surveillance s'effectue par vérification de la cohérence des données de la base de données brute avec les résultats délivrés par le(s) modèle(s) disponible(s). La connaissance explicitée par le(s) modèle(s) se situe à des niveaux très variés et conduit à des algorithmes de surveillance différents. Selon l'utilisation faite de la connaissance, trois grandes classes de méthodes avec modèle se distinguent pour la conception d'un système de surveillance : les méthodes fondées sur l'estimation des paramètres, sur l'estimation d'état et sur la génération de relations de redondance analytique. Ces méthodes s'appuient sur un modèle paramétrique  $M(p)$  de comportement du procédé à surveiller et sur une définition des paramètres  $p$  de fonctionnement normal [Walter et Pronzato 94]. Elles sont présentées dans les paragraphes suivants.

**Méthode fondée sur l'estimation des paramètres.** Les valeurs réelles des variables du procédé sont utilisées pour identifier la valeur des paramètres caractéristiques du fonctionnement réel. Ces derniers sont comparés aux paramètres  $p$  du modèle théorique. Tout écart  $e(t, p) = y(t) - y_m(t, p)$  est révélateur d'une défaillance du procédé, figure 1.2.

Cette méthode nécessite de disposer, d'une part, d'algorithmes d'identification de la valeur des paramètres caractéristiques du fonctionnement réel et, d'autre part, de techniques fondées sur la théorie de la décision pour interpréter les écarts  $e(t, p)$  entre valeurs réelles et valeurs estimées des paramètres. Elle s'appuie sur l'hypothèse d'un modèle fiable caractérisé par les bons paramètres.

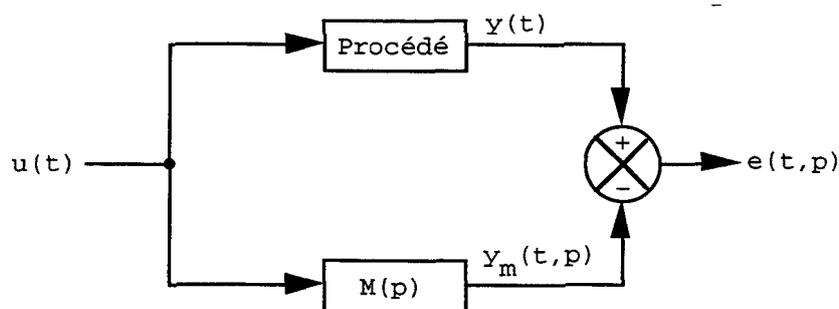


Figure 1.2 — Méthode fondée sur l'estimation des paramètres.

**Méthode fondée sur l'estimation d'état.** Les valeurs réelles mesurées sur le procédé sont utilisées pour estimer ses sorties. Ces dernières sont comparées aux sorties réelles. Tout écart est révélateur d'un dysfonctionnement du procédé. La principale méthode fondée sur l'estimation d'état, dite "méthode de l'observateur d'état", reconstitue, dans un premier temps, le vecteur d'état du procédé à l'instant  $t$  :  $x(t)$ , à partir de la connaissance de son comportement entrée-sortie à l'aide, par exemple, des observateurs de Kalman-Luenberger ou du filtre de Kalman, puis en déduit l'estimation des sorties par application de l'équation de la mesure, figure 1.3.

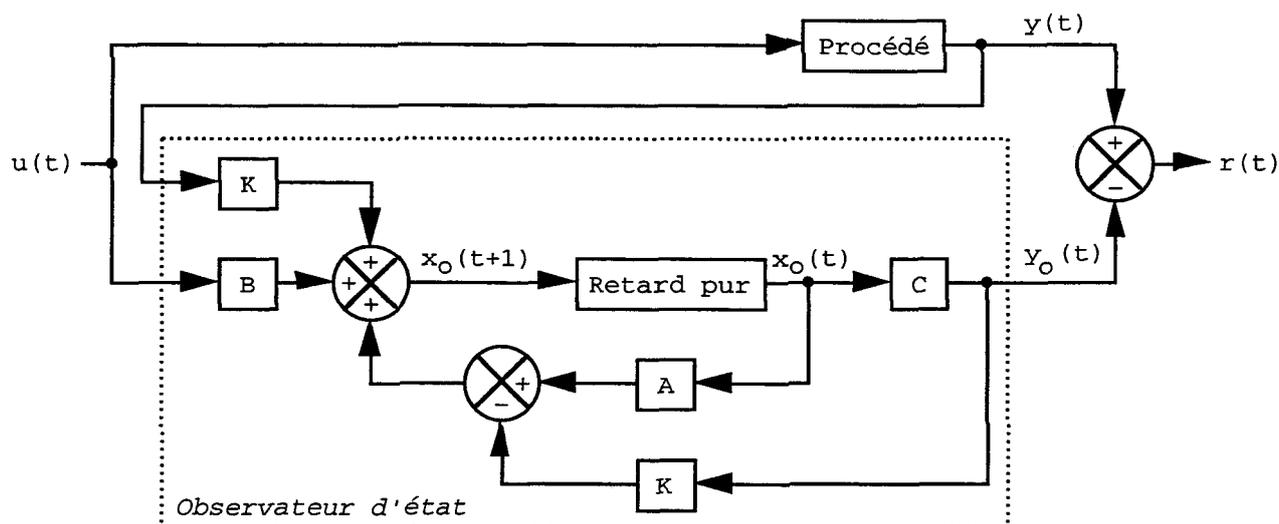


Figure 1.3 — Méthode fondée sur l'observateur d'état.

Considérons un procédé dont le fonctionnement est décrit en temps échantillonné par ses équations, respectivement, d'état et de mesure suivantes :

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Hd(t) \\ y(t) = Cx(t) + Gd(t) + \varepsilon(t) \end{cases}$$

$A$ ,  $B$  et  $C$  sont les matrices, respectivement, d'état, de commande et d'observation.  $d(t)$  désigne le vecteur des défaillances du procédé à l'instant  $t$ . Le modèle de fonctionnement normal est alors défini pour  $d(t) = 0, \forall t$ .  $H$  et  $G$  représentent les matrices décrivant les influences des défaillances sur, respectivement, l'état et la mesure. Enfin,  $\varepsilon(t)$  est un bruit de mesure traduisant les imperfections des capteurs. L'observateur d'état est un système dynamique permettant de reconstituer le vecteur d'état du procédé. Il est régi par les équations suivantes :

$$\begin{cases} x_o(t+1) = (A - KC)x_o(t) + Bu(t) + Ky(t) \\ y_o(t) = Cx_o(t) \end{cases}$$

Le choix de  $K$ , appelé "gain de l'observateur", permet de régler la dynamique de l'observateur d'état, c'est-à-dire la vitesse avec laquelle l'état de celui-ci va rallier l'état du procédé si le modèle est correct et s'il n'y a pas de bruit. L'erreur de reconstitution du vecteur d'état s'écrit :

$$\boxed{x(t+1) - x_o(t+1) = (A - KC)(x(t) - x_o(t)) + (H - KG)d(t) - K\varepsilon(t)}$$

En l'absence de défaillance ( $d(t) = 0$ ), l'erreur de reconstruction d'état tend, en moyenne, vers 0. Dans le cas contraire, les variables indicatrices de la défaillance sont données par le vecteur des résidus :

$$\boxed{r(t) = y(t) - y_o(t)}$$

C'est sur la base de leurs valeurs que la décision de détection est prise ou pas. Les techniques assises sur la théorie de la décision sont, ici aussi, utilisées pour expliquer si l'écart entre les sorties estimées et les sorties réelles est dû à des aléas "normaux" ou à de véritables défaillances du procédé.

D'autres méthodes utilisent des observateurs dédiés qui estiment directement les sorties ou, plus généralement, toute combinaison des variables d'état dont le comportement théorique en fonctionnement normal est connu.

**Méthode fondée sur la génération des relations de redondance analytique.** Les données recueillies sont injectées dans le modèle paramétrique caractérisant le fonctionnement du procédé. Une défaillance du procédé se traduit alors par le fait que le comportement du modèle n'est pas vérifié.

Un modèle de fonctionnement normal fait, en général, intervenir des grandeurs absentes de la base de données brute. La méthode de génération des relations de redondance analytique consiste alors à utiliser les relations analytiques existantes entre les mesures de grandeurs dépendantes. Elle conduit à des algorithmes de réécriture des équations d'état et de mesure du modèle, dans lesquels seules les variables connues figurent. Ces équations sont appelées Relations de Redondance Analytique (RRA) [Cassar 94]. Les RRA sont alors testables en temps réel, car elles ne font intervenir que des données disponibles dans la base de données brute. Comme précédemment, la méthode est complétée par celles issues de la théorie de la décision qui permettent de juger si l'écart de vérification du modèle est dû à des aléas "normaux" ou à des dysfonctionnements du procédé.

Les méthodes de conception d'un système de surveillance, avec ou sans modèle, conçues dans un cadre guidé par les critères de sûreté de fonctionnement du procédé et la qualité du produit ou du service final, contribuent au développement de l'automatisation des procédés. Le degré d'automatisation des procédés peut varier de la commande manuelle jusqu'à la supervision. Dans le prochain paragraphe, nous exposons les différentes structures de contrôle/commande des procédés automatisés.

## 2.5 Du système de contrôle/commande réflexe au système de supervision

La mission pour laquelle un procédé technologique a été conçu peut être totalement remplie, partiellement remplie ou non remplie. Cela dépend du mode de fonctionnement sous lequel évolue le procédé. Un procédé présente généralement cinq modes de fonctionnement [Dubuisson 90] :

1. **Modes de fonctionnement normaux.** Si ils ne sont pas nuisibles, les modes de fonctionnement normaux ne coïncident pas forcément avec la qualité de la mission accomplie. Parmi eux, le mode de fonctionnement nominal doit être, en principe, en parfaite adéquation avec la qualité de la mission.
2. **Modes de fonctionnement anormaux.** Lorsque le procédé est gouverné par l'un de ces modes, la mission peut être partiellement remplie ou non remplie. En tout état de cause, le service n'est pas satisfaisant, il peut aussi être critique.
3. **Modes de fonctionnement d'exception.** Ils sont normaux ou anormaux mais ont la caractéristique d'être peu tolérés ou peu fréquents.
4. **Modes d'indisponibilité.** Modes sous lesquels le procédé ne peut accomplir sa mission.
5. **Modes de fonctionnement évolutifs.** Ils caractérisent des modes, souvent transitoires, de passage d'un mode à un autre, quelle que soit la qualification (normal ou anormal) du mode de départ ou du mode d'arrivée.

Dans ce mémoire, nous focalisons, plus particulièrement, sur les modes de fonctionnement anormaux dont l'essentiel de la gestion demeure de la responsabilité de l'opérateur humain. Ils sont décomposés en :

- **modes interdits** dans lesquels le procédé ne doit absolument pas fonctionner pour des raisons de sécurité ;
- **modes défailants** qui correspondent à de mauvais fonctionnements du procédé. Un sous-ensemble de ces modes est constitué des modes de pannes où un sous-ensemble du procédé, voire le procédé complet, ne fonctionne plus ;
- **modes dégradés** qui correspondent, soit à l'exécution partielle de la mission, soit à l'accomplissement de celle-ci avec des performances moindres ;
- **modes critiques** dans lesquels le procédé présente des caractéristiques de fonctionnement très particulières et souvent non souhaitées.

La structure de contrôle/commande d'un procédé automatisé vise à assurer la gestion des modes de fonctionnement normaux et anormaux. Dans ce paragraphe, nous introduisons trois structures de contrôle/commande fondamentales qui se caractérisent par les niveaux décisionnels et les objectifs qu'elles mettent en œuvre.

Dans une approche globale d'un problème de contrôle/commande, les relations entre l'unité de contrôle/commande, alors unique, et le procédé, considéré comme un tout, sont représentées par une structure de contrôle/commande **centralisée** à simple niveau et à simple objectif [Titli 79]. Ce principe devient très vite difficile à mettre en œuvre lorsque le procédé et/ou la fonction de contrôle/commande deviennent complexes. Lorsque le procédé global est divisible en sous-procédés indépendants, il est possible de définir une structure de contrôle/commande **décentralisée** à simple niveau et à multi objectifs [Titli 79]. Cependant, l'hypothèse d'indépendance des sous-procédés n'est pas réaliste. Dans le cas de procédés complexes, de nombreuses variables mutuellement interdépendantes peuvent intervenir. Il est alors impératif de coordonner l'ensemble des unités de contrôle/commande locales afin d'optimiser le fonctionnement normal du procédé. Ceci est assuré par le recours à une structure de contrôle/commande **hiérarchisée** multi niveaux et multi objectifs [Titli 79].

Une structure de contrôle/commande hiérarchisée comporte à la fois des structures verticales à simple objectif et des structures horizontales à plusieurs objectifs. Pour les premières, la fonction de commande globale se décompose verticalement en différentes commandes élémentaires. Pour les secondes, le procédé est divisé en sous-procédés plus élémentaires interconnectés et commandés selon des critères locaux. Certaines unités de commande n'ont qu'un accès indirect au procédé à commander. Elles reçoivent des informations des unités supérieures et inférieures puis les traitent pour commander les

unités qui leur sont inférieures dans la hiérarchie. Les unités de commande d'un même niveau ont des objectifs différents qui peuvent parfois entrer en conflit. Des unités spécifiques du niveau supérieur, appelées "coordonnateurs", tentent de résoudre ces conflits éventuels en fixant des objectifs appropriés à chacune des unités de commande inférieures. Le système de commande est ainsi constitué d'unités de commande disposées selon une structure hiérarchique pyramidale.

La structure de contrôle/commande hiérarchisée a rendu les procédés complexes pilotables à nouveau et a libéré l'opérateur humain des tâches de bas niveau. Pratiquement, elle se traduit par la mise en place d'un **système de supervision**. La supervision d'un procédé automatisé complexe concerne un ensemble de tâches visant à traiter deux flux d'informations parallèles : un flux ascendant de surveillance des modes de fonctionnement du procédé, dont la source est l'ensemble des mesures effectuées sur le procédé, et un flux descendant de conduite du procédé lors des modes de fonctionnement anormaux.

L'infrastructure du système de supervision s'organise en un système homme-machine intégré et hiérarchisé regroupant quatre niveaux, figure 1.4 : le procédé à piloter, ses calculateurs de commandes et de régulations locales, le niveau de supervision, composé du calculateur de supervision, qui assure la coordination des unités locales et, plus généralement, la surveillance des deux niveaux inférieurs et, enfin, l'opérateur humain<sup>4</sup> chargé de surveiller le procédé et d'intervenir lors des modes de fonctionnement anormaux [Sheridan 85].

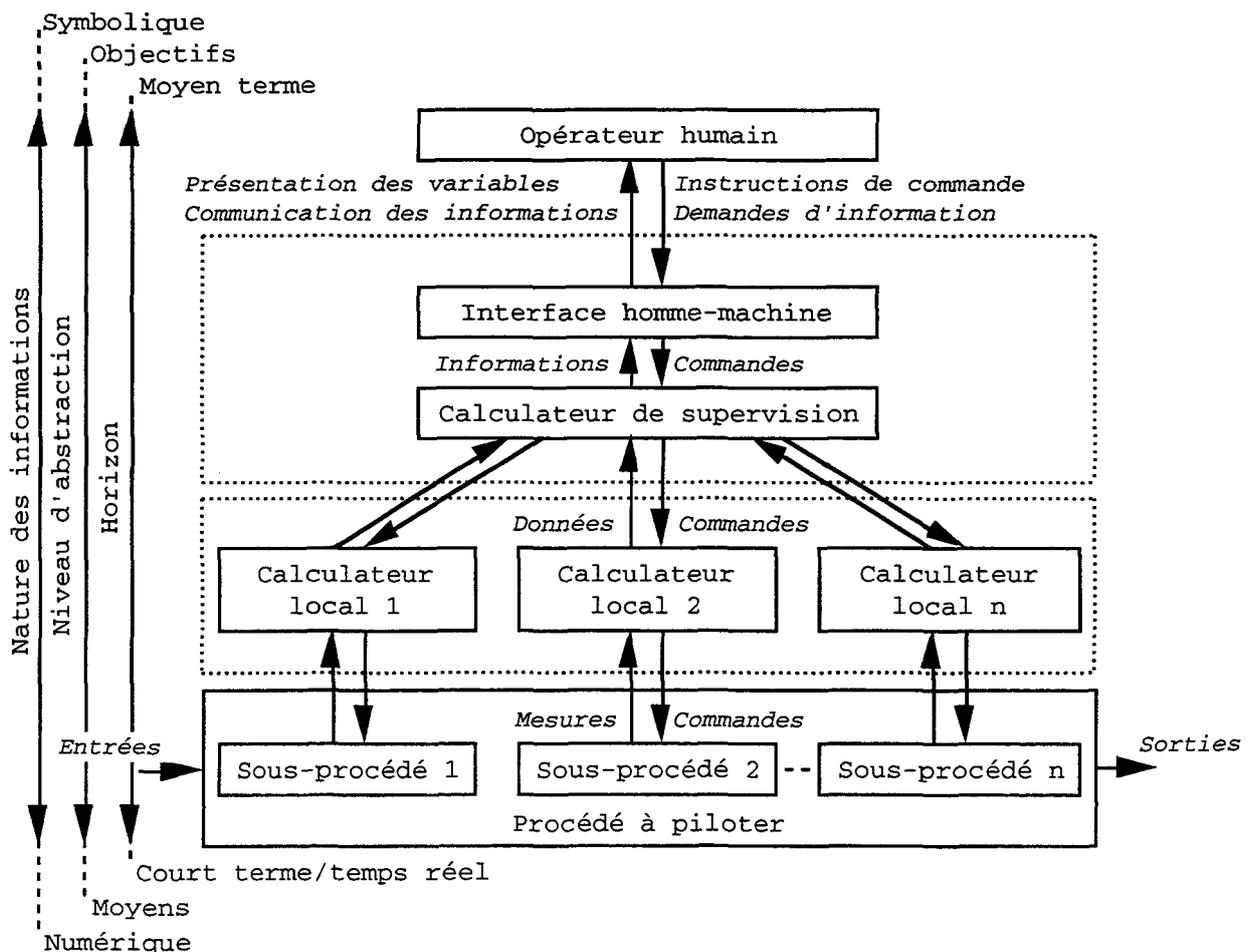


Figure 1.4 — Architecture d'un système de supervision [Sheridan 85].

<sup>4</sup> La supervision d'un procédé peut également être assurée par plusieurs opérateurs humains qui coopèrent. Un tel environnement pose à l'automaticien humain des problèmes spécifiques, tels que la régulation de l'activité collective [Vanderhaegen 93].

En règle générale, le système de commande automatique regroupe l'ensemble des moyens techniques chargés d'assurer la conduite du procédé en fonctionnement nominal. Les dispositifs de bas niveau gèrent la régulation des variables des sous-procédés en fonction des consignes transmises par le calculateur de supervision. Celui-ci coordonne et adapte les stratégies de contrôle de chaque unité de commande locale, pour optimiser le fonctionnement du procédé global. Par contre, l'opérateur humain, à travers des interfaces de communication homme-machine adéquates, s'occupe de la définition des objectifs de conduite et de la gestion des modes de fonctionnement anormaux que le système de commande automatique ne sait pas prendre en compte. Cela nécessite que l'opérateur dispose des capacités physiques et intellectuelles, du temps pour remplir sa tâche et d'une architecture de supervision capable de répondre à ses besoins informationnels et d'action sur le procédé technologique.

La supervision confirme et renforce l'indispensable présence humaine dans la boucle de contrôle/commande d'un procédé. En effet, l'ensemble des modes de fonctionnement du procédé est imprévisible et l'automatisation complète des tâches de supervision demeure difficile. En pratique, l'automatisation des fonctions de surveillance et de conduite est limitée par la difficulté de modéliser l'ensemble des modes de fonctionnement du procédé et, de ce fait, une solution optimale théorique n'est souvent qu'une approximation acceptable de la réalité. Avec les progrès de l'automatisation, l'opérateur humain voit ses tâches opératoires se transformer en tâches décisionnelles, hautement cognitives, de surveillance et de traitement des modes de fonctionnement transitoires et anormaux imprévus du procédé qui font appel à des compétences et à des responsabilités nouvelles. Cette évolution positionne l'homme au centre des nouvelles préoccupations de "l'automatiseur".

### **3 L'opérateur humain dans le système de supervision**

Le système de supervision des procédés automatisés complexes et/ou de grande taille implique deux acteurs au fonctionnement bien différent : les automatismes et l'humain, dont les décisions doivent s'harmoniser dans une coopération et/ou une coordination efficace. Les automatismes assurent la conduite du procédé en fonctionnement nominal. Ils traitent des informations numérisées et éventuellement symboliques. Compte tenu des limites actuelles de l'automatique, l'opérateur humain intervient essentiellement et explicitement lors des modes de fonctionnement anormaux que les automatismes ne peuvent prendre en compte. Il traite alors du continu, gère de l'incertain et des ordres de grandeurs. Il intègre aux traitements perceptifs et moteurs à la fois, des processus cognitifs automatisés et des raisonnements conscients à base de connaissances, avec une grande flexibilité dans les représentations mises en jeu et dans les modalités de traitement. Dès lors, les performances du procédé et la qualité du service ou du produit dépendent aussi des possibilités et des limites de l'homme dans la boucle de supervision. Il est fondamental, pour l'automaticien, de s'y intéresser. C'est l'objet de cette seconde partie.

#### **3.1 Les tâches de l'opérateur humain dans le système de supervision**

Conséquemment à l'introduction des systèmes de supervision, les activités de l'opérateur humain ont évolué vers des tâches cognitives et complexes exigeant une quantité importante de connaissances sur le procédé supervisé. Rouse [83] a regroupé les tâches de supervision en quatre catégories :

1. Les **tâches de transition** qui concernent les changements de mode de fonctionnement du procédé. L'opérateur applique, dans ces cas, des procédures préétablies et contrôle que le fonctionnement de l'installation évolue correctement vers les objectifs à atteindre.
2. Les **tâches de contrôle et de surveillance** qui consistent, d'une part, à optimiser le fonctionnement du procédé par des réglages fins et, d'autre part, à détecter, voire anticiper, l'apparition des dysfonctionnements éventuels.
3. Les **tâches de détection de dysfonctionnements et de diagnostic** qui suivent l'apparition d'une alarme ou l'observation d'une évolution anormale du fonctionnement d'une partie du procédé. À partir des informations disponibles, l'opérateur doit localiser la défaillance et en déterminer la cause.
4. Les **tâches de compensation et de reprise des dysfonctionnements** qui visent à rétablir le fonctionnement nominal du procédé après une perturbation, soit par l'exécution d'actions qui vont agir sur les commandes du procédé, soit par le dépannage de l'installation en isolant le sous-procédé défaillant et en activant un système de secours, soit, enfin, en décidant de conduire le procédé en mode dégradé.

En fait, ces tâches de résolution de problèmes sont assignées à l'opérateur humain parce que le concepteur du système de supervision est incapable de prévoir et de gérer l'intégralité des dysfonctionnements et des pannes susceptibles d'affecter le procédé. Généralement très complexes à réaliser et de forte exigence, la gestion de ces tâches modifie la charge de travail et le besoin de performance de l'opérateur. La nécessité d'intervention de l'opérateur est de plus en plus rare mais *a contrario* de plus en plus déterminante.

## 3.2 Mécanismes et capacités de raisonnement chez l'opérateur humain

Pour la réalisation des tâches d'exécution et de résolution de problèmes, l'opérateur humain n'est plus en contact direct avec le procédé. Il se forge alors, par apprentissage, une représentation mentale, c'est-à-dire un modèle plus ou moins simplifié du comportement de l'installation qu'il supervise. Ce modèle lui permet d'établir des relations fonctionnelles entre les réponses et les actions qu'il entreprend. Cependant, la représentation mentale est en partie subjective et amplifie des éléments jugés importants alors qu'elle minimise, voire déforme, des éléments jugés secondaires. Néanmoins et en fonction de l'état estimé du procédé, elle permet à l'opérateur de choisir les modes opératoires nécessaires. La complexité de la gestion du procédé est ainsi maîtrisée. Les deux prochaines sections présentent les modèles cognitif et décisionnel de l'opérateur humain confronté à une tâche de résolution de problèmes.

### 3.2.1 Modèle de l'opérateur humain face à une tâche

Le modèle de la figure 1.5 représente l'opérateur humain confronté à une tâche et explique son autorégulation, par l'adaptation des modes opératoires humains en fonction de paramètres particuliers [Milot 88]. Plusieurs mécanismes humains aident à effectuer la régulation de l'activité. Ils sont basés sur trois boucles principales relatives aux performances obtenues, à la charge de travail et à l'état de l'opérateur.

Les entrées du modèle correspondent aux exigences fonctionnelles et temporelles des tâches à réaliser. Les sorties sont les actions exécutées sur le procédé. La caractérisation de l'évolution du procédé en réaction aux actions de l'opérateur permet d'évaluer les performances obtenues.

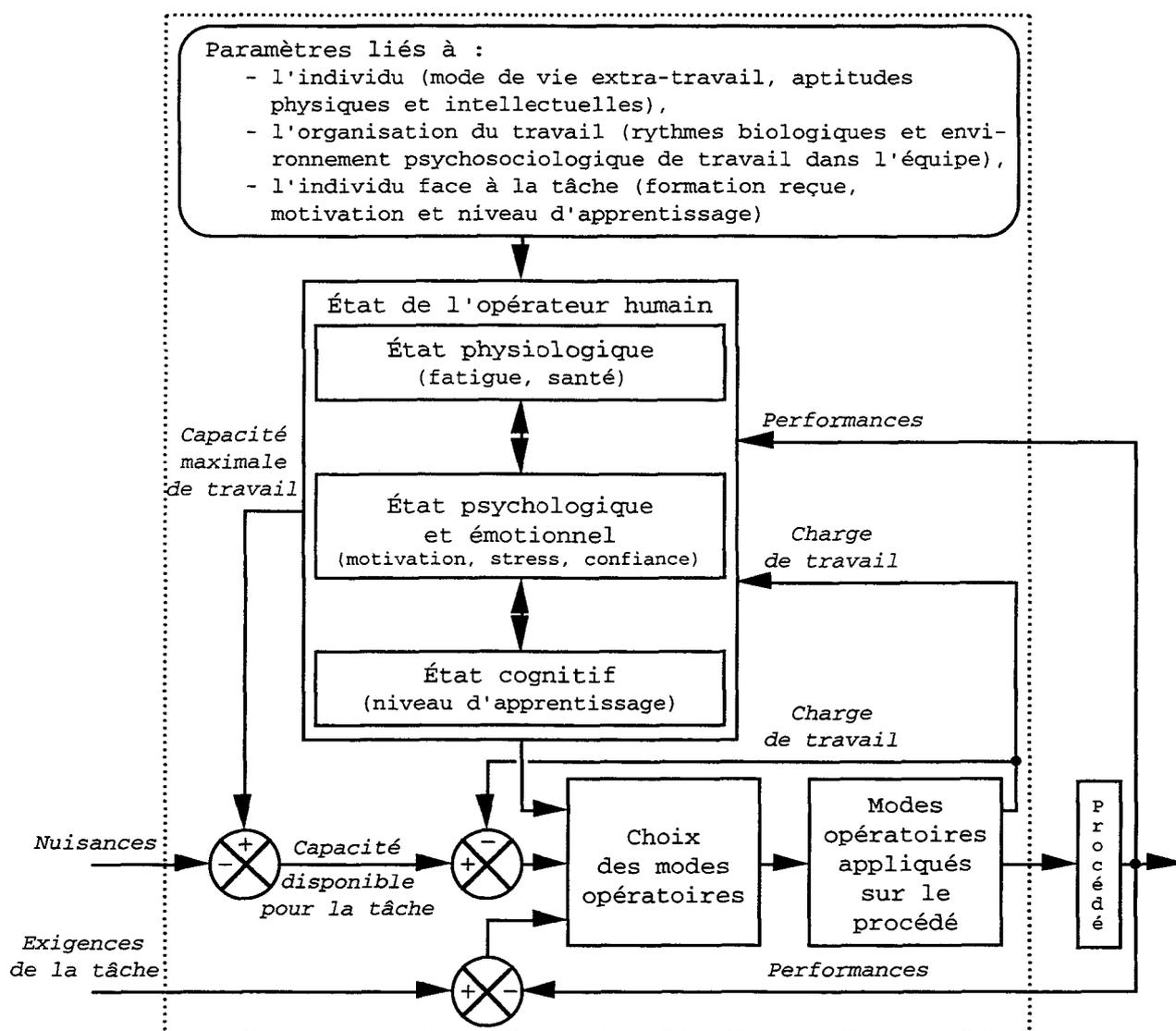


Figure 1.5 — *Modèle de l'opérateur humain face à une tâche [Millot 88].*

Dans la première boucle, l'opérateur régule ses performances, compte tenu des exigences des tâches, en choisissant les modes opératoires adéquats. Le fonctionnement dans un mode opératoire se traduit par une charge de travail, définie comme le niveau d'activité mentale, sensori-motrice et physiologique nécessaire pour accomplir une tâche.

La régulation de cette charge de travail constitue la seconde boucle. Dans cette boucle, l'opérateur choisit ses modes opératoires afin de réguler son niveau de charge de travail dans la limite de sa capacité de travail actuelle. Cette activité est menée après traitement des nuisances physiques, ou facteurs d'ambiance, non liés à la tâche et de source vibratoire, sonore, lumineuse ou encore thermique, induits par l'environnement de travail.

Enfin, la dernière boucle de régulation caractérise la capacité de travail maximale de l'opérateur qui peut évoluer selon l'état physiologique, psychologique et cognitif de la personne.

Afin de maintenir une charge de travail acceptable, l'opérateur humain adopte des stratégies "cognitivement économiques" qui entraînent une modification de la pertinence des informations. Ce comportement influence les modes opératoires et les critères de

décision associés. Lorsque l'opérateur ne peut plus compenser l'augmentation des exigences des tâches, il est alors en état de surcharge de travail. Une telle situation, si elle se prolonge, est à l'origine d'une dégradation des performances et provoque une augmentation du risque d'erreur humaine [Seppala 95].

Ces caractéristiques de l'opérateur de supervision sont connues des ergonomes et des automaticiens humains. Il est particulièrement important de les prendre en considération lors de la réalisation des systèmes homme-machine. L'accès à la connaissance des mécanismes de prise et de traitement d'informations de l'opérateur passe par une analyse cognitive des tâches prescrites et de l'activité correspondante.

### 3.2.2 Comportement décisionnel de l'opérateur humain

Le choix des modes opératoires constitue une phase délicate du comportement cognitif de l'opérateur de supervision en situation de résolution de problèmes. Le modèle générique de résolution de problèmes de Rasmussen [80], figure 1.6, reflète la dynamique du comportement décisionnel de l'opérateur de supervision et comporte quatre étages séquentiels.

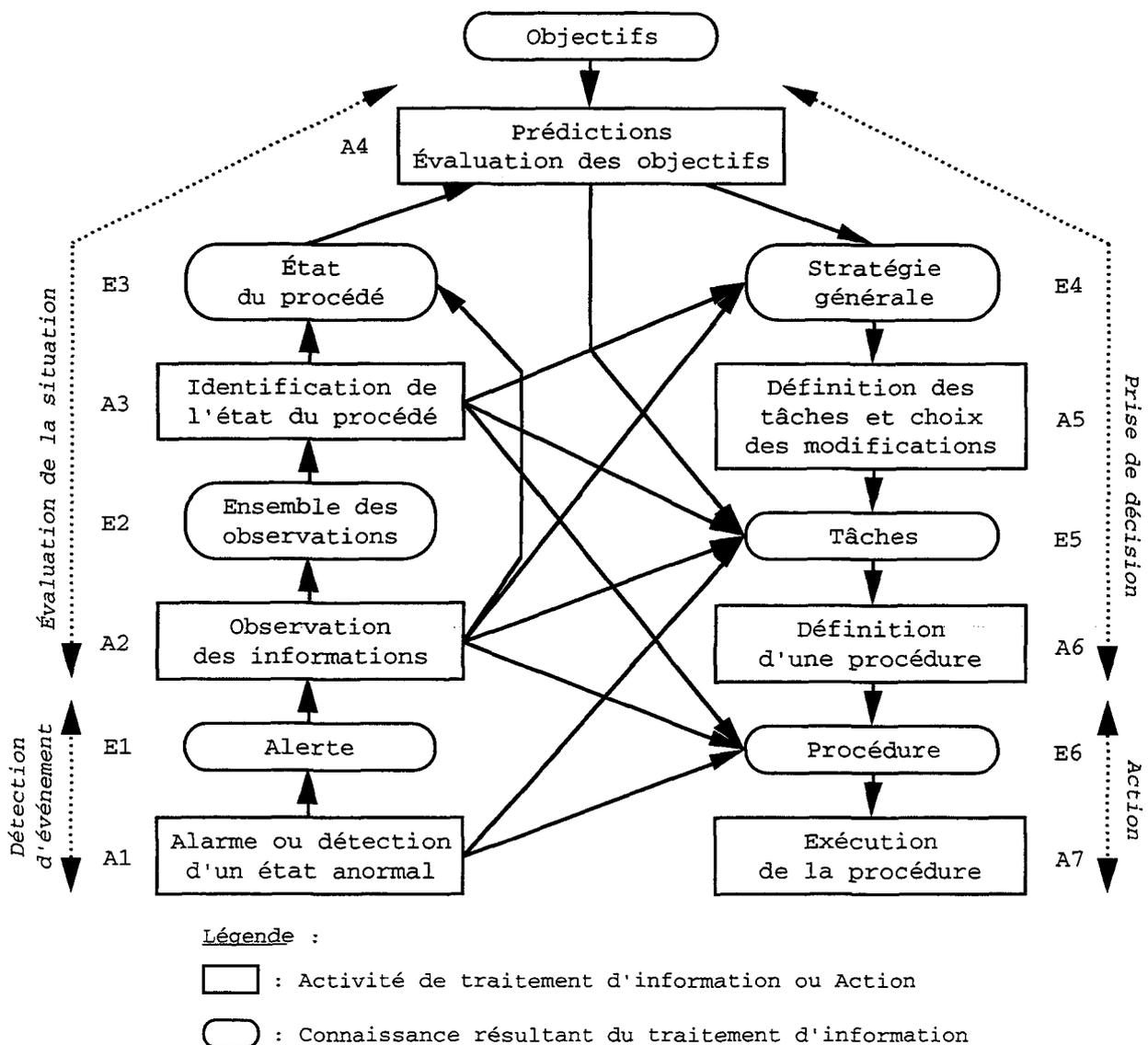


Figure 1.6 — Architecture générique de résolution de problèmes [Rasmussen 80].

Chaque étage comprend des étapes d'acquisition ou de traitement d'informations ( $A_i$ ) et des états de connaissance résultant de ces traitements ( $E_i$ ). Ces quatre étages sont les suivants :

1. Le premier étage consiste en l'acquisition de l'information et en la détection d'un événement anormal. La détection d'un événement anormal met l'opérateur en état d'alerte. Cet état peut être provoqué par une alarme ou par l'observation de l'évolution anormale d'une ou de plusieurs variables du procédé.
2. Le deuxième étage correspond au traitement de l'information afin d'évaluer la situation. L'opérateur observe l'ensemble des informations utiles de façon à identifier l'état du procédé.
3. Le troisième étage concerne la prise de décision. Compte tenu de l'état identifié à l'étape précédente et de ses objectifs de conduite, l'opérateur définit une stratégie générale de reprise du dysfonctionnement détecté. Il décompose celle-ci en tâches puis en procédures d'actions.
4. Enfin, le dernier étage est l'exécution des actions, suite au processus décisionnel mis en œuvre précédemment.

Bainbridge [84] suggère de compliquer ce modèle trop linéaire et séquentiel, en y introduisant notamment :

- des **boucles de rétroaction**, qui permettent d'identifier des erreurs dans le déroulement de l'activité elle-même mais, surtout, de rendre compte du rôle de l'action dans l'établissement du diagnostic ;
- des **anticipations** : le diagnostic nécessaire à l'intervention ne porte pas toujours sur l'état actuel du procédé en tant que tel, qui peut être admissible, mais sur des signes précurseurs d'une évolution future indésirable du procédé. Le diagnostic inclut alors nécessairement le **pronostic**.

### 3.3 Discussion

L'opérateur humain demeure irremplaçable dans la boucle de supervision et ce, de façon plus cruciale, lors des dysfonctionnements imprévisibles du procédé supervisé. Cependant, au vu des tâches d'exécution et de résolution de problèmes dévolues à l'opérateur, deux états opposés caractérisent l'activité de supervision : la surcharge et la sous-charge de travail. Ils influent, à court et à long terme, sur les capacités décisionnelles de l'opérateur de supervision.

La surcharge de travail a une conséquence quasi immédiate sur le comportement humain. Elle est génératrice de stress susceptible, selon les individus, de modifier la capacité de traitement des opérateurs. À terme, sa capacité de travail étant dépassée, l'opérateur humain peut commettre des erreurs aux conséquences économiques et sociales dramatiques. La sous-charge de travail n'a pas de conséquence immédiate sur l'activité de l'opérateur mais a des effets plus pervers dans la durée. Dans un premier temps, elle peut placer l'opérateur dans un état d'hypovigilance néfaste à la détection rapide des dysfonctionnements ou des pannes du procédé. Dans un second temps, elle démotive l'homme et réduit, par conséquent, sa capacité de traitement, son envie de réussite. Dans un troisième temps, elle empêche les opérateurs d'entretenir le modèle mental qu'ils ont du procédé.

Dans le cas des systèmes de supervision de procédés fortement automatisés, caractérisés par de très longues périodes de sous-charge de travail, il est indispensable d'intégrer à l'environnement de supervision des outils d'assistance afin de pallier les carences humaines dues à la perte d'apprentissage. Dans les moments de surcharge

intense, ces outils d'aide doivent permettre à l'opérateur d'adopter artificiellement un comportement, fondé sur des règles, qu'il aurait oubliées. Il s'agit essentiellement d'une aide au diagnostic pour l'évaluation de la situation anormale et l'identification de sa cause, et/ou d'une aide à la prise de décision pour la planification des actions palliatives et correctives qui s'imposent.

Dans les systèmes de contrôle/commande peu ou pas automatisés, caractérisés par des variations importantes et irrégulières de la charge de travail, les outils d'aide à la décision et/ou à l'action sont introduits pour réguler cette charge de travail.

En complément aux états typiques de l'activité de supervision, deux arguments plaident en faveur de l'introduction d'une assistance efficace à l'opérateur dans l'environnement de supervision. Le premier est une réponse, en terme de compétitivité, à l'accroissement de la complexité structuro-fonctionnelle des procédés. Le second relève du souci d'offrir à l'opérateur de nouveaux outils d'analyse de la situation anormale. De tels outils sont d'autant plus pertinents qu'en final l'opérateur humain reste seul face au diagnostic et à la prise de décision et qu'il est généralement l'unique responsable de la récupération des dysfonctionnements ou des pannes du procédé.

La réalisation d'un système d'assistance et son intégration dans l'environnement humain et technique de supervision doivent être entreprises dans le respect des particularités et des besoins de l'opérateur humain. La définition de ces besoins est complexe et dépend, en premier lieu, des caractéristiques et des difficultés du travail de l'opérateur. Dans ces conditions, la réalisation et l'intégration d'une assistance efficace à l'opérateur ne peut s'envisager sans un cadre méthodologique strict [Caulier et Houriez 94a, 94b]. Avant d'exposer les aspects méthodologiques sur lesquels se fonde notre travail, nous présentons, en dernière partie de ce chapitre, les caractéristiques essentielles des systèmes d'assistance à la supervision.

## **4 L'assistance à l'opérateur humain de supervision**

Dans le but d'améliorer la fiabilité humaine et, par conséquent, d'accroître la sûreté de fonctionnement et les performances du procédé, le système de supervision est souvent couplé avec un, ou des, systèmes d'assistance à l'opérateur. De façon générale, l'objectif est de réaliser la symbiose entre les quatre composants de l'environnement socio-technique de supervision, que sont : le procédé, le système de commande automatique et de supervision, le système d'assistance et l'opérateur humain, figure 1.7. Dans cet environnement, le système d'assistance doit posséder plusieurs qualités, dont les principales sont :

- être capable de guider avec fiabilité l'opérateur humain vers les problèmes à résoudre, en synthétisant les informations pertinentes ;
- aider l'opérateur dans les situations anormales, en lui fournissant des explications sur l'état de fonctionnement du procédé, et en lui planifiant des procédures d'action ;
- favoriser la capacité de prévision de l'opérateur en mettant à sa disposition des affichages prédictifs, même si la prédiction n'est pas parfaite ;
- prendre en compte l'évolution des variables du procédé ;
- garantir un temps de réponse compatible avec la constante de temps du procédé ;
- être accepté par l'opérateur et, en ce sens, ne pas contribuer à l'alourdissement de sa charge, physique et mentale, de travail.

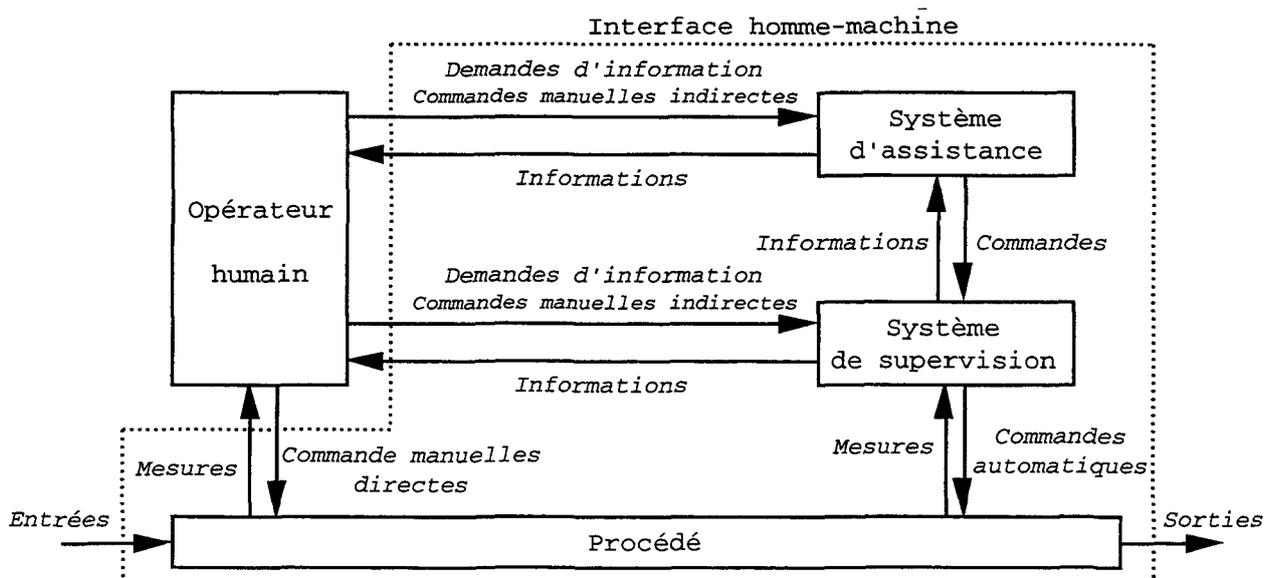


Figure 1.7 — *Intégration d'un système d'assistance à l'environnement de supervision [Johannsen 91].*

Cette dernière partie du chapitre expose une classification des systèmes d'assistance qui permet de situer le contexte dans lequel une coopération homme-machine relative aux fonctions des deux décideurs, l'opérateur humain et le système d'aide, est mise en œuvre. En final, les différents modes de coopération sont détaillés.

#### 4.1 Classification des systèmes d'assistance

Les fonctions des systèmes d'assistance, intégrés à un environnement de supervision, sont de différentes natures. Elles dépendent du statut du système (émetteur ou récepteur) vis-à-vis de l'information échangée entre l'opérateur humain et le procédé. Finin et Klein [87] proposent une classification en quatre niveaux des systèmes d'assistance, tableau 1.1 : les consultants, les contrôleurs, les servants et les agents.

Les **consultants** sont des systèmes d'assistance indépendants, non connectés au procédé. Les données sur l'état du procédé sont transmises par l'opérateur humain au système, lequel lui retourne en réponse son diagnostic et/ou ses conseils d'action. L'utilisation de cette classe de systèmes s'avère souvent contraignante lorsque le nombre de données nécessaires au traitement est important, ou si les décisions doivent être prises rapidement.

Les **contrôleurs** sont des systèmes d'assistance dont les entrées sont directement connectées aux capteurs du procédé. Ils sont donc particulièrement intéressants pour une aide à la décision dans la mesure où ils sont capables, à partir des données disponibles, d'analyser la situation courante et, donc, de décharger l'opérateur humain de cette tâche d'évaluation, tout en lui laissant la responsabilité de la décision finale.

Les **servants** sont des systèmes d'assistance semi-autonomes agissant directement sur le procédé en fonction des informations communiquées par l'opérateur humain et sans intervention de celui-ci. Dans ce mode de connexion, c'est l'opérateur qui assiste le calculateur dans la prise de décision et ceci constitue un frein ergonomique dans leur mise en œuvre.

Les **agents** sont des systèmes d'assistance autonomes, connectés au procédé, capables de décharger l'opérateur humain d'une partie des tâches de supervision en

prenant des décisions et en appliquant les actions correspondantes directement sur le procédé. Il est alors indispensable que ces systèmes soient fiables et robustes, surtout lorsque les tâches en question sont complexes.

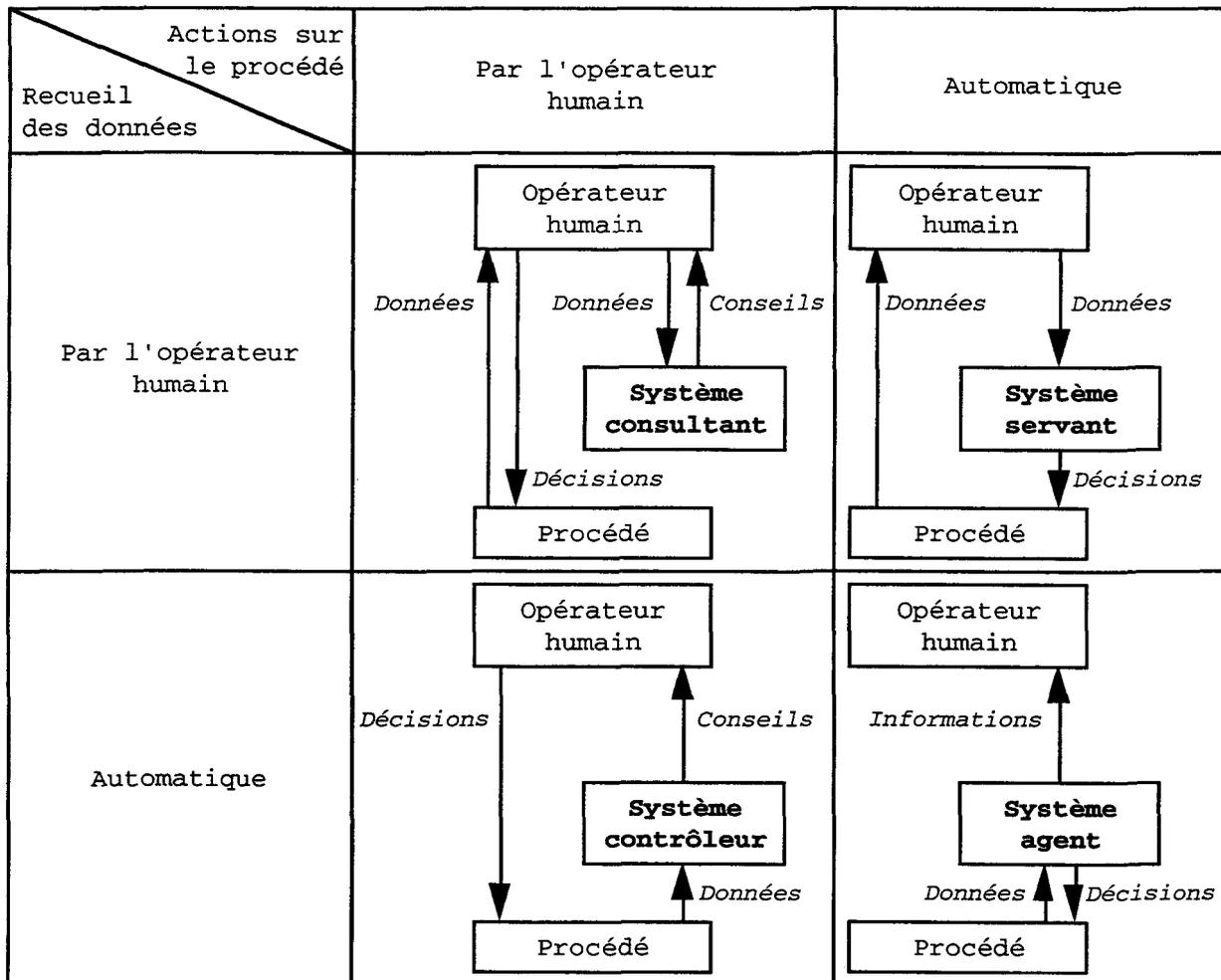


Tableau 1.1 — Classification des systèmes d'assistance selon les modalités de leur intégration à l'environnement de supervision [Finin et Klein 87].

À partir de ces caractéristiques fonctionnelles et structurales, les modes de coopération homme-machine pouvant être pris en compte doivent permettre un travail complémentaire et coopératif entre l'environnement humain et l'environnement technique. En dehors des systèmes de type servent, qui n'offrent que peu d'intérêt car ils asservissent l'opérateur humain à la machine, chacun des systèmes d'assistance s'insère dans des modes de coopération différents. La coopération homme-machine dite horizontale nécessite des systèmes de type agent, alors que la coopération dite verticale requiert des systèmes de type consultant ou contrôleur. Ces modes d'intégration homme-machine sont à présent décrits.

## 4.2 Intégration des systèmes d'assistance : la coopération homme-machine

L'implantation d'un système d'assistance dans une salle de supervision nécessite une réorganisation des tâches de l'opérateur humain, afin d'obtenir une coopération homme-système d'assistance efficace pour le traitement des perturbations du procédé. Selon la classe du système d'assistance, Millot [88] suggère deux modes de coopération homme-système d'assistance : la coopération dite "**horizontale**" et la coopération dite

“**verticale**”. Chacun de ces modes de coopération répond aux caractéristiques suivantes :

- l'opérateur humain est confronté à des événements asynchrones ;
- les tâches à la charge de l'opérateur sont hautement cognitives ;
- le fonctionnement du procédé est anormal.

#### 4.2.1 Coopération horizontale

La coopération homme-machine horizontale consiste à répartir dynamiquement l'ensemble des tâches à réaliser entre deux décideurs : l'opérateur humain et un système d'assistance de la classe agent, figure 1.8. Ce partage doit, d'une part, optimiser les performances globales du procédé et, d'autre part, maintenir actif l'opérateur humain dans la boucle principale de supervision en lui évitant une sous-charge ou une surcharge de travail.

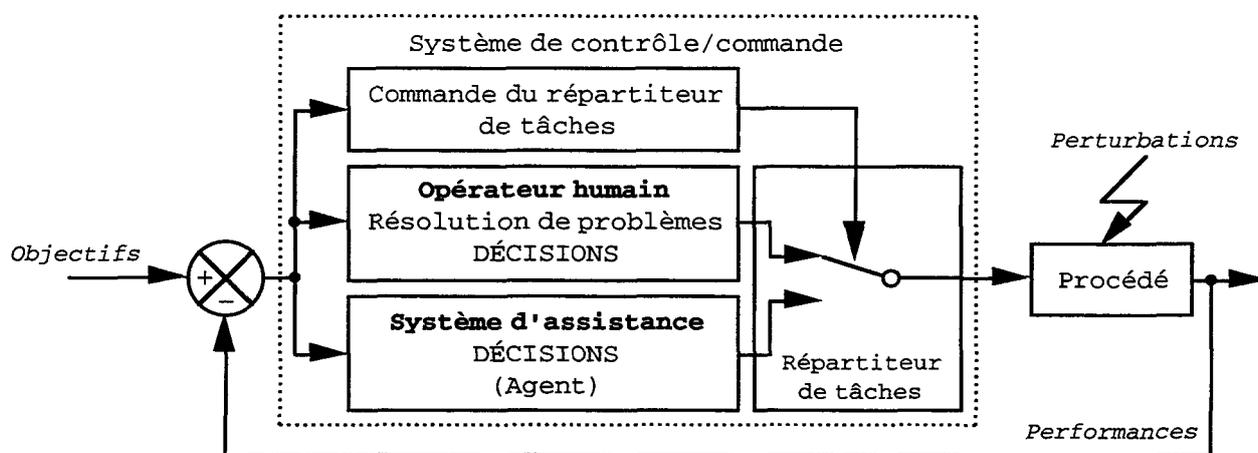


Figure 1.8 — Principe de la coopération homme-machine horizontale [Milot 88].

Ce mode de coopération est particulièrement bien adapté aux situations où l'activité de l'opérateur varie fortement et brusquement au cours du temps. Lorsque la charge de travail est faible, l'ensemble des tâches est affecté à l'homme. Dans le cas contraire, lorsque l'opérateur n'est plus capable de répondre aux exigences des tâches et, donc, que sa charge est trop forte, une partie du travail est attribuée au système d'assistance.

L'implémentation d'une répartition dynamique de tâches peut être définie selon deux principes [Rieger et Greenstein 82] :

1. Dans la **répartition dynamique explicite**, le répartiteur de tâches est commandé par l'opérateur humain lui-même à partir d'une interface de dialogue spécifique. Celui-ci effectue le partage des tâches sur la base de sa propre estimation de la charge de travail. Si l'implémentation de cette forme de coopération est relativement aisée, elle présente l'inconvénient majeur d'introduire une charge de travail supplémentaire pour l'opérateur qui, en plus de ses tâches de résolution de problèmes, doit assurer la gestion de la répartition des tâches. C'est pourquoi, Greenstein et Lam [85] proposent d'optimiser les aspects ergonomiques de l'interface de dialogue de manière à minimiser cette charge.
2. Dans la **répartition dynamique implicite**, le répartiteur de tâches est géré automatiquement à partir d'un algorithme de partage. La principale difficulté est la définition d'un critère de répartition efficace fondé, par exemple, sur la performance globale du système d'assistance et/ou sur la charge de travail de

l'opérateur humain. Cette forme de répartition a l'avantage de décharger l'opérateur de la tâche de gestion de la répartition.

Certaines limites apparaissent dans les situations difficiles à réguler. C'est le cas lorsque beaucoup de tâches partageables sont affectées à l'homme et que des tâches non partageables se présentent ensuite. L'opérateur ne peut plus assumer ces dernières. Une façon de dépasser ces limites consiste à introduire une prédiction sur les tâches. Cette prédiction sera utilisée pour évaluer la surcharge à venir et en déduire une répartition adéquate. Le problème consiste alors à déterminer si l'ordonnancement des tâches est admissible pour l'homme au regard de la charge de travail qu'il induit [Crévits 96].

#### 4.2.2 Coopération verticale

Dans la coopération homme-machine verticale, l'opérateur humain a la responsabilité de toutes les variables du procédé et est assisté par un système d'aide à la décision, figure 1.9. Le système fournit une aide lors du raisonnement de l'opérateur tout en lui laissant la responsabilité du choix des actions à exécuter.

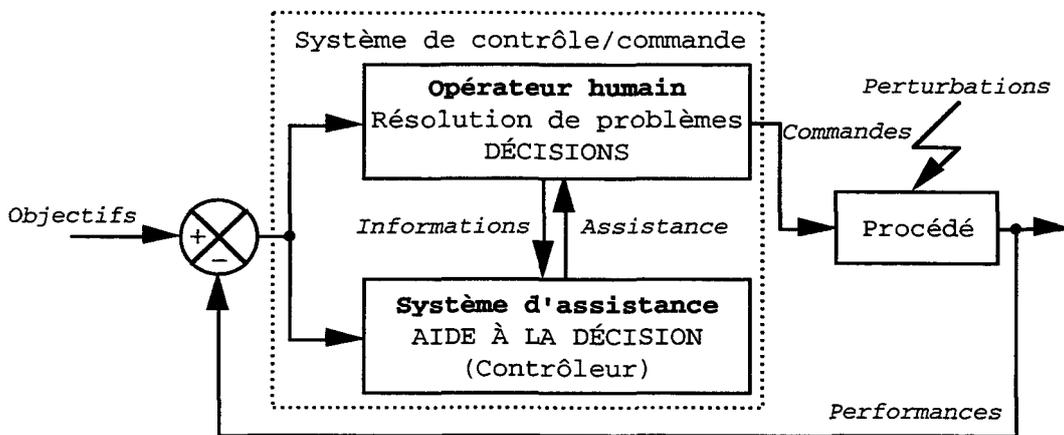


Figure 1.9 — Principe de la coopération homme-machine verticale [Milot 88].

Deux cas de figure se prêtent à ce mode de coopération :

1. Le premier cas concerne les procédés fortement automatisés ne nécessitant pas de décision rapide et pour lesquels la charge de travail de l'opérateur est le plus souvent très faible, voire nulle. Lorsqu'un dysfonctionnement, ou un dérèglement, du procédé apparaît, le système d'assistance guide l'opérateur dans sa démarche de résolution de problèmes en lui procurant les éléments fiables, nécessaires à son raisonnement. Cette approche lui permet de conforter ses décisions et d'entretenir un bon modèle mental du procédé. Cependant, le système d'assistance doit être adaptatif de façon à, d'une part, assurer une cohérence parfaite entre son raisonnement et celui de l'opérateur humain et, d'autre part, ne pas constituer en soi une charge de travail supplémentaire excessive pour l'opérateur. C'est pourquoi, il doit être **interactif**, ou **conversationnel**, afin de renseigner l'opérateur quand celui-ci le désire.
2. Le second cas prend en compte les situations d'urgence où l'opérateur humain risque de perdre ses capacités de raisonnement, suite au stress, par exemple. Le système d'assistance est alors **directif** et doit proposer immédiatement une solution au problème à l'opérateur. Pour contribuer à la résolution des conflits qui peuvent survenir entre l'opérateur et le système d'assistance, ce dernier doit être aussi **explicatif**. De cette façon, il peut justifier son raisonnement et ses décisions et permettre à l'opérateur de trouver, le plus rapidement possible, un

consensus. À la différence de la coopération horizontale, la coopération verticale n'est pas efficace si l'opérateur humain est soumis à des contraintes temporelles trop élevées. En effet, dans ce cas précis, ce dernier n'aura pas le temps d'analyser les conflits décisionnels entre le système d'assistance et lui-même. Il choisira alors, soit ses propres solutions indépendamment de celles proposées par le système d'aide, qui devient inutile, soit celles du système indépendamment de son propre diagnostic en favorisant ainsi la perte d'expérience.

Le choix entre les modes de coopération horizontale et verticale dépend principalement de la possibilité d'automatiser complètement ou non les tâches à accomplir. Dans le cas où ces tâches sont complètement automatisables et si il est nécessaire de préserver l'apprentissage de l'opérateur, une coopération horizontale peut être envisagée. Néanmoins, cette coopération n'est utile que si la charge de travail de l'opérateur varie fortement au cours du temps. En effet, si cette charge est toujours très élevée il vaut mieux décharger l'opérateur en automatisant une partie de ces tâches. Le choix d'un mode de coopération est plus délicat lorsque les tâches ne sont que partiellement automatisables. En général, les tâches concernées sont des tâches de résolution de problèmes, donc complexes, et leur automatisation est, soit "incomplète" c'est-à-dire qu'une seule partie des étapes nécessaires à leur réalisation est automatisable, soit "dégradée" c'est-à-dire que l'outil d'aide n'est pas toujours capable de la traiter.

## 5 Conclusion

Ce premier chapitre a introduit les principaux concepts du contexte général du travail rapporté dans ce mémoire : la supervision des procédés automatisés complexes. Après avoir décrit les deux classes de procédés automatisés et les critères de leur sûreté de fonctionnement, la première partie du chapitre a développé les méthodes de conception des algorithmes de surveillance des procédés et les structures de contrôle/commande chargées de les héberger. Ces structures autorisent la conduite des procédés automatisés complexes et/ou de grande taille et soulagent les opérateurs humains de leurs tâches opératoires. Elles débouchent aujourd'hui sur des systèmes hiérarchisés de supervision au sommet desquels se retrouve l'opérateur. De fait, l'automatisation des tâches de supervision se heurte à deux difficultés majeures :

1. Les commandes sont calculées grâce à un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sur le fonctionnement du procédé. Elles ont donc une limite de validité à surveiller.
2. Il est impossible, par nature, de prévoir et d'éliminer la totalité des perturbations et des pannes susceptibles d'altérer le fonctionnement nominal du procédé.

L'opérateur humain trouve dans ces limites la pleine et entière justification du maintien de sa présence au plus haut niveau de l'architecture de contrôle/commande de tels procédés. En conséquence, les tâches et les caractéristiques de l'opérateur de supervision ont été abordées dans la seconde partie. Avec l'implantation des infrastructures de supervision, l'opérateur voit ses tâches de bas niveau se modifier en tâches de résolution de problèmes à dominante cognitive. Ses interventions, circonscrites aux modes de fonctionnement anormaux du procédé, sont de plus en plus espacées mais ô combien cruciales pour le maintien des performances et de la sûreté de fonctionnement du procédé. Il apparaît que les tâches décisionnelles complexes de surveillance, de diagnostic et de prise de décision induisent une charge de travail qui, si elle est trop importante, peut engendrer un dépassement des capacités de traitement de

---

l'opérateur. Cette éventualité de défaillance humaine doit être pleinement intégrée à la politique de supervision et rend indispensable l'introduction de systèmes d'assistance à l'opérateur dans les environnements de supervision.

La dernière partie a montré le rôle et la place du système d'assistance dans l'environnement de travail. Une classification des systèmes d'assistance, selon les modalités de leurs relations avec l'opérateur humain et le procédé, a d'abord été présentée. Ensuite, les deux modes de coopération homme-machine horizontale et verticale, introduits par l'intégration d'un système d'assistance à l'environnement de supervision, ont été définis. Les modalités d'application de chacun de ces modes ont également été exposées. En conclusion, pour être efficace et donc accepté, le système d'assistance se doit, d'une part, d'intégrer les capacités et les limites cognitives de son futur utilisateur, et, d'autre part, de répondre, de façon fiable et justifiée, aux attentes de ce dernier. Pour atteindre ces objectifs, le développement d'un système d'assistance relève d'une méthodologie interdisciplinaire résolument centrée sur l'homme [Caulier et Houriez 94b]. C'est une telle démarche que propose ce mémoire.

En rapport avec les activités de résolution de problèmes, désormais assurées par l'opérateur de supervision, le prochain chapitre dresse un état de l'art des stratégies de résolution de problèmes identifiées en psychologie cognitive et décrit les modèles de représentation des connaissances et de raisonnement disponibles en intelligence artificielle pour la réalisation des systèmes d'assistance.

---

## Chapitre 2

# La résolution de problèmes : apports de la psychologie cognitive et de l'intelligence artificielle

### 1 Introduction

Le premier chapitre a justifié l'indispensable présence humaine dans la boucle de supervision des procédés automatisés complexes. À ce titre, l'opérateur se voit confier les tâches, fortement cognitives, de résolution de problèmes correspondant généralement à des situations de fonctionnement anormal du procédé. Face à cette évolution, nous focalisons, dans ce chapitre, sur les points de vue de la psychologie cognitive et de l'Intelligence Artificielle (IA) sur la résolution de problèmes. Ce choix est motivé par trois raisons essentielles. En premier lieu, l'IA construit les formalisations certainement les plus proches des modèles de la psychologie cognitive, ne serait-ce que parce qu'elle s'en inspire parfois. En second lieu, la majeure partie des systèmes conçus en IA sont appelés à interagir directement avec l'homme. Enfin, nous souhaitons transcender les apports de la psychologie cognitive et de l'IA à la résolution de problèmes dans une approche interdisciplinaire centrée sur l'homme. Une telle approche recherche une meilleure articulation entre, d'une part, la caractérisation de l'activité de l'opérateur humain et, d'autre part, le développement d'une aide cognitive à la résolution de problèmes. À cette fin, une méthodologie de développement de systèmes d'assistance efficaces doit, d'abord, s'intéresser aux caractéristiques de l'activité de résolution de problèmes du futur utilisateur. Ce chapitre est structuré en deux parties.

La première partie s'intéresse au point de vue de la psychologie cognitive sur la résolution de problèmes. Tout d'abord, la définition des concepts de tâche et d'activité permet de préciser la notion de résolution de problèmes. Nous analysons, ensuite, les deux composantes principales d'une stratégie de résolution de problèmes : la

compréhension du problème et l'élaboration d'une solution. Cette introduction nous permet d'aborder les caractéristiques des activités de résolution de problèmes développées par l'opérateur de supervision. Nous nous intéressons alors, plus particulièrement, à la réutilisation des connaissances épisodiques qui, au-delà de son intérêt scientifique général, constitue la méthode de résolution de problèmes valorisée par ce travail.

Avec la technologie des systèmes à base de connaissances, l'IA offre de réelles capacités à résoudre les problèmes auxquels l'opérateur de supervision est confronté : le diagnostic des dysfonctionnements du procédé et la planification des procédures d'action. La conception de tels systèmes d'assistance pose le problème de "l'opérationnalisation" des connaissances, c'est-à-dire de la définition, d'une part, du formalisme de représentation des connaissances du domaine et, d'autre part, du modèle de raisonnement destiné à exploiter ces connaissances. Ces deux difficultés sont intimement liées. En effet, l'information utile à l'opérateur suppose l'utilisation à bon escient des connaissances disponibles au sein du système d'assistance. La deuxième partie de ce chapitre présente successivement les formalismes de représentation des connaissances du domaine et quelques modèles de raisonnement développés en IA pour tenter d'implémenter efficacement les méthodes de résolution de problèmes identifiées en psychologie cognitive.

Nous présentons, en première partie de ce chapitre, le point de vue de la psychologie cognitive sur la résolution de problèmes.

## **2 La résolution de problèmes vue par la psychologie cognitive**

La résolution de problèmes désigne une activité au cours de laquelle l'opérateur élabore une solution à un problème pour lequel il n'existe pas de procédure exécutable préétablie. Dans ce type d'activité, la rigueur du raisonnement n'est pas le critère principal, comme pour le raisonnement logique. L'essentiel est de produire des hypothèses de solution dont la mise en œuvre permet d'atteindre le but ou, tout au moins, de s'en rapprocher. Une activité de résolution de problèmes enchaîne un certain nombre de pas qui mettent en jeu des opérations mentales de compréhension du problème et des stratégies de planification des procédures d'action. En préalable à la description de ces composantes de l'activité de résolution de problèmes, nous définissons les concepts généraux de tâche et d'activité.

### **2.1 Concepts de tâche et d'activité**

Les concepts de tâche et d'activité permettent de préciser ce qu'est une stratégie de résolution de problèmes et d'en situer les composantes dans l'architecture du système cognitif.

#### **2.1.1 Concept de tâche**

L'acception la plus courante du terme de tâche véhicule l'idée de prescription. La tâche définit le but et les conditions d'obtention assignés à l'opérateur pour organiser le déroulement de son activité. Elle intègre, plus ou moins explicitement, la définition de modes opératoires, d'instructions et de consignes de sécurité. Elle précise les caractéristiques du procédé, du produit ou du service à rendre et l'ensemble des éléments à prendre en compte pour atteindre le but fixé. Ce but peut être plus ou moins bien

défini. Par exemple, et de façon caractéristique, une tâche de conception comporte un but mal défini. Lorsque le but est lointain, il est décomposé en sous-buts afin d'assurer une meilleure régulation dans la réalisation de la tâche. Selon le contexte, les conditions d'obtention peuvent être considérées comme des contraintes et/ou constituer en soi des aides [Hoc 87].

Une telle description du concept de tâche s'avère toutefois insuffisante, voire inadaptée, si l'on s'en réfère à l'analyse de l'activité qui lui correspond. Il convient donc de préciser les deux statuts accordés à la description d'une tâche. Le concept de tâche renvoie, ou bien à ce qu'un opérateur est censé faire : sa tâche **prescrite**, telle qu'elle lui a été spécifiée, ou bien à la tâche qu'un opérateur se donne à lui-même et qu'il réalise effectivement : sa tâche **effective**. Il est rare que les deux coïncident.

Enfin, à une tâche est attachée une procédure d'action, c'est-à-dire un système d'action organisé par une structure de contrôle. À l'image de la tâche, la procédure d'action est exécutable. Son exécution a pour objectif de faire évoluer une situation de résolution de problèmes d'un état initial à un état final ou but. Trois types d'action interviennent dans une procédure :

1. Des actions de **transformation** destinées à faire progresser la situation d'un état vers un autre.
2. Des actions d'**identification** de propriétés d'états cherchant à rapprocher un état particulier de la situation à une classe pertinente pour sa résolution.
3. Des actions de **sélection** de traitements permettant, à tout moment, de déterminer le traitement suivant à exécuter.

L'importance prise par chacun de ces types d'action varie d'une procédure à une autre. Par exemple, les procédures de diagnostic font un très large appel aux actions d'identification.

### 2.1.2 Concept d'activité

L'activité cognitive est considérée comme l'actualisation d'une interaction entre l'opérateur humain et sa tâche. Elle renvoie à la façon dont l'opérateur effectue sa tâche effective, c'est-à-dire [Visser 90] :

- aux connaissances et autres sources d'information auxquelles l'opérateur fait appel et à la façon dont celles-ci sont utilisées ;
- à l'exploitation des systèmes d'assistance et autres outils ;
- aux productions, finales et intermédiaires, de l'activité.

En conséquence, toute activité comporte, d'une part, un ensemble de mécanismes observables qui sont les traces de l'activité manifeste de l'opérateur et, d'autre part, des mécanismes inobservables qui correspondent à la régulation de cette activité. Ce sont essentiellement les activités mentales<sup>5</sup>, caractérisées par les mécanismes inobservables, qui nous préoccupent ici. Étant inobservables, les mécanismes doivent être inférés à partir des mécanismes observables. Parmi les différentes méthodes utilisées en psychologie cognitive<sup>6</sup>, les verbalisations provoquées conviennent le mieux à l'analyse d'une activité complexe de résolution de problèmes, telle que celle de la supervision d'un procédé. Pour recueillir les mécanismes observables, la méthode appropriée consiste à observer l'opérateur en situation même si une première approche

<sup>5</sup> "Les activités mentales sont une partie des activités cognitives. Elles se situent au-delà du traitement des informations sensorielles, d'origine environnementale ou langagière, et précèdent la programmation motrice, l'exécution et le contrôle des mouvements, qui sont la réalisation comportementale des actions" [Richard 90]. Si nous adoptons cette distinction que fait Richard entre les activités mentales et les activités cognitives, ce sont plutôt les activités mentales qui nous intéressent ici, en particulier les activités de résolution de problèmes.

<sup>6</sup> Nous reviendrons plus longuement sur les méthodes d'analyse de l'activité utilisées en psychologie cognitive dans les chapitres 4 et 5.

peut être pratiquée par des entretiens hors situation lors desquels les questions posées amènent l'opérateur à se mettre mentalement en situation.

Selon qu'une situation constitue ou non un problème pour l'opérateur, son activité peut être classée dans l'une ou l'autre des deux situations typiques suivantes, figure 2.1 : les activités d'**élaboration** de plans procéduraux ou les activités d'**exécution** de procédures d'action.

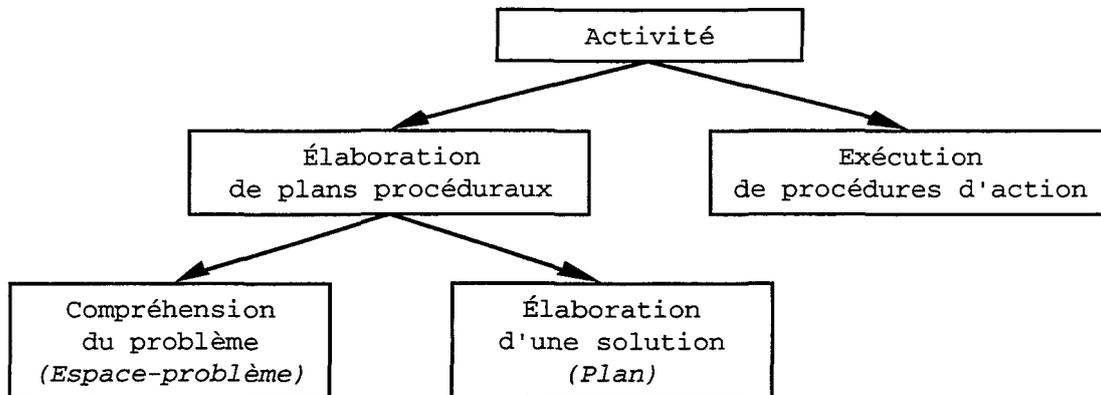


Figure 2.1 — *Typologie de l'activité.*

La hiérarchie des niveaux de régulation de l'activité humaine proposée par Rasmussen [83] pour l'étude de situations de supervision de procédés permet de situer les deux situations typiques. Selon leur niveau de régulation, Rasmussen distingue trois types de comportements : ceux qui relèvent du déclenchement d'automatismes, ceux qui sont le fruit de l'application de règles et ceux qui mettent en œuvre des connaissances de haut niveau. Les activités d'exécution de procédures d'action relèvent des deux premiers niveaux de la hiérarchie. Elles sont mises en œuvre lors des situations bien connues et bien maîtrisées par l'opérateur. Les activités d'élaboration de plans correspondent au dernier niveau de régulation. Elles sont développées lorsque l'opérateur se trouve confronté à une situation nouvelle ou à un aspect problématique de la situation. Dans ce dernier cas, l'opérateur doit élaborer une réponse nouvelle à partir, d'une part, d'une analyse de la situation et, d'autre part, des connaissances générales qu'il possède.

## 2.2 Stratégie de résolution de problèmes

À la différence d'une situation d'exécution de procédures d'action, une **stratégie de résolution de problèmes** consiste à élaborer un plan procédural. En effet, face à un problème nouveau l'opérateur ne dispose pas d'une procédure d'action préétablie. Il doit, au préalable, mettre en œuvre des "méta-procédures" d'élaboration d'un plan. Pour éclairer la description des composantes de l'activité de résolution de problèmes, nous définissons tout d'abord le type de situation dans lequel une stratégie de résolution de problèmes est mise en œuvre, c'est-à-dire le concept de **problème**. Ensuite, nous traitons des deux composantes essentielles d'une activité de résolution de problèmes : la **compréhension du problème** et l'**élaboration d'une solution**. Enfin, nous proposons une typologie de problèmes fondée sur une typologie des représentations des tâches et des stratégies d'élaboration.

### 2.2.1 Concept de problème

Un problème ne qualifie pas une tâche, mais une situation, c'est-à-dire la confrontation d'un opérateur à une tâche. Ainsi, une situation constitue un problème pour un opérateur si la représentation qu'il se construit de sa tâche ne lui permet pas de récupérer en mémoire une, ou des, procédures toutes faites lui permettant d'atteindre

son but. Ceci explique pourquoi une même tâche prescrite peut créer un problème pour un opérateur, alors que pour un autre, ou pour cette même personne quelques temps après, elle se traduit par l'exécution d'une procédure plus ou moins complexe. La construction de la représentation de la tâche est appelée compréhension du problème.

### 2.2.2 Compréhension du problème

Comprendre un problème c'est en constituer une représentation plus ou moins complète et adéquate. La compréhension d'un problème implique, au minimum, la construction d'une représentation d'un but. Elle fait appel à de nombreux mécanismes :

- les mécanismes **perceptifs**, conduisant à la reconnaissance de configurations qui, pour le système visuel, peut être étudiée à partir de l'enregistrement des mouvements oculaires [Simon 93] ;
- les mécanismes de **mémorisation**, procurant les structures assimilatrices nécessaires à la reconnaissance ;
- les mécanismes de **traitement du langage**, notamment lorsque l'opérateur doit comprendre un énoncé du problème.

Cette présentation n'inscrit en rien une séquentialité entre la compréhension du problème visant à construire "l'espace-problème", et l'élaboration d'une procédure dans cet espace. Une telle modélisation séquentielle de la résolution de problèmes ne serait que très réductrice et masquerait le fait que la compréhension du problème interagit avec l'élaboration d'une solution.

### 2.2.3 Élaboration d'une solution

Trois critères permettent de caractériser l'activité d'élaboration d'une solution [Hoc 87] :

1. **L'élaboration d'une solution est indépendante d'un domaine de tâches particulier.** Une stratégie d'élaboration d'une solution peut s'appliquer à plusieurs domaines. Néanmoins, au moment de sa mise en œuvre, elle utilise des connaissances propres au domaine. Par exemple, la stratégie des fins et des moyens, qui consiste à rechercher des transformations afin de réduire la différence entre l'état actuel d'une situation et le but, est indépendante des domaines. Mais les connaissances acquises dans le domaine, notamment sur les effets des transformations, sont utilisées dans la recherche.
2. **L'élaboration d'une solution est toujours de nature heuristique**, car elle se réfère à des tâches mal définies. Elle oriente vers des voies de recherches prometteuses, elle permet d'éviter des voies douteuses, sans pour cela apporter de garantie de réussite.
3. **L'élaboration d'une solution fait appel à des "méta-procédures"** qui interagissent avec le domaine. Par exemple, une stratégie peut amener à comparer les effets de diverses transformations pour choisir la plus intéressante à appliquer. Ce type d'action de comparaison n'apparaît pas dans une procédure.

Les stratégies d'élaboration d'une solution sont très variées et dépendent, le plus souvent, du type de représentation de la tâche que l'opérateur s'est construite. Dans le prochain paragraphe, nous présentons des stratégies génériques en référence à une typologie des problèmes. Pour tenir compte de nos objectifs, nous ne retenons ici que deux dimensions générales de catégorisation des stratégies d'élaboration d'une solution. D'une part, celle qui oppose stratégie de **production de résultats** à stratégie de **production de programmes** et, d'autre part, celle qui oppose stratégie **ascendante** à stratégie **descendante**.

### 2.2.3.1 Stratégie de production de résultats *vs* stratégie de production de programmes

D'une façon générale, résoudre un problème, c'est élaborer une solution. Vis-à-vis du problème posé, notamment du but assigné, la solution peut être perçue de deux façons :

1. Soit comme le résultat demandé ; on parle alors de "solution résultat".
2. Soit comme une procédure pour d'obtenir ce résultat ; on parle dans ce cas de "solution procédure".

Cette distinction permet d'opposer deux grandes classes de stratégies d'élaboration d'une solution : les stratégies de production de résultats et les stratégies de production de programmes. Dans le premier cas, l'opérateur est centré sur le but assigné et, s'il élabore une procédure, ce n'est que très secondairement. Le plus souvent, elle restera stockée en mémoire sous une forme exécutable, sans que l'opérateur n'en dispose d'une représentation structurée. Dans le second cas, l'opérateur est principalement centré sur l'élaboration d'une procédure, ou d'un plan procédural, ce qui le conduit à s'en constituer une représentation, en plus de la production du résultat demandé. La littérature sur la résolution de problèmes, en psychologie cognitive comme en IA, qualifie les stratégies de production de programmes, de stratégies de "planification" [Sacerdoti 77].

L'analyse de l'activité de supervision illustre cette première opposition. L'opérateur de supervision peut se fixer pour objectif, non seulement d'obtenir le résultat requis (le retour au mode de fonctionnement nominal du procédé, par exemple) mais, en plus, il peut vouloir élaborer un plan procédural susceptible d'être réutilisé ultérieurement dans une situation comparable.

### 2.2.3.2 Stratégie ascendante *vs* stratégie descendante

Une stratégie d'élaboration ascendante privilégie la composante accommodatrice de l'activité. Elle est dirigée par les données. De ce fait, la compréhension du problème est réalisée dans le cadre strict de la présentation du problème. À l'inverse, une stratégie d'élaboration descendante fait un plus large appel à la composante assimilatrice de l'activité qui est dirigée par des connaissances. Ces dernières correspondent aux connaissances élaborées par l'opérateur sur le domaine du problème, à partir de son action dans ce domaine. Par exemple, l'opérateur de supervision peut transférer une procédure connue à une situation nouvelle. Les symptômes d'un incident à traiter sont mis en rapport avec les symptômes d'un incident déjà rencontré pour permettre le **transfert** de la procédure de diagnostic correspondante à l'incident actuel, figure 2.2.

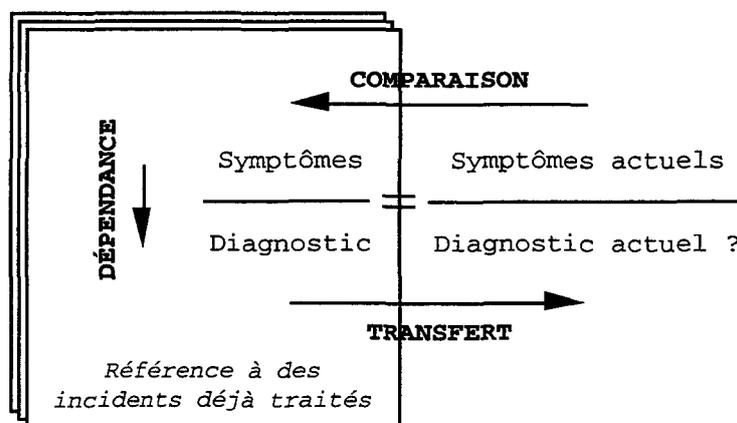


Figure 2.2 — Stratégie de transfert de connaissances.

L'opérateur peut aussi assimiler le nouveau problème à l'aide de connaissances

élaborées dans un autre domaine. On parle alors de résolution de problèmes par **analogie** plutôt que de transfert [Nguyen-Xuan 90].

Ces deux grands types d'opposition entre stratégies, production de résultats *vs* production de programmes et ascendante *vs* descendante, sont très généraux et peuvent s'appliquer à toutes les situations de résolution de problèmes. Les stratégies que nous présentons maintenant sont plus dépendantes du type de représentation que l'opérateur adopte pour résoudre le problème.

## 2.2.4 Typologie de problèmes

La détermination d'une typologie de problèmes est délicate dans la mesure où les stratégies d'élaboration d'une solution sont encore mal maîtrisées. Nous proposons ici une classification en trois grands types de problèmes : les problèmes de transformation d'états, les problèmes d'induction de structures et les problèmes de conception.

### 2.2.4.1 Problèmes de transformation d'états

Dans un problème de **transformation d'états**, l'opérateur se représente la tâche comme le parcours d'un espace d'états dont chaque état est généré à partir des précédents, par l'application de règles de transformation. Le jeu de la tour de Hanoï est un exemple typique de ce genre de problème. Les états correspondent aux répartitions des disques sur les tiges et les transformations sont les déplacements des disques d'une tige à l'autre. Pour ces problèmes, deux grands types de stratégie sont couramment rencontrés : la stratégie dite "d'essais-erreurs" et la stratégie de type "fins et moyens".

La stratégie d'**essais-erreurs** consiste, dans chaque état, à explorer des chemins possibles de l'espace pour tenter d'atteindre le but. Quand un chemin s'avère infructueux, l'opérateur revient à un état antérieur pour explorer un autre chemin et ainsi de suite. Cette stratégie est mise en œuvre lorsque, devant des problèmes relativement nouveaux, le transfert et l'analogie sont impossibles. Elle a alors un rôle essentiel dans la construction de la représentation du problème car elle permet d'acquérir des connaissances sur la tâche et de mieux structurer la recherche par la suite. La stratégie de type **fins et moyens** se rencontre dans les situations où l'opérateur a la possibilité d'évaluer les écarts au but et de tirer parti de tels écarts pour choisir les actions les mieux à même de les réduire. Le modèle le plus connu de ce type de stratégie est le *General Problem Solver* pour la démonstration de théorèmes en logique [Newell et Simon 72].

### 2.2.4.2 Problèmes d'induction de structures

Un problème d'**induction de structures** se pose lorsque l'opérateur se représente la tâche comme une recherche de relations dans un ensemble d'éléments. D'une façon générale, les problèmes de diagnostic sont de ce type, par exemple lorsqu'ils amènent à donner une structure de syndrome à un ensemble de symptômes. La stratégie la plus typique de cette catégorie de problèmes est la stratégie de **test d'hypothèses**. Cette stratégie prend place dans deux espaces : un espace d'exemples, dans lequel l'opérateur puise des exemples pour tester les règles (ou hypothèses) regroupées dans l'espace de règles.

### 2.2.4.3 Problèmes de conception

Dans un problème de **conception**, le concepteur se représente la tâche comme la construction d'une représentation détaillée du but. Lorsqu'elle est obtenue, le problème est résolu. Le but est le plus souvent défini au départ comme un ensemble de contraintes, éventuellement conflictuelles, à satisfaire mais rarement exprimé dans les

termes de la représentation à construire. Les problèmes de conception ont été longtemps classés parmi les problèmes mal définis, ou mal structurés, non solubles par des systèmes artificiels, c'est-à-dire non formalisables. Aujourd'hui, cela n'est plus le cas. Le système d'aide à la conception de configurations particulières d'ordinateurs R1, par exemple, constitue un modèle représentatif de système de conception [McDermott 82b].

Nous avons précisé les concepts de tâche et d'activité et décrit les principales composantes de l'activité de résolution de problèmes. Nous nous intéressons maintenant aux caractéristiques d'une situation analytique de résolution de problèmes particulière : la supervision de procédé.

## 2.3 Stratégie de résolution de problèmes en supervision

Nous détaillons dans ce paragraphe deux stratégies de résolution de problèmes fondamentales suivies par l'opérateur de supervision lors de la reprise d'un dysfonctionnement ou d'une panne du procédé qu'il supervise : **l'élaboration du diagnostic** et la **construction d'un plan procédural**.

### 2.3.1 Diagnostic du problème

Introduit initialement en médecine pour désigner l'activité de mise en relation des symptômes et des maladies, l'usage du terme diagnostic s'est progressivement étendu aux situations de compréhension des dysfonctionnements ou des pannes des procédés automatisés. Une situation de diagnostic recouvre quelques invariants remarquables :

- le diagnostic intègre une activité de compréhension, c'est-à-dire d'organisation d'un ensemble d'éléments en une structure significative. Par exemple, un ensemble de symptômes reçoit une signification par l'incident de fonctionnement qui le structure. Le niveau de compréhension obtenu peut être variable, depuis le simple appariement d'indices à un schéma connu jusqu'à la représentation des raisons de cet appariement ;
- le diagnostic est finalisé par une décision explicite d'action ou de refus d'action ;
- l'action vise à modifier l'organisation de l'ensemble d'éléments de façon à obtenir une structure plus satisfaisante selon l'objectif défini. Pour satisfaire l'objectif de sa tâche, l'opérateur de supervision, confronté à la dérive anormale d'un paramètre du procédé, cherchera un moyen de ramener celui-ci dans une plage de variation acceptable. Parfois, ce moyen consistera à laisser faire le procédé, si le diagnostic conduit à interpréter cette dérive comme l'effet d'un phénomène transitoire dont l'opérateur sait pertinemment qu'il disparaîtra de lui-même.

Ainsi, lorsqu'il est entièrement déployé, le diagnostic d'un problème peut être vu comme une chaîne continue d'activités conduisant de la détection à l'action, figure 1.6. Avec l'expertise acquise par l'opérateur dans le domaine d'application, des raccourcis s'introduisent dans cette chaîne. Dans certains cas, le diagnostic est immédiat et, en quelque sorte, sous-entendu dans l'exécution de la procédure. Parfois, au contraire, le diagnostic doit être construit, soit par des procédures d'investigation systématiques, soit par des heuristiques de résolution de problèmes. Bien que simplifiée, cette présentation des activités de diagnostic fait apparaître le lien entre le diagnostic et l'action. Ainsi, la phase de diagnostic est développée jusqu'à un stade tel qu'il permet la construction d'un plan procédural de réaction efficace.

Dans ce paragraphe, nous abordons les composantes et les stratégies de l'activité de diagnostic. Les activités de planification d'une solution sont évoquées dans le paragraphe suivant.

### 2.3.1.1 Composantes de l'activité de diagnostic

Sur la base des travaux de Hoc [90a], nous proposons de distinguer cinq composantes de l'activité de diagnostic hors planification de l'action.

Tout d'abord, l'**acquisition d'indices** sur la situation peut relever d'une activité automatique. Elle peut aussi être dépendante voire entièrement déterminée par des hypothèses déjà élaborées. Ces hypothèses entraînent alors une focalisation de la prise d'information sur des indices qui les confirment et introduisent ainsi un biais de confirmation<sup>7</sup>.

La **génération d'hypothèses** peut tour à tour s'appuyer sur des connaissances structurales des relations entre les sous-équipements ou sur des simulations mentales du fonctionnement du procédé. Ces hypothèses servent à réduire l'espace de recherche et peuvent être produites précocement en très petit nombre, selon une méthode hypothético-déductive.

À la génération d'hypothèses succède l'**interprétation des indices** de l'état anormal du procédé. Dans la supervision d'un procédé, l'interprétation des indices s'appuie essentiellement sur les informations disponibles, descriptives de l'incident. Les travaux sur le diagnostic ont mis l'accent sur le rôle de la compréhension du problème dans l'efficacité des stratégies de diagnostic. Elstein *et al.* [78] remarquent que les diagnostics erronés sont dus, le plus souvent, à des erreurs d'interprétation des indices et à des évaluations d'hypothèses mal conduites.

Ensuite, l'**évaluation d'hypothèses** consiste à tester les hypothèses émises en référence à des observations voire, quelquefois, par le biais d'expérimentations. Une source de difficulté importante de l'évaluation d'hypothèses est le caractère atypique de la situation. En effet, lorsque plusieurs phénomènes sont simultanés, les hypothèses générées ne couvrent pas la totalité des indices. Il en résulte l'apparition d'un biais dans l'évaluation qui conduit à ne conserver que l'hypothèse qui maximise la différence entre les indices positifs et négatifs par rapport aux autres hypothèses.

Enfin, l'activité de **localisation d'un équipement défectueux** est propre aux situations de dépannage, dans lesquelles l'action curative consiste à remplacer ou à réparer un équipement défectueux du procédé. Dans ces situations, les modes de présentation de l'information favorisent l'accès hiérarchique au sous-équipement fautif, permettant une localisation globale avant une localisation plus précise.

La mise en œuvre de ces composantes de l'activité de diagnostic est interactive et l'ordre de leur présentation ne doit pas être interprété comme un ordre d'exécution. Par ailleurs, avec l'expérience dans le domaine d'application, certaines composantes peuvent être avantageusement confiées à des automatismes, alors que d'autres nécessitent un contrôle conscient, voire des stratégies de résolution de problèmes, et donc la mise en œuvre de raisonnements.

### 2.3.1.2 Typologie des stratégies de diagnostic

La présentation des composantes de l'activité de diagnostic ne présage pas des différentes façons de les combiner pour constituer des stratégies de diagnostic. Les stratégies de diagnostic fondées sur un modèle du fonctionnement normal du procédé se distinguent de celles qui s'appuient sur un modèle du fonctionnement anormal. La figure 2.3 organise en deux grandes familles les stratégies de diagnostic, selon le type principal

<sup>7</sup> Le biais de confirmation conduit l'opérateur à rechercher d'abord les résultats qui confirment le bien-fondé de sa décision, plutôt que des informations qui seraient contraire à cette décision.

de connaissance auquel elles se réfèrent : connaissances sur le fonctionnement normal du procédé ou sur le fonctionnement anormal.

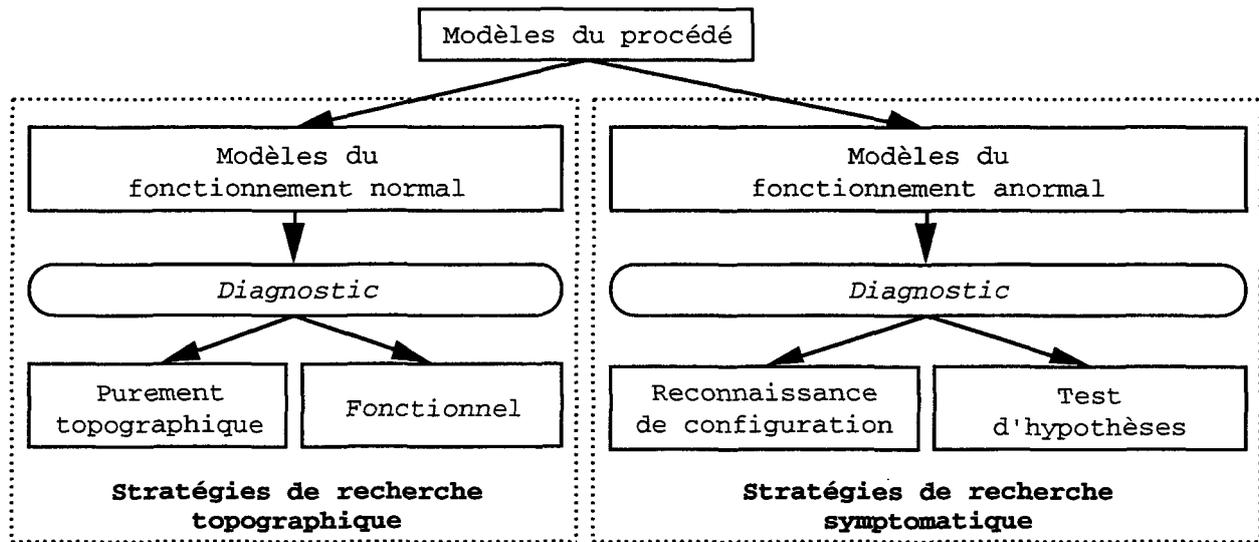


Figure 2.3 — Typologie des stratégies de diagnostic selon le modèle du procédé utilisé.

**Stratégies dirigées par le fonctionnement normal.** Dans les situations de dépannage, les connaissances sur l'état du procédé au cours de son fonctionnement normal sont utilisées pour localiser un équipement défectueux. Les stratégies de recherche topographique consistent à comparer, d'abord, la sortie du procédé à la sortie attendue, pour détecter la panne, puis à faire de même pour chaque sous-procédé, jusqu'à localiser l'équipement déficient. Aucune connaissance sur les pannes n'est nécessaire pour mettre en œuvre une telle stratégie. Les stratégies de recherche topographique peuvent prendre deux formes :

1. La recherche **purement topographique** : la localisation est effectuée en suivant un flux de "données" à l'intérieur du procédé. Le guidage est assuré par la seule structure physique du procédé.
2. La recherche **fonctionnelle** : elle utilise une représentation plus abstraite du fonctionnement normal du procédé dans la localisation. Les mesures prises ne sont pas mises en relation directement avec des équipements, mais d'abord avec les fonctions réalisées par le procédé. La localisation de l'équipement défectueux utilise alors des connaissances sur les relations entre fonctions et équipements.

Rasmussen [86] ajoute à ces deux formes de recherche, purement topographique et fonctionnelle, une recherche dite "par évaluation" qui se traduit plus explicitement par la mise en œuvre d'une représentation mentale des fonctions et des équipements du procédé. Les informations prises sur le procédé sont alors peu nombreuses et se réduisent à l'analyse de la sortie du procédé. Cette recherche peut conduire à des stratégies d'élaboration d'hypothèses et d'évaluation à partir de calculs opérés sur cette représentation, quand l'analyse de la sortie du procédé n'oriente pas immédiatement :

- sur la déficience d'un équipement bien individualisé, quand il s'agit d'une recherche purement topographique ;
- sur la déficience d'une fonction particulière, lorsqu'il s'agit d'une recherche fonctionnelle.

Les stratégies de recherche topographique, qui privilégient la localisation d'un équipement sur lequel il faut intervenir, semblent difficilement envisageables dans des

situations où le diagnostic consiste moins à localiser un élément physique défectueux qu'à comprendre le fonctionnement anormal pour le corriger. Dans la supervision de procédés, par exemple, de telles corrections se traduisent par des interventions, non pas sur des équipements physiques, mais sur les variables du procédé. Pour opérer ce type de diagnostic, les stratégies de recherche symptomatique paraissent plus adaptées.

**Stratégies dirigées par le fonctionnement anormal.** Les stratégies de diagnostic qui s'appuient principalement sur des connaissances concernant le fonctionnement anormal du procédé sont plus volontiers mises en œuvre dans les situations où le diagnostic constitue la tâche essentielle de l'opérateur. Dans les stratégies de recherche symptomatique, l'ensemble de symptômes sert de moyen d'accès à une base de connaissances sur les causes possibles de l'incident. Rasmussen [86] distingue deux catégories de recherche symptomatique guidée par des connaissances sur le fonctionnement anormal du procédé :

1. La **reconnaissance de configuration** : il s'agit de la reconnaissance immédiate d'une configuration familière de symptômes dans une situation qui peut, éventuellement, comporter d'autres informations jouant le rôle de bruit. Ce mécanisme est mis en jeu dans des situations bien connues de l'opérateur.
2. La recherche par **test d'hypothèses** : il s'agit d'une méthode de recherche hypothético-déductive, où la prise d'information est guidée par des connaissances sur les symptômes. Le raisonnement hypothético-déductif enchaîne trois phases, la seconde étant souvent énoncée à travers la dernière [Vogel 88], figure 2.4 :
  1. Génération des hypothèses explicatives de la situation anormale.
  2. Saturation déductive de toutes les conséquences de ces hypothèses.
  3. Réfutation des hypothèses irrecevables.

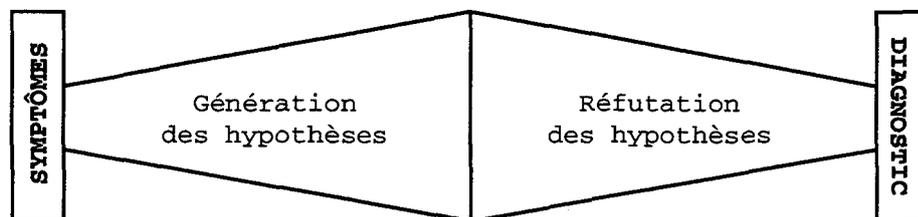


Figure 2.4 — *Stratégie de diagnostic par test d'hypothèses [Vogel 88].*

La phase ascendante du raisonnement correspond à une série d'inductions. La phase de saturation correspond à des déductions directes, permettant de prédire les effets d'une hypothèse. La dernière phase réfute les conclusions déduites des hypothèses et en infère la fausseté de ces hypothèses. Cette stratégie de diagnostic est plutôt mise en œuvre dans des situations nouvelles.

Cette typologie des stratégies de diagnostic n'est pas aussi rigide. En réalité, le type de stratégie mis en œuvre par l'opérateur est largement dépendant de la représentation qu'il se construit de la tâche, c'est-à-dire du problème qu'il a à résoudre [Elstein *et al.* 78]. À l'élaboration du diagnostic succède l'activité de construction d'une solution.

### 2.3.2 Planification d'une solution

La planification d'une solution combine deux démarches, l'une ascendante d'élaboration de plans, l'autre descendante d'utilisation des plans. Avant de les étudier, nous définissons le concept de plan.

### 2.3.2.1 Concept de plan

Un **plan** est une représentation schématique et hiérarchisée susceptible de guider l'activité de l'opérateur, en ce sens que l'activité pourra s'organiser en suivant la structure du plan. Ainsi, le concept de plan s'oppose à celui de procédure dans la mesure où une représentation ne saurait être exécutée. La représentation que constitue le plan, c'est-à-dire des connaissances déclaratives, nécessite le recours à des processus spécifiques pour qu'une exécution effective soit possible [Hoc 87].

Deux types de plans s'opposent selon la nature des objets qu'ils réfèrent. Parmi ces objets, les procédures se distinguent des structures relationnelles statiques et sont reprises, respectivement, dans les **plans procéduraux** pour les premières et les **plans déclaratifs** pour les secondes. Le plan procédural spécifie une structure de contrôle des procédures à réaliser.

### 2.3.2.2 Démarche ascendante et descendante de planification

Bien qu'étymologiquement le concept de planification renvoie directement à l'élaboration de plans, il nous semble judicieux d'englober la mise en œuvre de plans pour tenir compte de la forte imbrication qui existe entre les mécanismes d'élaboration et d'utilisation de plans. En effet, lorsqu'un plan préalablement construit est utilisé dans une situation nouvelle, il ne correspond pas toujours exactement à cette situation et nécessite souvent des adaptations qui traduisent l'élaboration d'un nouveau plan. De même, lorsqu'un plan est élaboré, ce n'est pas toujours à partir de représentations très détaillées de la situation courante. Il est donc utile de traiter des deux questions conjointement. Pour cela, la planification enchaîne deux types de démarche, figure 2.5.

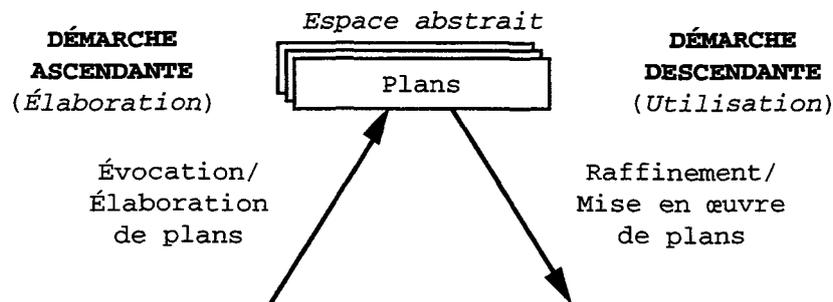


Figure 2.5 — Démarche ascendante et descendante de planification.

L'une est **ascendante** et part de représentations détaillées de la situation pour aller vers les plans qui organiseront l'activité dans cette situation. Elle est impliquée dans l'évocation et l'élaboration des plans. La démarche ascendante s'appuie sur cinq types de mécanisme qui, à partir des détails, vont conduire aux plans [Hoc 90b] :

1. **L'évocation d'un plan à partir d'indices** : l'expert d'un domaine s'attache souvent à décrire la façon dont un plan permet de structurer une situation, mais a souvent des difficultés à décrire les conditions dans lesquelles le plan a été évoqué, quelquefois de façon réflexe.
2. **L'évocation d'un plan par analogie** : le plan appliqué à la situation nouvelle provient d'un domaine relativement éloigné et la reconnaissance de l'analogie est l'objet d'un mécanisme d'abstraction de mise en œuvre progressive, à partir des détails de la situation.
3. La **généralisation** : le plan est progressivement construit en généralisant les propriétés de situations spécifiques pour lesquelles les solutions adoptées sont similaires.

4. La **prise de conscience** : pour élaborer un plan transposable d'une situation à l'autre, il faut parfois se représenter une fonctionnalité plus générale dont les mises en œuvre se traduisent par des solutions apparemment très différentes.
5. La **remise en question des plans** à partir des informations obtenues, soit lors de leur raffinement, soit au cours d'une exécution, en détectant les erreurs et en analysant leurs causes.

L'autre démarche est **descendante**. Elle conduit à détailler des plans, soit en raffinant la description des objets qu'ils représentent, soit en faisant des choix de mise en œuvre particulière de fonctions plus générales. Nous présentons trois mécanismes de base de raffinement des plans :

1. La **décomposition d'un but en sous-buts**.
2. La **particularisation d'un but**, permettant de passer d'une expression générale d'un but à une expression spécifique à la situation et donc plus proche du niveau de détail exigé par la tâche.
3. Le **traitement des interférences entre buts**, quand les buts ne peuvent être décomposés indépendamment les uns des autres sans créer des conflits.

Dans ce paragraphe, nous avons décrit les stratégies de base des activités de diagnostic et de planification développées par l'opérateur de supervision afin de ramener le procédé dans son mode de fonctionnement nominal. Parmi les mécanismes qui émergent fréquemment de l'analyse de l'activité de résolution de problèmes des opérateurs de supervision, la réutilisation de connaissances occupe une place privilégiée qui justifie une référence à la psychologie cognitive.

## 2.4 La réutilisation de connaissances

La **réutilisation de connaissances** issues du traitement de situations antérieures pour la résolution de problèmes peut être définie comme la récupération de connaissances contextualisées, ou "épisodiques"<sup>8</sup>, en mémoire et leur utilisation via un raisonnement par analogie [Perron-Bouvier 93]. Nous décrivons dans ce paragraphe ces deux composantes interdépendantes de la réutilisation de connaissances.

### 2.4.1 Le raisonnement par analogie

Nguyen-Xuan [90] caractérise le raisonnement par analogie par :

- la considération de deux situations dites "analogues", l'une appelée "situation source" et l'autre "situation cible" ;
- l'utilisation des connaissances que l'opérateur possède sur la situation source, qu'il connaît bien et qu'il a mémorisée, pour engendrer de nouvelles connaissances concernant la situation cible. Le terme "transfert" désigne cet emprunt de connaissances.

Moore et Newell [74] formalisent la compréhension fondée sur l'analogie à l'aide du modèle MERLIN. Dans ce modèle, deux objets X et Y sont analogues quand il est possible de trouver un point de vue permettant de voir X comme un Y et *vice versa*. L'idée de base de MERLIN est que deux situations sont analogues s'il est possible de les décrire à l'aide d'une même structure de relations. Nous adoptons cette définition du mode de fonctionnement cognitif fondé sur l'analogie. Dans la résolution de problèmes par analogie, ce qui est transféré de la situation source à la situation cible peut être la

<sup>8</sup> Le terme "épisodique" désigne les connaissances portant sur des expériences particulières et concrètes stockées en mémoire épisodique [Tulving 72].

représentation du problème, lorsque les problèmes source et cible n'ont pas le même but, ou une procédure d'action. Les connaissances engendrées constituent la solution du problème.

Cette définition du raisonnement par analogie conduit à une question importante : "Comment une situation source est-elle récupérée en mémoire ?". Le processus correspondant interpelle sur deux aspects importants et sous-jacents du transfert analogique :

1. "Qu'est-ce qui permet d'évoquer une situation source ?".
2. "Comment une situation source est-elle évoquée ?".

Les réponses à ces deux interrogations dépendent des situations et des différences individuelles. Nous évoquons dans la suite les positions de plusieurs auteurs à ce sujet.

## 2.4.2 La récupération de connaissances épisodiques

Les connaissances épisodiques représentent des événements contextualisés vécus, dont la récupération en mémoire est fortement dépendante du contexte de codage. L'opérateur tente d'accéder au contexte de codage de l'événement originel à partir des indices de récupération dont il dispose au moment du rappel. Ces indices de récupération et les stratégies de recherche jouent donc un rôle important dans la récupération des connaissances épisodiques [Perron-Bouvier 93].

### 2.4.2.1 Les indices de récupération

Dans les ordinateurs, les données sont associées à une adresse pour être retrouvées. Ce principe de fonctionnement a servi de modèle à certains psychologues qui se sont demandé si l'oubli pouvait être considéré comme l'impossibilité de retrouver une connaissance en mémoire et non comme une destruction de la connaissance. Ce modèle des processus de récupération a profondément modifié les conceptions élaborées sur la mémoire. La première démonstration de l'efficacité des adresses, que l'on appelle, pour la mémoire, les **indices de récupération**, a été faite par Tulving et Pearlstone [66]. Ces derniers ont montré que le rappel indicé est plus efficace que le rappel libre. Les difficultés de récupération de certaines connaissances épisodiques ne sont donc pas liées à un oubli définitif mais correspondent, pour une part importante, à un manque d'indices.

### 2.4.2.2 Les stratégies de récupération

En psychologie cognitive, plusieurs visions existent quant à la nature du mécanisme de récupération de connaissances. Les divergences concernent les caractéristiques de la situation actuelle qui servent à la sélection d'une situation connue. De notre analyse, il ressort que le paradigme utilisé par chaque auteur pour répondre à cette question n'est pas sans influencer sa position. Nous décrivons successivement les positions de trois auteurs.

Holyoak [85] considère que dans une situation de résolution de problèmes, l'opérateur construit une certaine représentation du problème et que les indices qui participent à cette représentation activent des indices appartenant aux représentations des situations anciennes. La situation passée qui reçoit la somme d'activation la plus importante est rappelée en tant que situation source. Ainsi, la représentation initiale du problème joue un rôle capital.

La situation expérimentale utilisée par Gentner et Landers [85] consiste à donner de petites histoires (source) et à donner, quelques jours après, une autre histoire, analogue

aux histoires sources par des indices de surface (les mêmes objets ou des objets de même catégorie), ou par des indices structuraux (l'intrigue). Gentner et Landers ont trouvé que les indices de surface jouent un rôle plus important dans le rappel des situations. Holyoak [85] suppose que les indices de surface aussi bien que les indices structuraux jouent un rôle, les indices structuraux étant définis comme des indices causalement liés aux buts du problème.

Enfin, la situation examinée par Keane [88] consiste à raconter des histoires sources dans lesquelles est décrit un problème qui se pose à un personnage, puis la façon dont la personne résout le problème. Dans la situation cible, l'opérateur doit résoudre lui-même un problème. Selon Keane, si la situation actuelle n'est pas trop nouvelle pour l'opérateur, celui-ci peut alors en construire une représentation catégorisable dans un schéma général. C'est ce schéma général qui est utilisé dans la sélection d'une situation source. Le schéma peut ne pas être un schéma qui produise la solution, comme le schéma de résolution proposé par Gick et Holyoak [83], mais seulement un schéma thématique comme les thèmes de Schank [82]. Cette proposition est intéressante, car elle permet de penser que l'opérateur peut trouver une situation source pertinente à laquelle il peut emprunter la solution, mais aussi une situation source à laquelle il peut emprunter la façon de représenter le problème.

Cette première partie du chapitre s'est attachée à présenter les principales composantes des stratégies de résolution de problèmes, plus spécialement, en supervision. Cette étude du point de vue de la psychologie cognitive sur la résolution de problèmes nous a permis d'aborder l'analyse de l'activité des opérateurs de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France, domaine d'application de ce travail. Dans la perspective du développement d'un système d'assistance à ce type d'activité complexe, la prochaine partie s'intéresse aux contributions de l'IA à la résolution de problèmes. Celles-ci portent essentiellement sur la définition de formalismes de représentation des connaissances et de modèles de raisonnement.

### 3 Apports de l'intelligence artificielle à la résolution de problèmes

L'IA est une discipline scientifique dont l'un des objectifs est de concevoir des Systèmes à Base de Connaissances (SBC) capables d'assister l'opérateur humain dans ses activités de résolution de problèmes. De ce fait, l'étude des différents modes de représentation des connaissances et de raisonnement en vue de leur implémentation au sein de SBC est un thème majeur de recherche fondamentale et appliquée pour cette discipline. Cette seconde partie du chapitre présente successivement les deux aspects de la représentation des connaissances et du raisonnement.

#### 3.1 Les formalismes de représentation des connaissances

Le raisonnement sur des connaissances dans un SBC implique leur formalisation selon un certain **mode de représentation**, qui peut être défini comme un ensemble de méthodes de codage symbolique. Il existe deux grands types de représentation de connaissances, le plus souvent complémentaires :

1. Les représentations **déclaratives** dans lesquelles les connaissances sont décrites indépendamment de leur exploitation ultérieure. Elles sont à l'origine de la programmation déclarative d'un SBC.

## 2. Les représentations **procédurales** qui intègrent la façon dont les connaissances codées doivent être utilisées.

Différents modes de représentation des connaissances sont utilisés en IA. Les plus courants sont les suivants :

- les représentations logiques [Kaufman 87] ;
- les règles de production [Laurière 82] ;
- les réseaux sémantiques [Findler 79] ;
- les objets structurés [Masini *et al.* 89].

Dans la suite de ce paragraphe, nous focalisons sur la description des objets structurés dont les propriétés ont été mises à profit lors du volet applicatif de ce travail.

La représentation des connaissances par objets structurés s'inspire de travaux menés en psychologie cognitive sur l'organisation de la mémoire humaine. Bartlett [32] avance la notion de **schéma** comme modèle de représentation prototypique d'expériences passées mises à profit pour résoudre un problème nouveau. Ce concept a été repris en IA sous la forme de **frames**, proposés par Minsky [75] en vision par ordinateur, et de **scripts**, introduits par Schank et Abelson [77] pour la compréhension du langage naturel.

Les *frames*, ou les scripts, forment des entités de granularité importante regroupant de façon structurée l'ensemble des connaissances relatives à un objet, un concept ou une situation typiques. Un *frame* est une structure composée d'**attributs** décrivant un concept et ses diverses propriétés. Un attribut est à son tour décrit par des **facettes** qui spécifient la nature de l'attribut et le comportement qui lui est associé. Les facettes **déclaratives** définissent le type, le domaine de définition, la cardinalité, la valeur et la valeur par défaut d'un attribut, tandis que les facettes **procédurales** introduisent des procédures, appelées **réflexes**, qui peuvent être vues comme la représentation de procédures de raisonnement locales. La possibilité d'attacher aux attributs des procédures permet au mode de représentation par objets structurés d'offrir aussi les avantages d'une représentation procédurale.

Les *frames* présentant une structure et un comportement communs peuvent être organisés, par niveaux de généralité, en une **hiérarchie d'héritage**. Un *frame* est alors une spécialisation d'un, ou de plusieurs, "super-frames". Il ne possède en propre que les propriétés, valeurs et procédures, qui diffèrent de ses super-frames, les autres propriétés étant partagées avec les super-frames. L'héritage de toute propriété, attribut ou réflexe, est dynamique. Les représentants isomorphes d'un *frame*, équivalents des instances d'une classe, sont créés par copie différentielle.

Les *frames* regroupent les avantages des représentations déclaratives et procédurales. Ce formalisme de représentation mixte des connaissances autorise des modes de raisonnement proches de ceux de l'opérateur humain. Il permet une organisation hiérarchique des connaissances par l'utilisation de la relation d'hyponymie. Enfin, les objets représentés constituent des entités autonomes, ayant chacune une existence réelle dans la base de connaissances du système. De ce point de vue, les *frames* permettent de rassembler autour de chaque objet une information plus riche et plus complexe que dans les réseaux sémantiques.

Les multiples origines des modes de représentation des connaissances traduisent la pluridisciplinarité de l'IA. Les sources d'inspiration sont aussi bien l'informatique et la logique que la psychologie cognitive. À défaut de démarche systématique pour le choix d'un formalisme le mieux adapté, nous proposons de considérer les principaux critères suivants :

- nature incertaine, incomplète et redondante des connaissances ;
- degré de contrôle souhaité sur le raisonnement ;
- puissance d'expression et efficacité du formalisme : clarté, compréhension, flexibilité, lisibilité, modularité et précision ;
- capacité à guider le choix de ce qu'il est utile de représenter ;
- type de problème à résoudre.

Il faut, en définitive, toujours rechercher un compromis entre clarté et puissance de représentation, d'une part, et efficacité des raisonnements menés, d'autre part. La tendance actuelle est de faire coexister dans le même système plusieurs modes de représentation de façon à mieux rendre compte de la diversité des connaissances manipulées.

### 3.2 Quelques modèles de raisonnement

La notion de raisonnement évoque une activité intentionnelle et élaborée. Elle est couramment présente dans la vie de tous les jours et constitue la base des activités mentales de résolution de problèmes. Un raisonnement peut être défini comme un enchaînement, une combinaison ou une confrontation d'énoncés ou de représentations symboliques, respectant des contraintes internes susceptibles d'être explicitées. Il est conduit en fonction d'un but qui peut prendre des formes variées : démontrer, convaincre, résoudre, interpréter, décider, justifier ou expliquer. Cette définition très générale de la notion de raisonnement met en évidence l'étroite imbrication entre raisonnement et connaissances : aucun mécanisme ou modèle de raisonnement ne peut être considéré indépendamment des connaissances sur lesquelles il opère. C'est ce que Le Roux [94] traduit sous forme "d'engagement ontologique" dans ses travaux sur l'acquisition des connaissances.

Une grande variété de modes de raisonnement émergent en IA, à l'image de la richesse des mécanismes cognitifs chez l'homme. La typologie suivante correspond aux mécanismes de base, de nature différente mais complémentaires :

- le raisonnement **formel** fondé sur la manipulation syntaxique de structures symboliques à l'aide de règles, dans le cadre d'une sémantique. Le raisonnement logique en constitue évidemment l'archétype, mais il existe aussi de nombreuses variantes et méthodes dérivées, telles que le raisonnement temporel [Allen 81 ; McDermott 82a] ;
- le raisonnement **qualitatif** basé sur des évolutions qualitatives de grandeurs, telles que le franchissement d'un seuil ou le changement de signe. Il sert à prévoir le comportement d'un procédé ou à déterminer les effets de perturbations sur les valeurs de paramètres du procédé. Le raisonnement qualitatif est utilisé dans des cas atypiques ou particulièrement complexes pour lesquels il est difficile, sinon impossible, d'expliciter des règles [De Kleer 87] ;
- le raisonnement **procédural** dans lequel toutes les connaissances, la façon de les utiliser et la conduite du raisonnement, sont entièrement figées sous forme d'algorithmes. Les mécanismes d'attachement procédural et de démons, dont sont pourvus les objets structurés, permettent de mettre en œuvre un tel raisonnement. Le raisonnement par classification appartient à cette catégorie [Napoli 94] ;
- le raisonnement **analogique**, très naturel et efficace chez l'être humain, mais difficile à mettre en œuvre en pratique car mal connu [Chouraqui 86] ;
- le raisonnement par **généralisation** et **abstraction**, également largement répandu dans la pratique humaine, mais encore assez mal connu. Il est lié à l'apprentissage par induction, d'une importance majeure en IA [Michalski 83].

Dans ce paragraphe, nous nous contentons de présenter les modes de raisonnement fondamentaux et/ou en rapport avec l'objet du travail. Le lecteur intéressé pourra consulter le livre synthétique de Haton *et al.* [91] consacré à ce sujet.

### 3.2.1 Le raisonnement logique

Le problème central de la mécanisation d'un raisonnement est de parvenir à mener une suite d'opérations sur des structures symboliques, tout en préservant la véracité et la cohérence des conclusions déduites. La logique mathématique est un exemple parfait de cadre d'étude possédant cette propriété. Trois schémas d'inférence caractérisent les principaux modèles logiques de raisonnement :

1. Le raisonnement **déductif**, formalisé depuis longtemps par les logiciens, opère sur un univers complètement décrit. Il permet de déduire des conclusions valides à partir d'un ensemble de prémisses. Une déduction peut être représentée par le schéma d'inférence<sup>9</sup> suivant :

$$\boxed{P(a), \forall x (P(x) \Rightarrow Q(x)) \vdash Q(a)}$$

2. Le raisonnement **inductif** vise, à l'inverse du précédent, à généraliser des prémisses. Fondé sur ce principe de généralisation, il procède sur des univers incomplètement décrits. Le raisonnement inductif est un raisonnement ampliatif, sa conclusion va au-delà des données consignées dans les prémisses. Il est aussi faillible car sa conclusion peut être démentie par des observations plus étendues et graduel car sa conclusion est d'autant plus sûre que les données en sa faveur sont nombreuses et variées. La logique inductive cherche à définir le degré auquel la conclusion d'un argument inductif est "supportée" ou "confirmée" par ses prémisses. Une induction peut être décrite par le schéma d'inférence suivant :

$$\boxed{P(a), Q(a) \vdash \forall x (P(x) \Rightarrow Q(x))}$$

3. Le raisonnement **abductif** cherche à attacher des causes plausibles à un ensemble de prémisses. Il permet, en remontant des conclusions aux hypothèses, de déterminer les causes susceptibles d'expliquer un fait. Une abduction peut être symbolisée par le schéma d'inférence suivant :

$$\boxed{\forall x (P(x) \Rightarrow Q(x)), Q(a) \vdash P(a)}$$

Ces raisonnements logiques peuvent être classés en deux grandes catégories [Chouraqui 92], tableau 2.1 : les raisonnements **rigoureux** et les raisonnements **non rigoureux**.

Catégories	Raisonnements rigoureux	Raisonnements non rigoureux
Types	Déduction Hypothético-déductif Par l'absurde	Induction Abduction Analogie Argumentation
Conclusion	Sûre	Probable
Domaine d'application	Très structuré	Peu structuré

Tableau 2.1 — *Raisonnements rigoureux et non rigoureux.*

<sup>9</sup> La règle d'inférence est énoncée sous la forme  $a \vdash b$ . Elle doit être interprétée de façon à signifier que si l'hypothèse  $a$  est vraie alors il peut être déduit que la conclusion  $b$  est vraie. Cette notation est employée par les logiciens, alors que les informaticiens utilisent plutôt un formalisme tel que  $a/b$ .

Le raisonnement déductif est dit valide, ou rigoureux, dans la mesure où un ensemble d'expressions de départ vraies conduisent à des conclusions elles-mêmes vraies. Les raisonnements rigoureux concernent également des raisonnements spécifiques comme les raisonnements hypothético-déductifs et par l'absurde. À l'inverse, le raisonnement inductif et le raisonnement abductif sont dits plausibles, ou non rigoureux. Ils mènent à des conclusions probables, en ce sens que, soit les prémisses sont incertaines, soit les relations qui enchaînent les propositions établissent entre elles des liens exprimant un certain degré de probabilité. Le raisonnement naturel (les structures argumentatives comme les métaphores ou la causalité) et certaines formes d'analogie relèvent également des raisonnements non rigoureux. Ces modes de raisonnement sont largement et très efficacement utilisés dans les domaines de connaissances empiriques non, ou peu, théorisés. L'induction et l'analogie tentent notamment de modéliser l'intuition dont la puissance chez l'être humain est considérable.

### 3.2.2 Le raisonnement analogique

Le raisonnement analogique est un des phénomènes clés de l'intelligence. Sa première formulation a été définie par Aristote dans le sens d'une égalité de rapports : "A est à B ce que C est à D". En effet, de tous temps l'analogie a été considérée comme un facteur essentiel de création. Dorolle [69] précise à ce sujet : "*La faculté inventive par excellence, c'est la faculté d'identification, la faculté de percevoir des ressemblances et des différences. Et le jeu de cette faculté suppose une singulière aptitude à penser par analogies*". La puissance créative du raisonnement analogique consiste à avoir recours à un élément mieux connu pour inférer des connaissances sur un élément qui l'est moins. Il implique, notamment, l'évaluation de la ressemblance entre entités et leur mémorisation en vue de leur réutilisation. Dans une première approche de formalisation, l'analogie peut être décrite par le schéma d'inférence suivant :

$$\boxed{\forall x (P(x) \Rightarrow Q(x)), P'(a) \approx P(a) \vdash Q'(a) \approx Q(a)}$$

Ce mode de raisonnement couvre plusieurs champs de l'IA : l'apprentissage, la compréhension du langage naturel, l'argumentation, l'explication, la planification et la résolution de problèmes [Coulon *et al.* 90]. La première réalisation pratique qui ouvrit la voie dans ce domaine est due à Evans avec le système ANALOGY, capable de résoudre par analogie des problèmes de géométrie définissant des tests d'intelligence [Evans 68]. Dans les sections qui suivent, nous abordons les aspects fondamentaux du raisonnement analogique puis, nous nous intéressons, plus particulièrement, à la place du raisonnement analogique dans la résolution de problèmes.

#### 3.2.2.1 Terminologie et formalisation du raisonnement analogique

Le **paradigme analogique** définit l'analogie comme la mise en œuvre d'un mécanisme de mise en correspondance entre des structures afin de transposer des connaissances d'un univers d'application à un autre, en fonction d'un certain point de vue correspondant à un but à atteindre ou à un problème à résoudre [Chouraqui 86]. Il manipule deux entités appartenant chacune à un univers différent. L'une est utilisée pour inférer des connaissances sur la seconde, elle appartient à l'univers source, l'autre appartient à l'univers cible. Dans la description des mécanismes du raisonnement analogique, ces deux entités sont appelées simplement **source** et **cible**, figure 2.6.

L'**univers**  $U$  désigne l'ensemble des connaissances relatives à un domaine d'application donné. Il comporte des **éléments de description** du domaine, atomiques ou structurés, et des mécanismes permettant d'inférer de nouvelles connaissances. L'intégralité du raisonnement analogique repose sur le concept de relation. Deux types de relations sont exploités : les **relations de dépendance** et les **relations de correspondance** [Coulon *et al.* 90 ; Py 94].

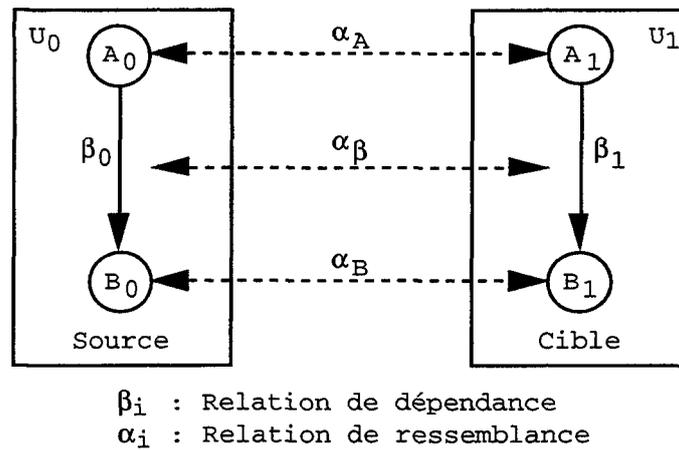


Figure 2.6 — *Le paradigme d'analogie.*

Les relations de dépendance sont internes aux entités source et cible. Il existe une relation de dépendance  $\beta$  entre deux éléments de description A et B de l'univers U si et seulement si A intervient dans la déduction de B. Le triplet  $(A, \beta, B)$  forme une **description de dépendance** dans laquelle A et B sont en relation de dépendance  $\beta$ . Ainsi, les structures source et cible sont des descriptions de dépendance. Les relations de correspondance relient deux descriptions de dépendance source  $(A_0, \beta_0, B_0)$  et cible  $(A_1, \beta_1, B_1)$  pouvant appartenir chacune à deux univers différents  $U_0$  et  $U_1$ . Leur mise en correspondance  $\alpha$  est notée :  $(A_0, \beta_0, B_0) \alpha (A_1, \beta_1, B_1)$ . La relation de correspondance  $\alpha$  peut être projetée sur chacun des éléments de description :  $(A_0) \alpha_A (A_1)$ ,  $(\beta_0) \alpha_\beta (\beta_1)$  et  $(B_0) \alpha_B (B_1)$ , en convenant de noter  $\alpha_A$ ,  $\alpha_\beta$  et  $\alpha_B$  les restrictions de la relation  $\alpha$  pour établir la correspondance entre les couples constitués d'un élément de description de la source et de son "correspondant" dans la cible.

### 3.2.2.2 Stratégie de conduite du raisonnement analogique

Les éléments de description  $A_0, B_0, A_1$  et  $B_1$  peuvent être structurés et sont alors composés d'un ensemble d'entités. L'établissement des relations de correspondance se fait au niveau de ces entités en considérant leur rôle dans l'élément de description auquel elles sont associées, ou en fonction de leur rôle dans la relation de dépendance. La priorité donnée à l'un de ces rôles définit l'organisation des phases de recherche des relations de dépendance et de correspondance. Celle-ci détermine la stratégie du raisonnement analogique. Le choix de la stratégie dépend de la représentation initiale du problème. L'inférence analogique peut être conduite selon deux stratégies [Coulon *et al.* 90] :

1. La **stratégie dirigée par les relations de dépendance** : la mise en correspondance est réalisée entre les descriptions de dépendance source  $(A_0, \beta_0, B_0)$  et cible  $(A_1, \beta_1, B_1)$ , à partir de l'identité des rôles joués par les entités qui les composent, sous contrainte des relations de dépendance.
2. La **stratégie dirigée par les éléments de description** : la mise en correspondance est établie entre les éléments de description  $A_0$  et  $A_1$  et/ou  $B_0$  et  $B_1$ , issus respectivement de la source  $(A_0, \beta_0, B_0)$  et de la cible  $(A_1, \beta_1, B_1)$ , à partir de l'identité des rôles joués par les entités qui les composent, sous contrainte des éléments de description.

Dans la première stratégie, les relations de dépendance imposent les relations de correspondance. Dans la seconde, les relations de correspondance imposent les relations de dépendance. Bien souvent, ces contraintes ne sont pas suffisamment fortes en raison, notamment, de l'incomplétude potentielle de la représentation des descriptions de dépendance. Une combinaison des deux stratégies est alors utilisée jusqu'à

détermination totale de la cible [Coulon *et al.* 90]. La mise en correspondance est une étape d'une complexité très importante pour laquelle il convient de limiter la quantité des entités mises en œuvre.

### 3.2.2.3 Raisonnement analogique et résolution de problèmes

Le raisonnement analogique est une démarche cognitivement économique fréquemment utilisée en résolution de problèmes. La résolution d'un problème nouveau par analogie à un autre problème proche déjà résolu, implique la recherche d'un problème passé similaire et la transformation de sa solution en une solution potentiellement applicable au problème courant. Il existe principalement deux contextes d'utilisation du raisonnement analogique dans le cadre de la résolution de problèmes [Coulon *et al.* 90] :

1. La résolution du problème s'annonce particulièrement complexe et longue, par exemple, la conduite des inférences déductives et/ou inductives provoque une explosion combinatoire. Dans ce cas, l'utilisation de la solution d'un problème similaire déjà résolu permet d'accélérer le processus de résolution.
2. Dans le domaine d'application considéré, l'absence d'une théorie ne permet pas d'effectuer une déduction pour résoudre le problème posé. L'utilisation d'un problème similaire résolu s'avère être la seule issue.

Dans le premier contexte, le raisonnement analogique joue le rôle d'heuristique pour la déduction ou l'induction envisagée. Ce type d'approche est qualifiée d'**analogie heuristique**. L'analogie réalisée a pour finalité de réduire le coût du raisonnement principal. Dans le second contexte, le raisonnement par analogie constitue le raisonnement principal. La démarche est qualifiée d'**analogie recours**.

Carbonell [83] propose la définition suivante de la résolution de problèmes par analogie : *“La résolution de problèmes par analogie consiste à transférer de la connaissance à partir des épisodes précédents de résolution de problèmes aux nouveaux problèmes qui partagent des aspects significatifs de l'expérience précédente correspondante, et à utiliser les connaissances transférées pour construire des solutions pour les nouveaux problèmes”*. Afin de rendre sa définition opérationnelle, Carbonell suggère deux approches de résolution de problèmes par analogie : l'**analogie transformationnelle** et l'**analogie dérivationnelle**.

L'analogie transformationnelle consiste à retrouver et modifier des solutions de problèmes proches pour satisfaire les besoins d'un nouveau problème [Carbonell 83]. La solution désigne une suite d'actions qui, une fois appliquée à l'état initial du problème, l'amène à l'état final. Le processus d'analogie par transformation peut être décrit de la façon suivante, figure 2.7 :

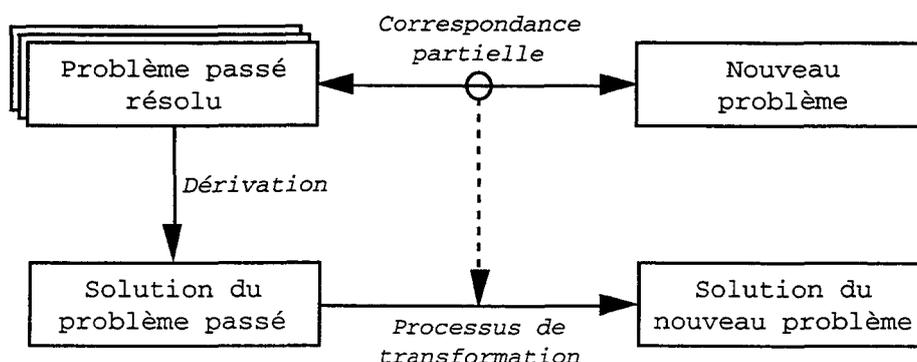


Figure 2.7 — *Processus d'analogie par transformation [Carbonell 83].*

1. Deux problèmes partagent des aspects significatifs si le résultat de la mesure de similarité appliquée à l'appariement partiel dépasse un certain seuil prédéterminé.
2. La sélection des problèmes passés, jugés pertinents, est contrainte par le schéma d'organisation de la mémoire et du système d'appariement partiel.
3. La connaissance transférée dans la nouvelle situation est une séquence d'actions issue de la solution retenue.
4. Le processus de transfert de la connaissance se fait par copie de la solution retrouvée et par modification incrémentale heuristique, selon des pas de transformation primitifs, jusqu'à ce que la solution satisfasse les exigences du nouveau problème.

Cette première approche du raisonnement analogique en résolution de problèmes a été implémentée avec succès au sein du système ARIES [Carbonell 83]. Il a prouvé son efficacité dans des domaines variés où il a été testé, incluant des problèmes d'algèbre et des tâches de recherche d'itinéraire.

L'analogie dérivationnelle est plus reconstructive que la méthode par transformation. Les traces de dérivations des problèmes similaires du passé sont rappelées, et modifiées si nécessaire, pour construire la solution d'un problème nouveau similaire [Carbonell 83, 86]. La connaissance extraite porte sur l'ensemble du processus de raisonnement utilisé pour construire (ou dériver) une solution au problème à résoudre. Le processus d'analogie par dérivation peut être décrit de la façon suivante, figure 2.8 :

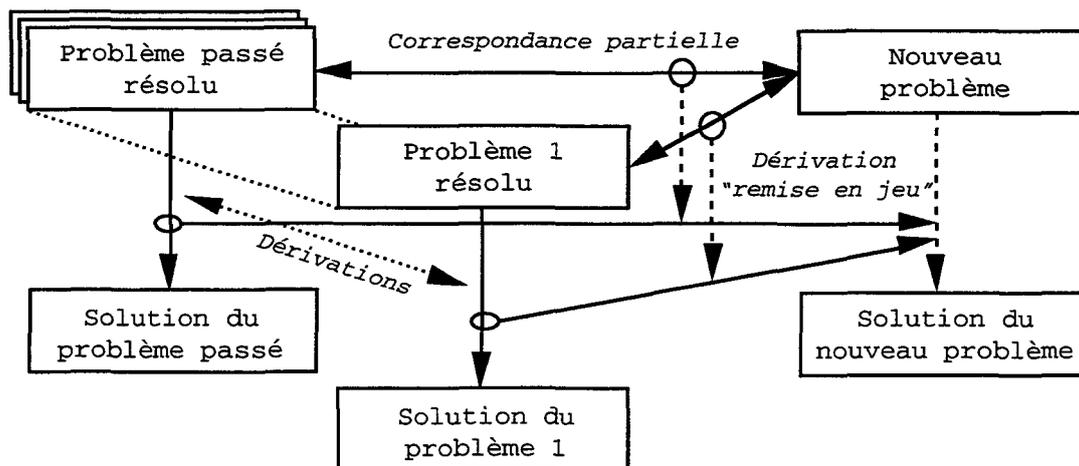


Figure 2.8 — *Processus d'analogie par dérivation* [Carbonell 83].

1. Deux problèmes partagent des aspects significatifs si leur analyse initiale produit les mêmes étapes de raisonnement, c'est-à-dire si les pas initiaux de leurs dérivations respectives concernent les mêmes questions et prennent les mêmes décisions.
2. La première dérivation doit être transférée à la nouvelle situation, essentiellement en recréant les aspects significatifs du processus de raisonnement qui a résolu le problème précédent.
3. Le transfert de la connaissance s'effectue en reconsidérant les décisions anciennes dans le contexte d'une situation nouvelle, en préservant celles qui s'appliquent et en remplaçant, ou modifiant, celles dont les supports ne sont plus valides dans la nouvelle situation.
4. Les problèmes et leurs dérivations sont stockés dans une vaste mémoire épisodique et les recherches se font par reproduction des pas initiaux des suites de décision rappelant le processus de raisonnement précédent.

L'analogie par dérivation nécessite de mémoriser chaque étape du processus de raisonnement, leurs contraintes et leurs justifications, ce qui est fastidieux et coûteux en place mémoire. Cependant, dans certains domaines comme la programmation automatique, il n'est pas envisageable de construire la solution d'un nouveau problème sans se référer à l'ensemble de ces connaissances.

Ces approches de l'analogie sont à l'origine de la formalisation du **Raisonnement à Partir de Cas** (RàPC) en IA. Dans le cadre d'un domaine d'application particulier, le RàPC consiste à rechercher un cas similaire au problème à résoudre et à réutiliser sa solution ou le raisonnement qu'il emploie. Cette idée n'est pas nouvelle. Schank [83], par exemple, présente cette méthode de résolution de problèmes comme étant meilleure et plus proche du raisonnement humain que celles mises en œuvre dans la plupart des SBC. Le RàPC exploite directement des expériences passées en rapport avec le problème à résoudre, au moment où celui-ci se pose, plutôt que de généraliser l'ensemble des expériences passées sous la forme d'une base de connaissances, comme c'est le cas pour les raisonnements des SBC classiques, figure 2.9.

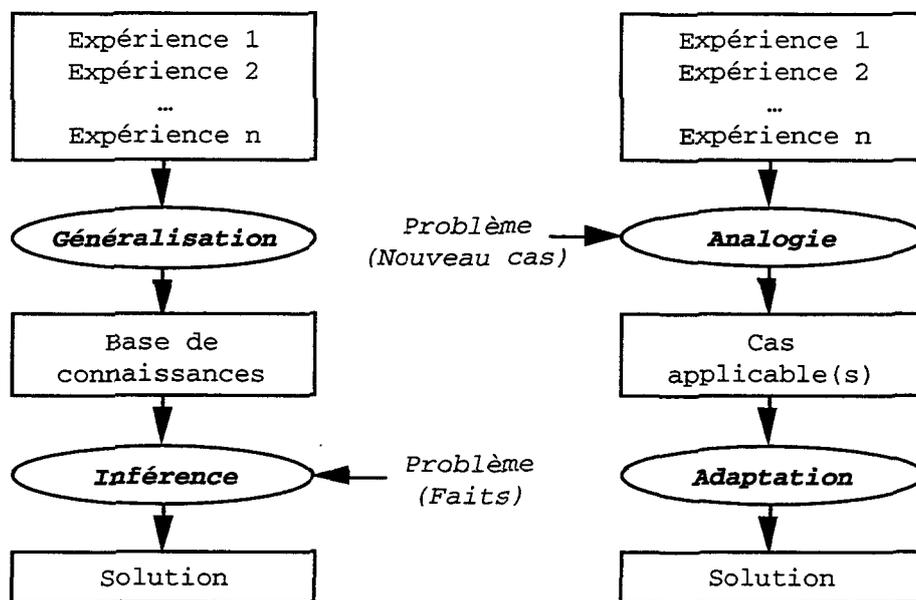


Figure 2.9 — *Raisonnement heuristique vs raisonnement à partir de cas.*

Le RàPC est précisément le mode de raisonnement que nous avons privilégié pour la conception du système d'assistance à la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France présenté dans ce mémoire. Ce choix émerge d'une modélisation préalable des connaissances du domaine d'application. L'objectif du système d'assistance est, non seulement d'apporter une aide efficace au diagnostic et à la planification d'une solution par réutilisation d'expériences passées, mais également de constituer, d'exploiter et de faire évoluer la mémoire collective autour d'une compétence détenue par morceaux par l'ensemble des opérateurs en charge de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Le chapitre 4, consacré à la présentation de la méthodologie de développement du système d'assistance, détaille chacune des étapes du cycle de RàPC.

## 4 Conclusion

Ce chapitre a souligné les apports de la psychologie cognitive et de l'IA, respectivement, pour la caractérisation et pour la représentation des stratégies de résolution de problèmes mises en œuvre, notamment, lors de la supervision des procédés automatisés complexes. Notre volonté est de considérer ces compétences

complémentaires au sein d'une méthodologie interdisciplinaire centrée sur l'homme. L'objectif affiché est de déboucher sur la réalisation d'un système d'assistance accepté, utile et utilisé. Deux grands points ressortent de ce travail bibliographique.

Le premier point concerne l'analyse des stratégies de résolution de problèmes sous l'angle de la psychologie cognitive. Après avoir présenté le point de vue de la psychologie cognitive sur la résolution de problèmes en général, nous focalisons sur les stratégies de résolution de problèmes rencontrées en supervision. Deux tâches fondamentales émergent : le diagnostic du problème et la planification d'une solution. Parmi les stratégies de diagnostic dirigées par des connaissances sur le fonctionnement anormal du procédé, la reconnaissance d'une configuration familière de symptômes se présente comme une méthode de résolution de problèmes prioritaire et efficace pour l'opérateur. De même, la composante ascendante de l'activité de planification d'une solution peut s'appuyer sur une méthode d'évocation d'une solution préexistante. L'intérêt de ces deux méthodes pour la résolution de problèmes en supervision, nous a amené à aborder les composantes psychologiques de la réutilisation des connaissances épisodiques.

L'IA tente de représenter, d'implémenter et de valider les modèles conceptuels du comportement humain identifiés par la psychologie cognitive. En ce sens, le second point dresse un état des contributions de l'IA au développement de formalismes de représentation des connaissances et des raisonnements de résolution de problèmes exploitables pour la réalisation de SBC. Parmi les nombreux modes de raisonnement développés en IA, le raisonnement analogique ou, plus particulièrement, le RàPC présente de multiples facultés pour la capitalisation et la réutilisation de l'expérience.

Cette étude bibliographique va nous permettre d'aborder, d'une part, l'analyse des activités de résolution de problèmes de l'opérateur de supervision confronté au dysfonctionnement ou à une panne du procédé et, d'autre part, la représentation des connaissances analysées au sein d'un système d'assistance à ces activités. En final, cette double préoccupation doit conduire à une meilleure adéquation des modes de représentation des connaissances et des raisonnements aux méthodes de résolution de problèmes effectivement mises en œuvre par l'opérateur. Cette harmonie abonde dans le sens du développement de systèmes d'assistance de qualité.

Le domaine d'application du travail exposé dans ce mémoire concerne la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Le chapitre 3 est consacré à la description de ce cadre applicatif. Après avoir présenté les principaux aspects du réseau téléphonique commuté, nous décrivons l'activité des opérateurs responsables du bon écoulement du trafic téléphonique de l'Île de France, tout en soulevant les difficultés qu'ils rencontrent et auxquelles nous tentons d'apporter des réponses efficaces.

---

## Chapitre 3

# Supervision d'un procédé automatisé complexe : le réseau téléphonique commuté

## 1 Introduction

Les deux premiers chapitres ont introduit l'ensemble des aspects scientifiques pluridisciplinaires relatifs aux domaines de la supervision des procédés automatisés complexes et de la résolution de problèmes. Notre travail s'efforce de les considérer au travers de la définition et de l'application d'une méthodologie de développement de systèmes d'assistance à la supervision fondée sur la capitalisation et la réutilisation de connaissances. Ce chapitre présente la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France qui a servi de support à l'application et à l'évaluation de la méthodologie. Il aborde successivement la présentation du Réseau Téléphonique Commuté (RTC) et la description de l'activité de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.

La présentation du RTC permet de définir les concepts qui seront repris dans les chapitres applicatifs de ce mémoire. Nous commençons par décrire l'organisation générale du réseau et les deux fonctions principales de transmission et de commutation qu'il assure. Le RTC comporte deux aspects bien différents selon le point de vue avec lequel il est abordé. Le premier aspect, de nature physique, est relatif au support de communication qu'il représente. Le second aspect, de nature logique, fait référence aux services de communication acheminés, suivant diverses méthodes, au travers du RTC et à l'origine de flux de trafic variés. Après une présentation des notions d'acheminement et de trafic, nous détaillons les niveaux de gestion du RTC tout en situant l'activité de supervision du trafic téléphonique en temps réel. Enfin, nous introduisons les principales caractéristiques du RTC de l'Île de France, dont la supervision du trafic fait l'objet du volet expérimental de notre travail.

La description de l'activité de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France est décomposée en trois paragraphes. Le premier paragraphe présente le Centre de Supervision du Réseau (CSR) de Paris-Montsouris dont l'une des positions de travail est occupée par les opérateurs en charge de la supervision du trafic téléphonique en temps réel. Le principal outil utilisé par ces opérateurs est le superviseur de trafic. Cet imposant système est chargé de la surveillance des valeurs de mesures effectuées sur les équipements supervisés et représentatives des flux de trafic écoulés par le réseau. Après avoir précisé son rôle et les fonctions qui s'y rattachent, le second paragraphe détaille l'architecture matérielle du superviseur de trafic et le principe d'élaboration des alarmes qualifiées. Le dernier paragraphe décrit les composantes de l'activité de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Pour chacune, nous précisons ses particularités et les difficultés qu'elle pose à l'opérateur. Enfin, nous donnons une typologie des incidents de trafic rencontrés par l'opérateur au cours de son activité.

Le jargon des télécommunications fait référence à de nombreux sigles. Afin de faciliter la compréhension, nous définissons les sigles lors de leur première utilisation. Au-delà, le lecteur pourra se référer à l'index situé à la fin de ce mémoire.

## 2 Présentation du réseau téléphonique commuté

Les réseaux de télécommunications sont parmi les procédés les plus complexes créés par l'homme, à qui ils rendent de nombreux services contribuant à son bien être [Hollocou 91]. Ils sont multiples, fortement maillés, mettent en œuvre des équipements hétérogènes et évolutifs, et offrent des services diversifiés en constante augmentation. Dans notre société, les télécommunications occupent un rôle stratégique, non seulement pour les particuliers, mais aussi pour les entreprises. Elles ont un impact très profond sur l'organisation du travail, la productivité et la compétitivité des entreprises. Un tel statut implique des efforts de conduite importants de la part des Opérateurs<sup>10</sup>. La conduite de tout réseau de télécommunications peut se structurer en quatre couches hiérarchisées, figure 3.1.

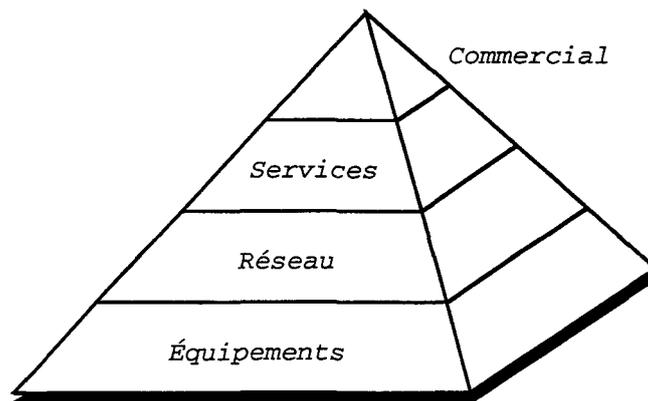


Figure 3.1 — Architecture logique de conduite d'un réseau de télécommunications.

À la base, la couche "**conduite des équipements**" assure la disponibilité de chaque équipement du réseau. La couche "**conduite du réseau**" s'intéresse à l'intégrité du réseau, c'est-à-dire à sa capacité à écouler le trafic pour lequel il a été dimensionné selon un niveau de qualité fixé par l'Opérateur. Elle procure à la couche "**conduite des services**" une abstraction du réseau appropriée à une gestion des services. La couche

<sup>10</sup> Le mot "Opérateur" est employé ici pour désigner l'organisme de télécommunications responsable de la gestion du réseau.

conduite des services se préoccupe de la qualité des services<sup>11</sup> en termes d'accessibilité et de continuité, non seulement en fonctionnement normal, mais aussi, et surtout, en présence de perturbations conséquentes au niveau des équipements ou du réseau. Enfin, la dernière couche inscrit la **politique commerciale**. Avec la généralisation de la concurrence dans le secteur des télécommunications, les Opérateurs évoluent d'une orientation technologique vers une orientation commerciale [Dandelot 93]. Ils ne s'attardent plus aux aspects technologiques, mais se préoccupent davantage des aspects économiques en fournissant des services qui sont mis en œuvre sur des réseaux constitués d'équipements chargés d'écouler les communications. La compétitivité et la satisfaction des clients impliquent des méthodes et des techniques de conduite fiables, performantes et pérennes à chacun des niveaux.

Parmi l'ensemble des réseaux de télécommunications, le RTC reste très nettement majoritaire, tant par son étendue géographique, le volume et les catégories de trafic<sup>12</sup> qu'il écoule, que par le nombre de ses abonnés et de ses équipements [Curien et Gensollen 89]. Cette première partie présente le RTC. Après avoir abordé son fonctionnement du point de vue de l'utilisateur et examiné les grandes fonctions qu'il assure, nous situons la place de la supervision du trafic téléphonique en temps réel dans sa gestion. Enfin, nous focalisons sur les particularités du RTC de l'Île de France, support expérimental de notre travail.

## 2.1 Organisation du réseau téléphonique

Vu par l'utilisateur, le RTC forme un ensemble complexe d'équipements de transmission et de commutation, géré par un Opérateur, figure 3.2. Il est conçu pour permettre à un abonné d'établir une communication téléphonique momentanée avec n'importe quel autre abonné du réseau, quelle que soit la distance qui les sépare.

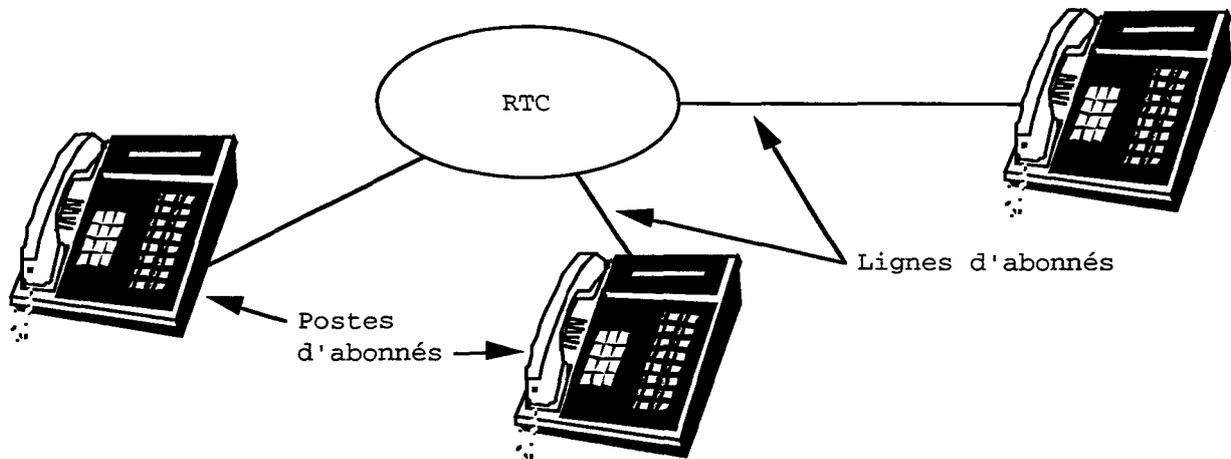


Figure 3.2 — Le réseau téléphonique commuté.

Chaque abonné au réseau est identifié, au niveau international, par une adresse unique. Le mode d'adressage est hiérarchique. Il discerne le pays, le réseau dans le pays et, enfin, le numéro de l'abonné, figure 3.3. Les accès aux réseaux pour les communications nationales et/ou internationales s'effectuent selon un numérotage et une organisation spécifiques au pays. Des préfixes interurbains et/ou internationaux

<sup>11</sup> La qualité des services traduit la capacité de l'Opérateur à offrir ses prestations dans les conditions fixées au préalable avec son client. Elle s'exprime selon divers critères. Ceux-ci sont relatifs à l'attente de tonalité, au taux d'efficacité des communications, au nombre de dérangements, au temps nécessaire pour y remédier, à la fiabilité de la taxation, au taux de coupure des communications en cours, à l'origine des dérangements et à leur étendue. Tous ces critères dépendent, de différentes façons, de plusieurs caractéristiques fondamentales comme l'architecture du réseau, la disponibilité des équipements et la valeur des méthodes et des moyens de la gestion de ce réseau [Bonnet 92].

<sup>12</sup> Il existe de nombreuses catégories de trafic supportées par le RTC. Elles correspondent chacune à un service rendu à l'abonné. Outre la téléphonie classique, citons, par exemple : les renseignements, l'annuaire électronique, la police, les services Audiotel et le Vidéotex.

peuvent précéder le numéro proprement dit. De même, la distinction d'une zone géographique peut devancer le numéro de l'abonné<sup>13</sup>.

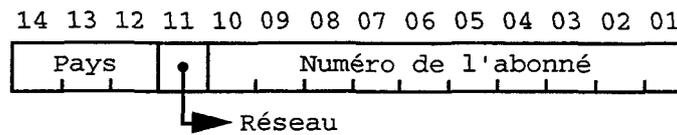


Figure 3.3 — La numérotation téléphonique.

Le RTC peut être envisagé selon trois angles d'approche [Blanquet et Tagredj 90] :

1. **Technique.** Ce point de vue distingue trois fonctions assurées par le RTC :
  - la **transmission**. Elle assure la liaison des commutateurs entre eux à l'aide de circuits de transmission ;
  - la **commutation**. Elle regroupe l'ensemble des commutateurs permettant l'interconnexion temporaire des lignes d'abonnés et des circuits de transmission ;
  - la **distribution**. Cette fonction concerne la liaison allant du poste d'abonné à son commutateur de rattachement via une ligne d'abonné.
2. **Géographique.** Ce niveau distingue les réseaux locaux, relatifs à la fonction distribution, les réseaux de l'Île de France et interurbain, reliant les réseaux locaux entre eux, et le réseau international pour les relations entre les États. Pour les réseaux de l'Île de France et interurbain, on ne parle plus d'abonnés et de distribution, mais on se préoccupe de transmission et de commutation de transit.
3. **Administratif.** Il existe des zones techniques et des zones purement administratives, comme les circonscriptions tarifaires, par exemple. L'examen des zones techniques renvoie à la hiérarchie des commutateurs de la figure 3.5.

Enfin, le RTC recouvre deux réalités de nature bien différente : "services de communication" ou "support de communication". Pour les abonnés, le réseau est avant tout caractérisé par les services qu'il rend. Par exemple, le RTC permet d'échanger des conversations avec de nombreux correspondants. Cette notion est à rapprocher de celle de réseau en tant qu'entité logique. La notion de support se rapporte essentiellement aux moyens de communication, c'est-à-dire aux équipements, matériels et logiciels, de transmission et de commutation mis en œuvre pour constituer le RTC. Ainsi, le RTC, en tant qu'infrastructure, est le support de plusieurs catégories de trafic. Ces réalités accentuent la complexité du procédé.

Nous décrivons maintenant les deux grandes fonctions réalisées par le RTC : la transmission et la commutation. Nous n'aborderons pas la fonction distribution car elle concerne la partie terminale du RTC dont les équipements sont en deçà du niveau de détail de ceux supervisés.

## 2.2 La fonction transmission

La fonction transmission achemine le trafic téléphonique entre les commutateurs via des artères de transmission constituées de **faisceaux de circuits de transmission**.

Les circuits sont les supports physiques de transmission des communications téléphoniques. Ils relient deux commutateurs entre eux et permettent d'écouler le trafic

<sup>13</sup> En France, le numéro de l'abonné est composé de dix chiffres, codés de la façon suivante : 0x AB PQ MC DU, avec  $x \in \{1, 5\}$ . Ainsi, le territoire français constitue un seul ensemble homogène sans préfixes interurbains.

local, interurbain et international. Les supports de transmission utilisés se distinguent, fondamentalement, selon le mode de propagation des signaux qu'ils véhiculent :

- la propagation libre concerne les supports tels que le faisceau hertzien et le satellite géosynchrone ;
- la propagation guidée s'applique aux supports comme la paire symétrique, le coaxial et la fibre optique.

Ces supports sont utilisés quel que soit le système de transmission, analogique ou numérique [Maiman 94]. Les circuits de transmission sont groupés en faisceaux.

Le faisceau est composé de l'ensemble des circuits ayant les mêmes commutateurs d'extrémité. Il constitue un objet logique indivisible pour la supervision du trafic téléphonique. Un faisceau est caractérisé par :

- son commutateur de départ ;
- son commutateur d'arrivée ;
- la catégorie de trafic qu'il achemine ;

Ces trois premières caractéristiques composent le "code SGTQS" propre à chaque faisceau. Par exemple, CC51-RP52 S est le code SGTQS d'un faisceau spécialisé sortant d'un commutateur. Les deux fois quatre premiers caractères renvoient aux codes SGTQS des commutateurs, respectivement, de départ (CC51) et d'arrivée (RP52). Le dernier caractère (S) précise la catégorie et le sens du trafic écoulé par le faisceau, en l'occurrence un trafic de téléphonie classique sortant ;

- sa capacité nominale, suivant le nombre de circuits qui l'équipe, noté FCE ;
- sa capacité effective, suivant le nombre de circuits en service, noté FCS, à l'instant  $t$ , c'est-à-dire potentiellement utilisables par une communication ;
- son trafic écoulé instantané, noté FTT, suivant le nombre de circuits utilisés par les communications à l'instant  $t$ .

Il existe trois ensembles possibles de faisceaux :

1. L'ensemble spécialisé entrant (ou arrivée). Il ne peut être choisi que par le commutateur d'arrivée.
2. L'ensemble spécialisé sortant (ou départ). Il ne peut être choisi que par le commutateur de départ.
3. L'ensemble mixte (ou bidirectionnel). Il peut être choisi par l'un ou l'autre des commutateurs d'extrémité et peut écouler du trafic départ ou arrivée.

L'ensemble entrant dans un commutateur A issu d'un commutateur B, du point de vue de A, est le même que l'ensemble sortant de B vers A, du point de vue de B. Chaque ensemble peut comporter plusieurs faisceaux. Il est possible d'avoir un ou plusieurs ensembles différents de faisceaux entre deux commutateurs.

## 2.3 La fonction commutation

Le commutateur joue, dans le RTC, un rôle fondamental en réalisant deux fonctions essentielles relatives à l'aiguillage des communications dans la direction de l'abonné appelé et à la concentration de trafic pour l'optimisation de la rentabilité des artères de transmission et des organes de commande du réseau. Il existe deux grands types de commutateur : le **commutateur d'abonnés** et le **commutateur de transit**. La figure 3.4 illustre le synoptique d'un commutateur d'abonnés.

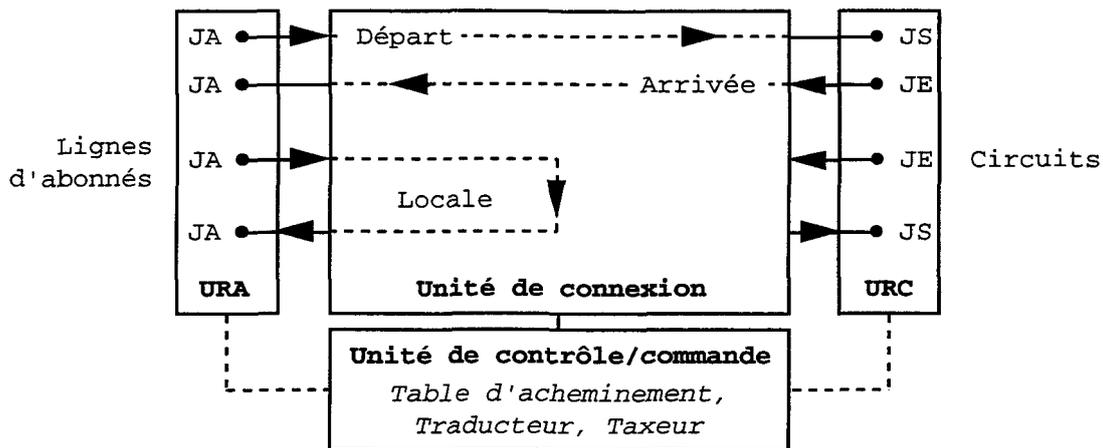


Figure 3.4 — Synoptique d'un commutateur d'abonnés.

Trois composants essentiels apparaissent dans cette figure :

1. Les unités de raccordement des jonctions d'abonnés et des circuits de transmission entrant et sortant.
2. L'unité de connexion ou de mise en relation des lignes d'abonnés et des circuits.
3. L'unité de contrôle et de commande des opérations de commutation.

Le Commutateur d'Abonnés (CA) concentre les lignes d'abonnés. Il permet aux abonnés raccordés à un même CA de communiquer entre eux directement (trafic local) ou d'accéder au réseau de l'Île de France, interurbain ou international. Tout chemin établi pour une communication téléphonique commence et s'achève par un CA. Les rôles joués par un CA sont les suivants :

- Commutateur à Autonomie d'Acheminement (CAA) ;
- Commutateur Urbain (CU) ;
- Commutateur Local (CL). Sans autonomie d'acheminement, il ne peut être relié qu'à un seul commutateur de niveau supérieur (CAA).

Le Commutateur de Transit (CT) concentre les circuits de transmission et permet l'aiguillage des communications à travers les faisceaux. Les principaux rôles joués par un CT sont les suivants :

- Commutateur de Transit Principal (CTP) ;
- Commutateur de Transit Secondaire (CTS) ;
- Commutateur de Transit Urbain (CTU) ;
- Commutateur de Transit de Zone Périphérique (CTZP).

Un commutateur est caractérisé par :

- sa technologie ;
- son rôle dans l'acheminement des communications ;
- son "code SGTQS" exclusif, par exemple : AB96 pour le commutateur d'abonnés Diderot 6 du RTC de l'Île de France ;
- la responsabilité administrative à laquelle il appartient ;
- sa capacité en nombre d'abonnés, pour les commutateurs d'abonnés, et en nombre de communications traitées par heure, pour les commutateurs de transit ;
- des critères internes de bon ou de mauvais fonctionnement.

Une communication entre deux abonnés, selon qu'elle soit locale, régionale, nationale ou internationale, empruntera un chemin physique de complexité très variable. Ce chemin physique est constitué par l'ensemble des circuits et des commutateurs traversés. Compte tenu de l'extrême dispersion des abonnés, les commutateurs du réseau sont structurés selon la hiérarchie de la figure 3.5.

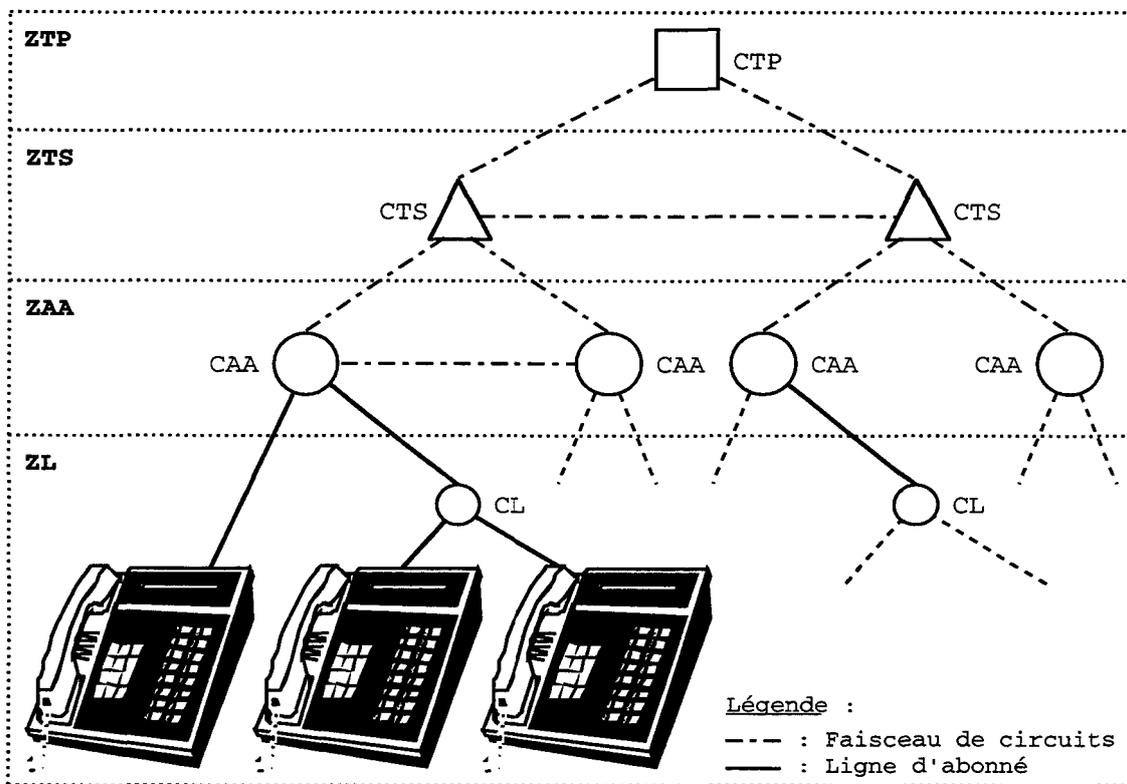


Figure 3.5 — Organisation hiérarchique des commutateurs.

L'organisation hiérarchique des commutateurs est divisée en quatre zones techniques de façon à faciliter la construction, l'extension et l'exploitation du RTC :

1. La Zone Locale (ZL) est une zone technique à l'intérieur de laquelle tous les postes d'abonnés sont rattachés à un ou plusieurs CL.
2. La Zone à Autonomie d'Acheminement (ZAA) comporte un ou plusieurs CAA. Elle peut être composée de plusieurs ZL.
3. La Zone de Transit Secondaire (ZTS) regroupe un ensemble de ZAA et comprend au moins un CTS.
4. La Zone de Transit Principal (ZTP) contient plusieurs ZTS. Elle est gérée par un seul CTP auquel sont rattachés tous les CTS des ZTS<sup>14</sup>.

La fonction d'aiguillage est tenue par l'unité de contrôle et de commande du commutateur. Les méthodes d'acheminement du trafic téléphonique ont connu un net regain d'intérêt ces dernières années [Libois 94]. Elles sont la conséquence des progrès technologiques réalisés dans les algorithmes de contrôle/commande des commutateurs.

## 2.4 Méthodes d'acheminement

Pour permettre l'établissement d'une communication téléphonique, chaque faisceau emprunte un support physique de transmission. Ceci définit le **rouage** de la

<sup>14</sup> La France possède cinq ZTP relatives aux CTP de Paris, Nancy, Rouen, Lyon et Bordeaux. Ces CTP correspondent, respectivement, à la valeur du deuxième chiffre du numéro de l'abonné.

communication, c'est-à-dire son chemin physique. L'**acheminement**, ou chemin logique, précise l'ensemble des informations nécessaires à l'écoulement d'un appel sur une succession de commutateurs et de faisceaux entre le commutateur de départ A et le commutateur d'arrivée B. Pour un service de communication donné, plusieurs acheminements peuvent exister pour une même relation AB. Plusieurs services de communication peuvent également coexister sur un même chemin physique ou emprunter des parties communes à plusieurs chemins.

Il existe deux principes d'acheminement : **fixe** et **dynamique**. L'acheminement fixe est déterminé lors de l'étape de programmation du réseau et ne varie pas jusqu'à la prochaine étape. L'évolution des techniques de commutation permet de reconsidérer ce principe actuel de la gestion du trafic téléphonique et d'introduire des mécanismes d'acheminement dynamiques, plus flexibles. Les deux prochaines sections abordent successivement chacun de ces principes d'acheminement.

### 2.4.1 Acheminement fixe

Pour acheminer une communication téléphonique, chaque commutateur du chemin physique de transmission détermine, en fonction du numéro de l'abonné destinataire et du service de communication demandé, l'acheminement auquel correspond un faisceau sortant. En cas de saturation de ce faisceau de premier choix (absence de circuit de transmission libre), le commutateur tente d'établir la communication à l'aide d'un acheminement de second choix ou de débordement. Lorsque tous les circuits du faisceau de deuxième choix sont saturés, l'appel ne peut aboutir. Il est alors renvoyé vers une bande sonore, appelée "film", signalant l'encombrement du faisceau.

Selon cette méthode d'acheminement fixe à deux choix, chacun des commutateurs successifs du chemin emprunté par la communication détermine, à l'aide de sa **table d'acheminement**, le nœud suivant à atteindre et le faisceau à utiliser. Chaque commutateur détermine donc son choix de chemin physique de façon statique, en fonction de sa vision locale du réseau (saturation ou non de ses faisceaux spécialisés sortants). Il n'adresse que le commutateur suivant sans savoir si l'appel a une chance d'aboutir en final. Ce principe d'acheminement fixe ne permet pas une utilisation optimale des ressources du réseau. À terme, l'introduction de méthodes d'acheminement dynamique, permettra de considérer la qualité et la disponibilité des chemins physiques, et non plus la simple vision locale.

### 2.4.2 Acheminement dynamique

L'acheminement dynamique a pour objectif une utilisation optimale des équipements du réseau en fonction des variations régulières et aléatoires du trafic pour écouler au mieux les appels qui se présentent sur le réseau. En particulier, pour les communications n'ayant aucune chance d'aboutir, il vise à éviter d'immobiliser des capacités potentiellement utilisables par d'autres flux de trafic. Le principe de cette gestion adaptative des appels consiste à modifier en temps quasi réel les tables d'acheminement des appels en fonction de l'état du réseau, c'est-à-dire en fonction de la demande des abonnés et de la charge du réseau, connues à partir des mesures effectuées sur le réseau [Chemouil *et al.* 87], figure 3.6. La fréquence de mise à jour des tables d'acheminement dépend de ces mesures et de la structure de commande de réactualisation des acheminements.

Il existe plusieurs méthodes d'acheminement dynamique [Chemouil *et al.* 87], telles que le **multi débordement** et le **partage de charge**. La méthode de multi débordement consiste à réactualiser, entre deux reconfigurations, la séquence de débordement utilisée par un commutateur. Elle suppose une multiplicité de chemins entre un commutateur origine et un commutateur destination. Une alternative à cette

politique de débordement adaptative est le partage de charge. Son principe consiste à répartir le trafic vers une destination donnée sur plusieurs chemins logiques sans notion d'ordre (premier ou second choix). Les fractions de trafic sont déterminées par un algorithme de répartition de façon à optimiser l'efficacité des appels. Cette méthode d'acheminement dynamique présente un intérêt dans les situations de surcharge et de pannes. D'une part, la répartition de trafic permet de protéger le flux lors de ces événements. D'autre part, il est possible de tenir compte des fluctuations de trafic et de modifier périodiquement la table d'acheminement des commutateurs qui, cependant, reste fixe à l'intérieur des périodes considérées.

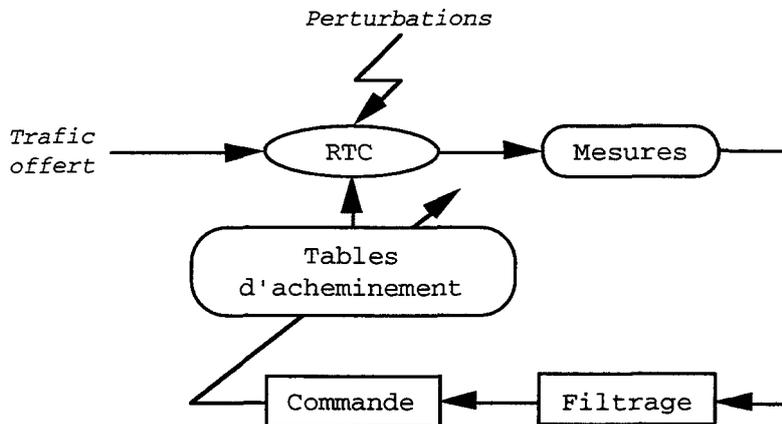


Figure 3.6 — Principe de l'acheminement dynamique.

Actuellement, le principe de l'acheminement fixe prédomine. Toutefois, et pour certaines catégories de trafic, la méthode de partage de charge est progressivement mise en place sur le RTC. Après avoir évoqué les modalités d'acheminement des communications, le prochain paragraphe expose les principaux aspects liés à la notion de trafic téléphonique.

## 2.5 Notion de trafic téléphonique

Le trafic téléphonique, matérialisé par le nombre d'appels des abonnés et la durée des communications, est un élément très important pour, d'une part, prévoir les nouvelles installations et, d'autre part, gérer la sûreté de fonctionnement des équipements et la qualité des services offerts. La notion de trafic téléphonique est perçue par les abonnés au travers de sa fluidité caractérisée par :

- l'attente de tonalité ;
- le temps d'établissement de la communication ;
- le délai de réponse de l'abonné appelé ;
- l'efficacité ou proportion de tentatives d'appels efficaces, c'est-à-dire aboutissant à l'établissement d'une communication téléphonique.

Le dimensionnement des commutateurs est réalisé pour que, d'une part, la probabilité d'attente de tonalité et, d'autre part, le taux de blocage des unités de commande ne dépassent pas un seuil bien spécifié. Ce dernier répond à un compromis entre le coût du réseau et les critères de qualité des services. L'efficacité est déterminée par les causes d'échec qui empêchent un appel d'aboutir à l'établissement d'une communication. Les échecs peuvent être dus à l'occupation ou à la non réponse de l'abonné demandé, mais également à l'indisponibilité d'équipements de commutation et/ou de transmission suite à une perturbation ou à une panne. La planification du réseau, le dimensionnement des commutateurs et des faisceaux de circuits, et la

conduite des équipements, du réseau et des services reposent sur des prévisions ou des observations de l'intensité de trafic écoulé<sup>15</sup>.

Quelles que soient les méthodes appliquées pour son acheminement, la notion de trafic téléphonique est essentielle dans la gestion d'un RTC. Les progrès technologiques, l'évolution de la demande des abonnés et la libéralisation du marché des télécommunications conduisent le RTC à être le support de multiples services [Benzoni et Hausman 93]. Ces services sont à l'origine de nouvelles catégories de trafic qui accroissent continuellement et considérablement le trafic global. Si la création de chacun des services est la preuve d'une indispensable politique d'innovation de la part des Opérateurs, elle ne doit cependant pas nuire à la satisfaction de l'abonné par une diminution de la sûreté de fonctionnement et de la performance globale du réseau. La maîtrise de ces impératifs passe par la mise en place d'une structure efficace de supervision du trafic téléphonique en temps réel. Celle-ci constitue l'une des principales actions de gestion du RTC.

## 2.6 Gestion du réseau téléphonique

La garantie de la qualité des services rendus, de la sûreté de fonctionnement et des performances du RTC, dictée par les enjeux économiques et sociaux qu'il représente, est une priorité pour l'Opérateur du réseau. Celle-ci ne peut s'exercer qu'au moyen d'actions de gestion engagées à des échelles de temps différentes, en fonction du fonctionnement prévisible ou effectif du réseau. Ces actions ne sont pas dénuées de toute contrainte. Leurs objectifs se doublent de la nécessité de minimiser les coûts de gestion du réseau. Actuellement, la gestion du réseau évolue vers une plus grande adaptabilité, permettant d'optimiser l'utilisation des artères de transmission et de garantir une qualité d'écoulement satisfaisante du trafic.

Les actions de gestion du RTC bénéficient des progrès réalisés, d'une part, dans la mesure des paramètres de fonctionnement des équipements et, d'autre part, dans le traitement et la transmission des données correspondantes. Toutes ces données sont rassemblées, agrégées et traitées à divers niveaux d'intérêt. Leur traitement débouche sur plusieurs types d'information : données de disponibilité des équipements, données de trafic et informations nécessaires en retour aux centres opérationnels d'exploitation et commerciaux. Il procure également les critères de qualité des services caractérisant le fonctionnement logique du réseau. Suivant l'échelle de temps, les actions de gestion du réseau prennent une nature différente. Elles sont réparties en trois niveaux fonctionnels [Gheraoui-Hélie et Dufour 95] : stratégique, tactique et opérationnel. Le niveau stratégique s'intéresse aux évolutions du marché à long terme. Les décisions de moyen terme relèvent du niveau tactique, tandis que le niveau opérationnel comprend les activités de supervision du trafic en temps réel et d'exploitation des équipements à très court terme. Nous déclinons successivement chacun de ces niveaux au travers des actions de gestion qu'ils autorisent, figure 3.7.

### 2.6.1 Niveau stratégique

Les activités du niveau stratégique se concentrent sur la décision de mise en œuvre de nouveaux services et sur le redimensionnement du réseau en présageant, d'une part, de l'évolution de la demande et des besoins des abonnés et, d'autre part, des tendances lourdes révélées par les observations de trafic et leur extrapolation. Elles se décomposent en une action de planification et une action de programmation.

<sup>15</sup> L'intensité de trafic représente le produit du nombre de communications écoulées pendant une heure par la durée moyenne d'une communication. L'unité d'intensité de trafic est l'Erlang [Baccelli 93]. Ainsi, si une ligne d'abonné a écoulé 3 communications d'une durée moyenne de 2 minutes pendant une heure, l'intensité de trafic sur cette ligne est de 0,1 Erlang.

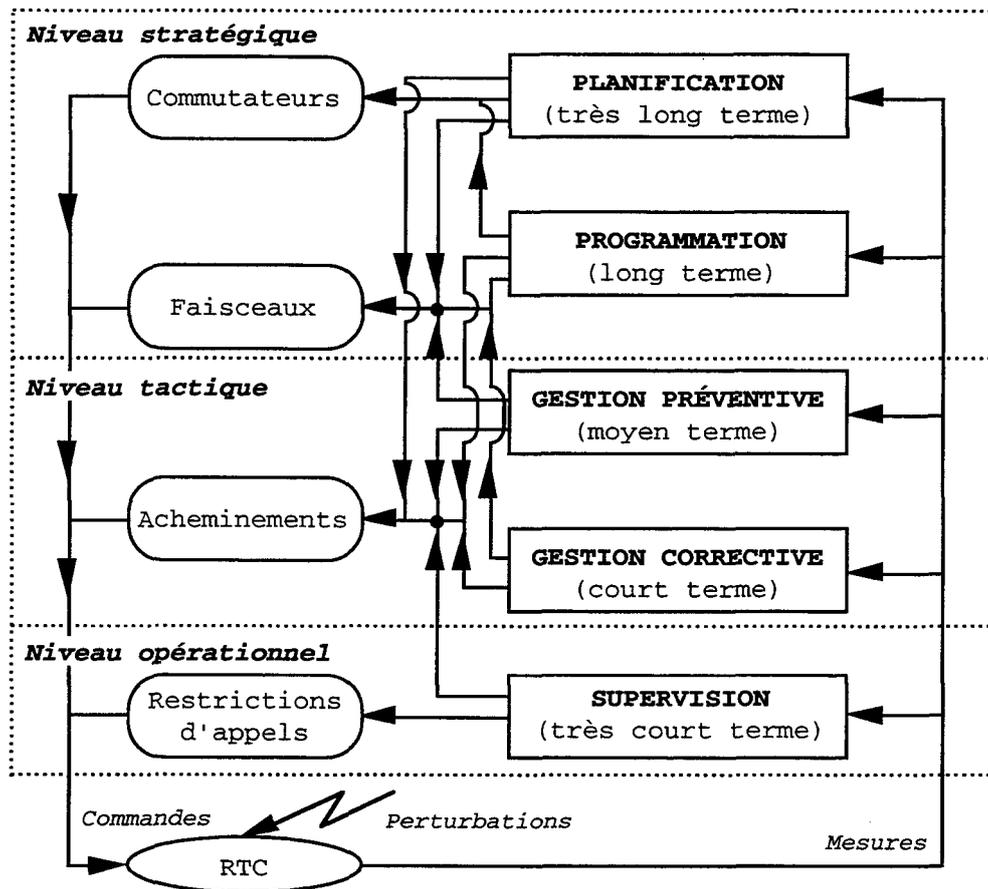


Figure 3.7 — Niveaux de gestion du RTC [Chemouil et al. 87].

### 2.6.1.1 Planification

La planification du réseau est complexe et exige un haut niveau d'expertise. Le problème de la planification est de déterminer les modifications à apporter au réseau existant pour faire face à l'évolution des équipements, à l'accroissement sensible du trafic et à la modification de sa répartition. Les techniques de recherche opérationnelle apportent une aide appréciable à la résolution de ce problème [Arpège 92].

Les plans sont conduits à très long terme sur un horizon de 3 à 10 ans. La première tâche de la planification est d'élaborer une synthèse exhaustive des capacités actuelles du réseau. Puis, en fonction des estimations d'évolution qualitative et quantitative de la demande, de la technologie, des nouveaux services et de la concurrence, la planification produit des propositions de topologie et de dimensionnement ainsi que des spécifications pour les équipements du réseau. Parmi ces spécifications, l'étape de programmation détermine le schéma directeur d'acheminement. Celui-ci précise la majorité des règles d'acheminement du trafic et reflète un compromis entre les critères économiques et de qualité des services. L'évolution du trafic suit des lois probabilistes et connaît des variations normales autour de sa valeur moyenne. C'est le surdimensionnement des faisceaux hiérarchiques de transit qui permet d'absorber ces variations de trafic et qui, en ce sens, constitue la première action de sécurisation du trafic par la prise en compte d'événements prévisibles.

### 2.6.1.2 Programmation

Dans le respect du schéma directeur d'acheminement, cette seconde étape se préoccupe de la programmation des moyens de commutation et du raccordement des commutateurs. Parallèlement, l'étape de programmation se charge du

dimensionnement des faisceaux et de l'adaptation des règles d'acheminement associées. La programmation du réseau répond à un critère de moindre coût en tenant compte du réseau existant et de l'évolution prévisible du trafic. Enfin, des actions sont entreprises au niveau des supports de transmission pour pallier les effets néfastes des pannes. Ces actions concernent, en premier lieu, le multi routage qui permet de sauvegarder une partie des communications en cas de panne d'artères et, en second lieu, la mise en service de supports de transmission de secours prévus pour pallier les défaillances graves du réseau de transmission.

## 2.6.2 Niveau tactique

La mise en œuvre de la stratégie fait entrer la politique de gestion du réseau dans sa phase tactique. Dans des délais de l'ordre d'un mois à quelques mois, différentes actions de réajustement des acheminements et du dimensionnement sont programmées. Au-delà des estimations, les actions tactiques prennent en compte l'évolution effective du trafic. Le niveau tactique distingue les actions de gestion préventive et corrective.

### 2.6.2.1 Gestion préventive

Sur un horizon de quelques mois, les actions de gestion préventive permettent la prise en compte des variations saisonnières du trafic et le réajustement des prévisions à partir de données plus fines. Elles conduisent à l'installation d'équipements supplémentaires, à un redimensionnement partiel de certains faisceaux et à des modifications d'acheminement. Cet affinement constitue la seconde action, également préventive, de sécurisation du réseau. Une dernière action de gestion préventive se charge de dresser un bilan de la qualité des services et de la satisfaction de la clientèle. Il se base sur l'analyse des critères de qualité des services évoqués précédemment, tels que le taux d'efficacité des communications, le nombre de dérangements et le temps nécessaire pour y remédier.

### 2.6.2.2 Gestion corrective

Dans un délai de l'ordre du mois, les actions de gestion corrective constituent le premier jalon de remise en cause des prévisions réalisées au niveau stratégique. Elles bénéficient des enseignements tirés de la supervision du trafic téléphonique en temps différé. Elles reflètent un effet de boucle de type "action-mesure-correction" dans la gestion du réseau. Les actions de gestion corrective concernent le redimensionnement de la taille de certains faisceaux et la modification de quelques acheminements. Elles permettent de corriger l'écart constaté entre le trafic réel mensuel, hebdomadaire ou journalier et la prévision de trafic. La conséquence de ces actions est une réduction de la fréquence des incidents d'écoulement du trafic d'où une minimisation, non seulement du coût économique de ces incidents, mais également de leur impact en terme d'image sur la clientèle affectée.

La supervision du trafic téléphonique en temps différé est chargée d'analyser de façon systématique les circonstances et l'impact des incidents de trafic déclarés sur le réseau. Ses principaux objectifs sont les suivants :

- participer à une meilleure adaptation des équipements du réseau et des règles d'acheminement aux fluctuations réelles des catégories de trafic ;
- dépister les défaillances récurrentes, comme les jeux téléphoniques non déclarés ou les zones d'acheminement chroniquement sous-dimensionnées ;
- ajuster les procédures de diagnostic et d'action exécutées en temps réel de façon à les rendre plus systématiques et plus performantes en termes d'efficacité et de coût ;
- appréhender la façon avec laquelle les clients utilisent les services.

Le dernier niveau de gestion regroupe un ensemble d'activités réalisées, non plus en fonction de prévisions à plus ou moins long terme, mais à partir de mesures effectuées sur le réseau.

### 2.6.3 Niveau opérationnel

Sur un horizon de quelques minutes à plusieurs heures, la gestion opérationnelle du réseau concerne l'ensemble des activités journalières de supervision du trafic téléphonique en temps réel et d'exploitation, ou de maintenance, des équipements qui visent à conserver le réseau dans son mode de fonctionnement nominal avec un niveau de qualité des services satisfaisant pour le client. Ces activités sont caractérisées, respectivement, par des actions de contrôle du trafic et des actions de commande.

#### 2.6.3.1 Supervision du trafic téléphonique en temps réel

Le volet applicatif de notre travail se situe à ce niveau de la gestion du RTC. Lorsque la charge du réseau croît et que le taux d'utilisation des équipements augmente, le réseau se fragilise. La supervision du trafic téléphonique en temps réel consiste à observer en permanence le comportement du réseau pour s'assurer du bon écoulement des communications. La détection d'une dégradation des performances ou d'une panne d'équipement entraîne l'élaboration d'un diagnostic par l'opérateur de supervision. Les décisions qui en résultent donnent lieu à des activités de reconfiguration, de réparation et, si nécessaire et à plus long terme, d'adaptation des capacités du réseau. La seconde partie du chapitre détaille chacune des composantes de cette activité complexe dans le contexte particulier de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.

#### 2.6.3.2 Exploitation des équipements

L'objectif de l'exploitation est de veiller à la disponibilité des équipements du RTC. Cette activité concerne l'ensemble des actions entreprises en vue de fournir, continuer à fournir, modifier et cesser la mise à disposition d'équipements ou de services téléphoniques. En particulier, les décisions prises au niveau de la supervision du trafic téléphonique en temps réel sont appliquées localement sur les équipements de commutation des centres d'exploitation. Les opérations de maintenance préventive et corrective regroupent l'ensemble des actions entreprises pour conserver ou remettre un équipement du réseau dans un état tel qu'il puisse remplir correctement sa fonction.

Les niveaux de gestion décrits dans ce paragraphe interagissent de façon à simplifier le problème global de la gestion du RTC. Les connaissances acquises par chacun d'eux contribuent à consolider une "expertise réseau". Chaque niveau tente de déterminer les actions appropriées pour réagir aux événements considérés. Toutes ces actions sont indispensables pour assurer le fonctionnement adéquat et robuste du RTC. Les niveaux stratégique et tactique sont généralement bien définis et font l'objet de nombreuses recherches [Libois 94 ; Ghernaoui-Hélie et Dufour 95]. Par contre, la gestion opérationnelle ne bénéficie pas de toute l'attention nécessaire [Chemouil *et al.* 87]. Pourtant, il est aisé de concevoir que le RTC ne réagit pas de façon idéale et que la prévision de son fonctionnement à partir de valeurs de référence agrégées ne reflète pas la réalité. La mise en place récente de la supervision du trafic téléphonique en temps réel va dans le sens d'une meilleure prise en compte des perturbations et des pannes qui affectent le RTC.

Le paragraphe suivant focalise sur les principales particularités du réseau téléphonique de l'Île de France qui a servi de support expérimental à notre travail.

## 2.7 Le réseau téléphonique de l'Île de France

De par la quantité de trafic traitée (plus de 20% du trafic total de France Télécom), la variété des catégories de trafic écoulées, la densité de son maillage et la complexité de ses règles d'acheminement, le RTC de l'Île de France constitue une entité spécifique du réseau téléphonique français avec des exigences propres en matière de supervision. Le maillage important offre une multiplicité de chemins et contribue à augmenter la robustesse du réseau face aux variations de trafic. En revanche, il expose le réseau à une probabilité de dysfonctionnements et de pannes plus élevée.

Le RTC de l'Île de France compte près de 7 millions d'abonnés et plus de 80% de son trafic demeure interne, 16% est à destination de la province et 4% va vers l'international. Il comporte 21 commutateurs de transit, 256 commutateurs d'abonnés et, environ, 155 000 faisceaux. Actuellement, l'ensemble des commutateurs et plus de 16 000 faisceaux sont supervisés par les opérateurs du CSR de Paris-Montsouris. Les règles d'acheminement des appels obéissent à diverses contraintes qui sont fonction du type de commutateur et de faisceaux utilisés, du type et de la catégorie de trafic, et de la zone d'acheminement. Trois types de trafic se distinguent en Île de France :

1. Le trafic intra-Île de France.
2. Le trafic interurbain depuis/ou à destination de la province.
3. Le trafic international depuis/ou à destination de l'étranger.

Le réseau se décompose en deux zones d'acheminement : la Zone Urbaine (ZU), composée de Paris et des trois départements de la petite couronne (92, 93 et 94), et la Zone Périphérique (ZP), comportant le reste des départements de l'Île de France (77, 78, 91 et 95). La ZU est découpée en cinq Directions Régionales (DR) : une pour Paris Nord, une pour Paris Sud et une pour chaque autre département. Elle accueille 150 CU partagés en deux groupes A et B. Cette division permet de mieux répartir la charge de trafic sur les CTU de la ZU. Chaque DR possède deux CTU, l'un (CTUA) "voit" les CU du groupe A (CUA), l'autre (CTUB) "voit" les CU du groupe B (CUB). Il existe également de nombreux faisceaux directs inter-CU en ZU du fait de la très forte densité de population. La ZP est partagée en quatre DR correspondant aux départements qui la compose. Chaque DR comprend deux CTZP et 20 à 25 CAA tous raccordés à leurs deux CTZP. Pour atteindre un CAA, une communication emprunte, en général, l'un des deux CTZP de la DR considérée.

Cette densité d'implantation et la variété des types et des catégories de trafic concernés expliquent la complexité des règles d'acheminement des communications en Île de France. Cette complexité structurelle et fonctionnelle fait du réseau téléphonique de l'Île de France un procédé dont la supervision du trafic demande un haut niveau d'expertise.

## 3 Supervision du trafic téléphonique de l'Île de France

Après avoir décrit les principaux concepts relatifs à la structure et au fonctionnement du RTC, nous consacrons cette seconde partie du chapitre à la supervision du trafic qu'il supporte et, plus précisément, à celui de l'Île de France. L'analyse de cette activité de résolution de problèmes et la volonté d'y apporter une aide fiable, efficace et pérenne sont à l'origine de la méthodologie définie dans le prochain chapitre. La partie est structurée en trois paragraphes.

Le premier paragraphe présente le site de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Le second paragraphe décrit l'organisation structurelle et fonctionnelle du principal outil utilisé par les opérateurs de supervision : le superviseur de trafic. Enfin, nous exposons les composantes de l'activité de supervision du trafic téléphonique en temps réel et une typologie des incidents de trafic.

### 3.1 Le Centre de Supervision du Réseau de Paris-Montsouris

Historiquement, chaque équipement du réseau était exploité et maintenu localement par des entités territoriales à la vision très limitée du comportement d'ensemble du réseau. Confrontée à la croissance des services offerts au client, à l'augmentation des volumes de trafic conséquente, à l'extension du réseau et à la complexité des règles d'acheminement, la contrainte de disponibilité et de qualité des services rendus a justifié la création de structures centralisées de supervision [Ungauer 95]. Une des premières réalisations dans le genre est le **superviseur de trafic**, implanté au CSR de Paris-Montsouris, qui offre à l'opérateur une vision globale de l'écoulement du trafic compatible avec les exigences de la tâche de supervision. L'architecture et le principe de fonctionnement du superviseur de trafic sont décrits dans le prochain paragraphe.

L'exploitation du superviseur de trafic et la gestion des modes de fonctionnement anormal du RTC de l'Île de France est prise en charge par une équipe d'opérateurs du CSR de Paris-Montsouris. La continuité de ces activités est garantie par une organisation mixte et cyclique des horaires de travail. Dans les faits, au moins un opérateur est en permanence affecté au contrôle du trafic téléphonique.

Un bref examen de la mobilité du personnel du CSR met en évidence une durée moyenne de séjour de l'ordre de quelques années. Ce constat, qui s'explique en partie par l'intensité, la complexité et la responsabilité de la tâche, induit deux conséquences majeures :

1. Chaque départ constitue une perte d'expertise pour le CSR.
2. Chaque arrivée demande un effort important de formation, non seulement aux spécificités du réseau de la région Île de France et des règles d'acheminement du trafic qui le gouverne, mais aussi aux outils de supervision et de péri-supervision et à l'organisation générale des services impliqués dans la supervision du trafic téléphonique en temps réel.

### 3.2 Le superviseur de trafic

Comme nous l'avons mentionné dans le cadre général, la qualité de la supervision d'un procédé automatisé repose d'abord sur la conception d'un système de surveillance fiable et robuste. La surveillance continue et automatisée des mesures effectuées sur les équipements supervisés du RTC de l'Île de France est assurée, depuis 1992, par le superviseur de trafic. Ce paragraphe détaille ses objectifs, ses fonctions, son architecture et son principe de fonctionnement.

#### 3.2.1 Objectifs et fonctions

Le superviseur de trafic est l'outil essentiel de la supervision du trafic téléphonique en temps réel. Pour garantir l'efficacité de la gestion opérationnelle du réseau, il doit satisfaire plusieurs objectifs :

- restituer une vue globale, fidèle et permanente de l'écoulement du trafic ;

- vérifier le maintien de la qualité du réseau et des services en termes d'intégrité, d'accessibilité et de continuité ;
- mettre en évidence les dégradations ou les pannes le plus tôt possible, avant qu'elles ne soient perceptibles par les abonnés ;
- permettre un diagnostic plus précoce, plus rapide et plus efficace, contribuant à réduire les délais de rétablissement du service en cas d'incident, par la qualification des alarmes et la mise à disposition de procédures d'analyse ;
- permettre, rapidement et précisément, d'informer les clients touchés de l'ampleur et de la durée estimées de la perturbation.

Ces objectifs s'inscrivent dans une double préoccupation : le maintien de la fourniture des services au client et la maîtrise des coûts d'exploitation. Pour y contribuer, le superviseur de trafic permet d'accéder à plusieurs fonctions pour :

- collecter l'ensemble des données significatives de l'état du réseau, émises périodiquement par les équipements supervisés ;
- traiter les données rapatriées et calculer les indicateurs d'état du réseau ;
- afficher l'état synthétique du réseau ;
- définir et déclencher, le cas échéant, par ordre de gravité, les alarmes qualifiées ;
- activer à distance les actions de reconfiguration du réseau<sup>16</sup> ;
- assurer, par l'observation de leurs effets sur le comportement du réseau, le suivi des actions de sauvegarde, de correction et de retour à la configuration initiale du réseau. Celles-ci sont, en l'état actuel, décidées par les opérateurs de supervision et déléguées aux opérateurs d'exploitation.

### 3.2.2 Architecture et principe de fonctionnement

Le superviseur de trafic est construit autour d'un système central de supervision relié à différents équipements frontaux des objets supervisés du réseau. La figure 3.8 présente l'architecture répartie du superviseur de trafic. Certains composants de cette architecture se trouvent au CSR de Paris-Montsouris tandis que d'autres sont déportés dans les Centres Principaux d'Exploitation (CPE).

Le **Système Central de Supervision (SCS)** constitue le "cœur" du superviseur de trafic. Ses matériels et logiciels sont hautement sécurisés et dupliqués. Le SCS opérationnalise les fonctions du superviseur de trafic. Il est associé à des bases de données où sont caractérisés les commutateurs et les faisceaux supervisés ainsi que les modalités d'acheminement des communications.

Chaque **Poste de Travail Local (PTL)** comporte trois consoles graphiques. Il représente l'interface de communication entre l'opérateur de supervision et le SCS. Le PTL permet la visualisation des informations traitées par le SCS, l'émission de requêtes et l'accès à la base de données interne du superviseur de trafic.

Les informations traitées par le SCS sont diffusées dans la salle de supervision sur un **Écran Mural (EM)** formé de trois panneaux. Ces panneaux présentent la liste des alarmes qualifiées, selon leur niveau de gravité, une vue graphique des objets du réseau perturbés ou non, et une vue graphique de l'état des équipements frontaux (ou stations terminales). L'opérateur sélectionne lui-même les objets supervisés qu'il souhaite voir afficher. La visualisation de ces informations permet à l'opérateur d'avoir une image synthétique et immédiate de l'état du réseau.

La **Station Terminale (ST)** est un composant déporté du superviseur de trafic et installé à proximité des commutateurs. De façon cyclique, elle traite et met en forme les

<sup>16</sup> Ces actions activables depuis le superviseur de trafic sont appelées des "Relations Homme-Machine" (RHM) dans le domaine des télécommunications. Bien qu'opérationnelles, elles n'entrent pas dans le champ des prérogatives actuelles de l'opérateur de supervision.

mesures fournies par les unités de contrôle et de commandé des commutateurs. La station terminale permet au SCS d'avoir une vision uniforme des différents objets supervisés, qu'il s'agisse de la remontée des données brutes ou des commandes de télémaintenance.

Le **Poste de Consultation Distant** (PCD) fournit aux opérateurs d'exploitation des informations sur les commutateurs et les faisceaux supervisés leur facilitant ainsi l'analyse des incidents de trafic.

Enfin, le **Terminal Imprimant** (TI) procure aux opérateurs d'exploitation une trace des anomalies détectées par le SCS et des actions de maintenance effectuées sur les commutateurs. Il existe un TI par commutateur supervisé.

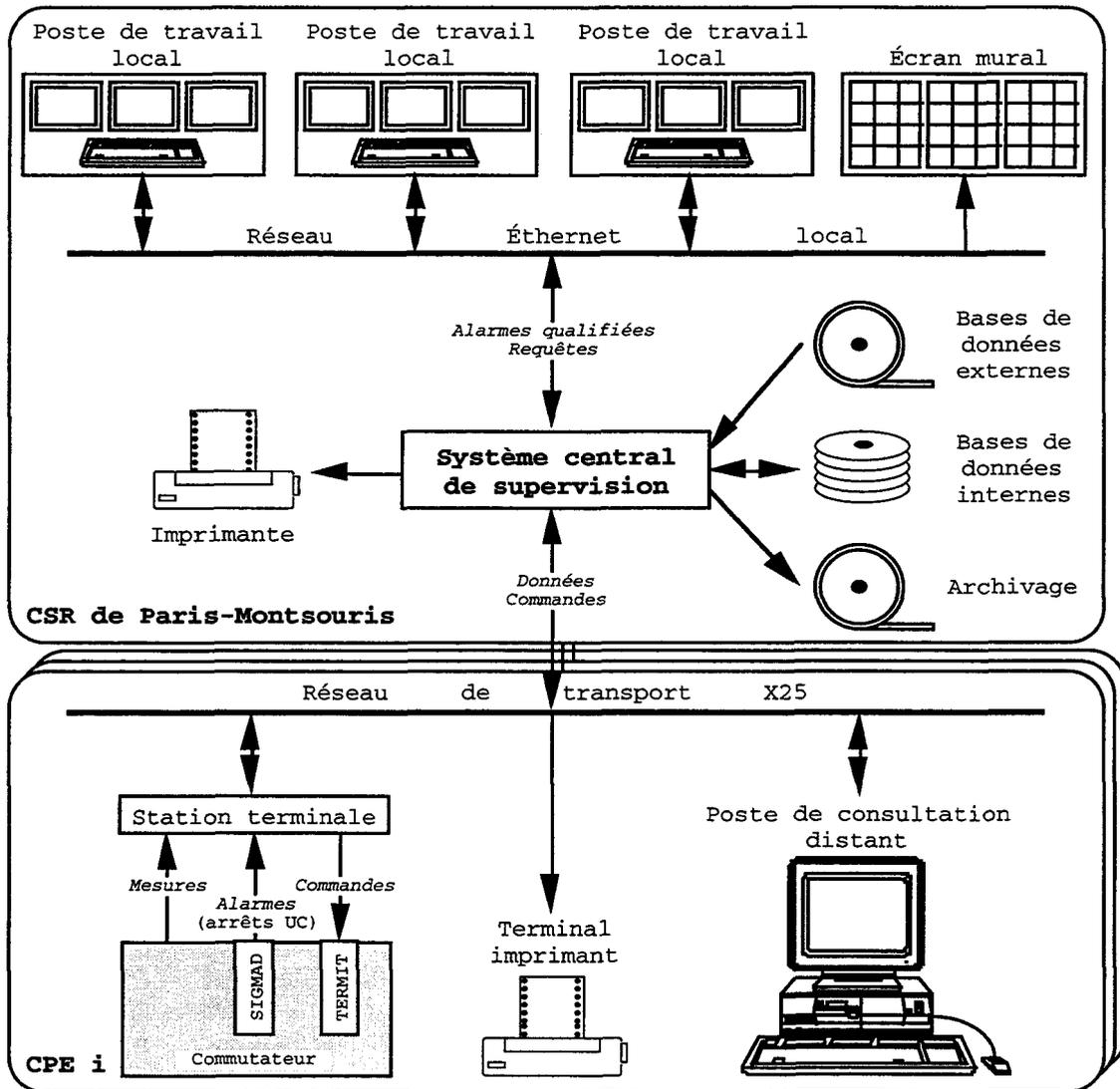


Figure 3.8 — Architecture répartie du superviseur de trafic.

En complément du superviseur de trafic, le CSR abrite une panoplie d'outils informatiques complémentaires, dits de "péri-supervision" : ALFA, BDIR, DIESE, EXPERVISSEUR, VIOLETTE et Journal de Bord. L'outil "ALarmes sur les FAisceaux" (ALFA) permet de visualiser dynamiquement tous les faisceaux en alarme d'un commutateur. Cette fonction peut être étendue à des listes de faisceaux présélectionnés. La "Base de Données Image Réseau" (BDIR) centralise les caractéristiques des objets supervisés du réseau, les règles d'acheminement, les catégories de trafic et les faisceaux de débordement. Elle contient également les

coordonnées des correspondants trafic présents dans chaque CPE. L'outil de Diffusion d'Informations aux Exploitants Sur l'Écoulement du trafic (DIESE) délivre, par le biais du TI, des informations sur l'état des faisceaux aux opérateurs des CPE. La nature des informations fournies dépend des requêtes effectuées par l'opérateur de supervision. Le système EXPERVISEUR détecte les incidents de trafic nécessitant une intervention à partir des règles d'acheminement, exprimées sous la forme de règles de production. Le système VIOLETTE est utilisé par les opérateurs de supervision pour observer le comportement des commutateurs à distance et pour retrouver les numéros d'abonnés pollueurs. Enfin, les incidents détectés et traités en temps réel sont relatés par les opérateurs sous la forme de fiches d'incident structurées, à leur tour consignées dans l'application Journal de Bord (JdB). Cette application est ensuite utilisée par les opérateurs chargés de la supervision du trafic téléphonique en temps différé.

Cette présentation montre que les outils de péri-supervision se cantonnent à des tâches de détection d'incidents ou de mise à disposition d'informations fondées sur des connaissances du domaine et non sur l'expertise de supervision. Ils ne procurent pas de diagnostics des situations perturbées et *a fortiori* de plans procéduraux susceptibles d'aider l'opérateur de supervision. Les deux prochaines sections précisent le principe de base de l'élaboration d'une alarme qualifiée par le superviseur de trafic.

### 3.2.2.1 Données brutes et indicateurs calculés

Périodiquement, les ST élaborent et transmettent, en direction du SCS, deux types de données brutes. Les données relatives aux commutateurs et celles liées aux faisceaux. La transmission se fait toutes les 15 secondes pour les données de commutation et toutes les 4 minutes pour les données de transmission. Les données exploitées par le SCS sont les suivantes :

- **pour chaque commutateur supervisé** : trafic total entrant (TTE), trafic total sortant (TTS), charge de l'unité de commande A ou B (UCA ou UCB), charge des enregistreurs (EN), nombre d'appels présentés (AP), nombre de premières prises en sortie ou de prises efficaces (AJ) et nombre d'appels libérés (AL) sur encombrement ou panne interne ;
- **pour chaque faisceau supervisé** : nombre de prises (FP), nombre d'appels efficaces (FAE), trafic écoulé (FTT), occupation totale ou plus de circuits disponibles (OT), nombre de circuits équipés (FCE), nombre de circuits en service (FCS), nombre de premières tentatives de prise (F1T) et nombre de prises efficaces (FT).

À partir des données élémentaires sur les commutateurs et les faisceaux, le SCS calcule les indicateurs de l'état de l'objet supervisé. Les indicateurs de commutation et de transmission sont les suivants :

- **pour chaque commutateur supervisé** : taux de charge d'une unité de commande (TUC), taux d'appels libérés ou d'encombrement (TAL), taux de perte interne en trafic (TPT), taux de perte interne en appels (TPA), taux d'occupation, taux d'efficacité, taux d'échec, arrêt DUPLEX détecté (ADD) et arrêt SIMPLEX détecté (ASD) ;
- **pour chaque faisceau supervisé** : taux de débordement (DBM), taux de tentatives de prises avec réponses (TTPR), taux de prises avec réponses (TPR), nombre de prises par circuit et par heure (PCH), nombre de tentatives de prises par circuit et par heure (TCH), durée moyenne d'occupation par prise (DOMP), charge par circuit (RDT) et taux de circuits hors service (CHS).

Par exemple, le taux du déficit en appels pour un commutateur (TPA), au cours d'un temps  $t$ , est calculé en effectuant la différence entre le nombre d'appels présentés (AP) et le nombre de prises en sortie (AJ) par rapport au nombre d'appels présentés :

$$TPA = \frac{\sum_t (AP - AJ) \times 100}{\sum_t AP}$$

La valeur d'une donnée brute ou d'un indicateur peut être consultée par l'opérateur de supervision à l'aide du PTL, soit sous sa forme instantanée, soit sous la forme d'une courbe d'évolution, sur une période de temps donnée. La corrélation des tendances de certains indicateurs peut traduire une évolution alarmante du trafic et fournir des indications quant à l'origine de la perturbation [Herrmann-Tellouck *et al.* 89]. Les données brutes et les indicateurs calculés sont utilisés par le SCS pour la construction des alarmes qualifiées.

### 3.2.2.2 Élaboration d'une alarme qualifiée

L'infrastructure du réseau comporte deux types d'objets supervisés : le commutateur et le faisceau de circuits. À tout instant, chaque objet supervisé possède un état unique, dont la valeur courante exprime son état de fonctionnement en termes de qualité et de quantité de trafic écoulé. À partir des données brutes et des indicateurs calculés, l'opérateur de supervision élabore des fonctions logiques de façon à détecter, voire anticiper, les états de fonctionnement anormal de tel ou tel objet supervisé dont il souhaite être averti. Une fonction logique est appelée **fonction d'état**.

À chaque état d'un objet supervisé, c'est-à-dire à chaque fonction d'état, est associée une **alarme qualifiée**. Une alarme qualifiée est caractérisée par son numéro, son libellé, un degré d'urgence de rétablissement du service affecté et un choix de couleur représentatif de sa gravité, effectué parmi une hiérarchie prédéfinie. Le degré d'urgence de rétablissement du service mesure l'impact immédiat de l'incident sur le service et le réseau. Il dépend du niveau de gravité de l'incident détecté. Le tableau 3.1 précise la désignation des cinq niveaux de gravité utilisés par les opérateurs de supervision.

Niveaux de gravité	Désignation
Indéterminé	Détermination impossible du niveau de gravité
Alerte	Détection d'une faute potentielle Effets non encore significatifs sur la qualité de service
Mineur	Actions de sauvegarde et corrective nécessaires
Majeur	Actions de sauvegarde et corrective urgentes nécessaires
Grave	Actions de sauvegarde et corrective immédiates nécessaires

Tableau 3.1 — Niveaux de gravité d'un incident de trafic.

Le superviseur de trafic distingue trois degrés d'urgence du rétablissement potentiel pour une alarme qualifiée : alarme à intervention immédiate (AIM), alarme à intervention différée (AID) et alarme sans intervention (ASI). La persistance, pendant une durée fixée par l'opérateur, du dépassement des seuils précisés par la fonction d'état provoque l'affichage des caractéristiques de l'alarme qualifiée sur le PTL et l'écran mural du superviseur de trafic. Le tableau 3.2 présente la fonction d'état et l'alarme qualifiée relatives à la "Perte d'appels sur un CT". La fonction logique définie par la fonction d'état doit être lue : "Si  $AP > 5$  ET  $TPA > 10\%$  OU  $AL > 5$  Alors Perte d'appels sur le commutateur de transit considéré".

FONCTION D'ÉTAT					
Numéro d'alarme	Numéro d'état	Conditions sur les indicateurs			Sens de lecture
		AP	AL	TPA	
1947	13	>5	-	>10%	→ ET
1947	13	-	>5	-	↓ OU
ALARME QUALIFIÉE					
Numéro d'alarme	Libellé	Degré d'urgence	Couleur		
1947	Perte d'appels	AIM	Rouge		

Tableau 3.2 — Fonction d'état et alarme qualifiée "Perte d'appels sur un CT".

Les fonctions d'état sont construites à partir, d'une part, des corrélations mentionnées dans la section précédente et, d'autre part, de l'expertise de supervision des opérateurs. La rigueur de cette tâche est indispensable à l'amélioration de la qualité des services et à l'augmentation de l'efficacité du trafic. Elle exige de la part des opérateurs une parfaite connaissance de la structure et du comportement dynamique du réseau.

Pour permettre une supervision plus fine de certains types d'objets ou de certaines catégories de trafic, le superviseur de trafic utilise la notion de **famille d'objets**. Par exemple, la famille des commutateurs de traitement annuaire, la famille des faisceaux de second choix sortant d'un CT ou encore la famille des faisceaux Téléthon. À une famille d'objets correspond une **classe de fonction d'état** particulière élaborée selon les mêmes modalités que celles utilisées pour les objets supervisés. La description des moyens humains et techniques de l'activité de supervision du trafic téléphonique en temps réel nous permet d'en aborder les composantes.

### 3.3 La supervision du trafic téléphonique en temps réel

Le principal objectif des opérateurs de supervision est de veiller continuellement au bon écoulement du trafic téléphonique au travers du réseau. Le respect de cet objectif, lors d'un fonctionnement anormal, conduit l'opérateur à mener plusieurs activités de natures différentes. L'exposé de ces composantes est le premier résultat d'un travail de recueil des données de l'expertise de supervision effectué au CSR de Paris-Montsouris. Pour chacune des composantes présentées, nous précisons les difficultés qu'elle soulève pour l'opérateur.

#### 3.3.1 Composantes de l'activité

Le fonctionnement normal du RTC étant entièrement automatisé, l'essentiel de l'activité de l'opérateur de supervision concerne la gestion des modes de fonctionnement défectueux. Dans de telles situations, la supervision du trafic téléphonique se décompose de la façon suivante [Caulier et Perron-Bouvier 94b] :

1. Détection d'une situation anormale.
2. Diagnostic de l'incident de trafic.
3. Planification des actions.

La figure 3.9 présente l'enchaînement de ces composantes à la suite de l'étape de surveillance assurée par le superviseur de trafic. La première composante relève essentiellement d'une activité d'exécution alors que les deux suivantes correspondent à des activités créatives de résolution de problèmes. Ces dernières sont menées selon le point de vue de l'opérateur sur la résolution de problèmes. La prise en compte de la notion de point de vue est essentielle dans la perspective du développement d'un système d'assistance à la supervision. Elle fait l'objet d'une approche spécifique de modélisation et de représentation développée dans le prochain chapitre.

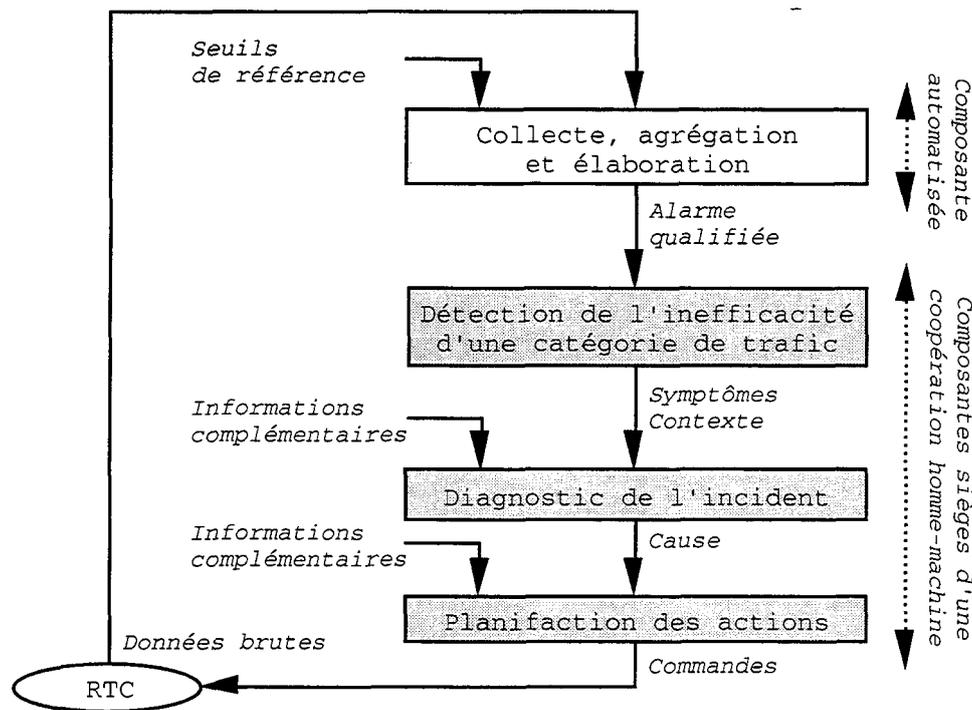


Figure 3.9 — Organisation des composants de la supervision du trafic téléphonique.

Par la réduction de l'impact des défaillances ou des pannes sur le trafic, l'activité de supervision du trafic téléphonique en temps réel participe à l'amélioration du niveau global de la qualité des services et donc à la diminution des coûts d'exploitation du réseau.

### 3.3.1.1 Détection d'une situation anormale

L'activité de supervision consiste d'abord en un suivi, continu et actif, de la qualité de l'écoulement du trafic. De par sa vision globale du réseau, l'opérateur est amené, en l'absence de perturbation déclarée et par un comportement proactif, à tenter d'anticiper des problèmes non décelés au niveau des CPE et susceptibles d'être, à terme, à l'origine d'incidents de trafic. Cette activité repose sur l'observation des valeurs des données brutes et des indicateurs calculés ainsi que sur une analyse de leur évolution.

Confronté à l'affichage d'une alarme qualifiée par le superviseur de trafic, l'opérateur commence par l'acquiescer. Lorsque le degré d'urgence de rétablissement du service affecté nécessite une intervention sur le réseau, l'opérateur s'attache, par un comportement réactif, à recenser l'ensemble des informations relatives à la déclaration de l'incident, tel que le type et la catégorie de trafic touché ou l'équipement du réseau en cause. En complément, l'opérateur prend en compte les données du contexte de l'incident. Celles-ci correspondent à un ensemble de considérations descriptives de l'environnement de l'incident qui conduit, dans l'étape de diagnostic, à qualifier de façon différente tel ou tel descripteur symptomatique de l'incident. À l'instar du point de vue, la prise en compte de la notion de contexte par un système d'assistance est indispensable au traitement efficace des problèmes. Dans le chapitre 4, nous abordons également la modélisation et la représentation du contexte d'un problème. À la détection d'un incident de trafic succède son diagnostic.

### 3.3.1.2 Diagnostic d'un incident de trafic

Dès la détection de l'incident, l'opérateur doit comprendre l'état dégradé du trafic. Cette activité de compréhension des symptômes de l'incident vise, non seulement à en

établir la cause, mais aussi à en apprécier les conséquences sur l'écoulement du trafic de façon à les minimiser. Pour cela, l'opérateur essaie d'évaluer la durée probable de l'incident et la partie du réseau affectée.

La construction du diagnostic de l'incident s'effectue de façon autonome. Sur les bases de son expérience et du modèle mental qu'il a du réseau, l'opérateur émet certaines hypothèses de défaillance ou de panne qu'il va s'efforcer d'évaluer. La confirmation ou l'infirmité des hypothèses s'appuie sur une activité de recherche d'informations. Les événements relatifs aux comportements prévus de certains équipements du réseau permettent d'orienter la recherche d'informations.

L'opérateur consulte la valeur et l'évolution de variables caractéristiques du réseau, disponibles auprès du superviseur de trafic. Le choix des variables caractéristiques dépend des hypothèses émises et donc de la nature de l'incident. Ainsi, pour un problème de saturation d'un faisceau, l'opérateur s'intéresse à la capacité du faisceau, à l'intensité et à la catégorie du trafic écoulé, et au type du faisceau (premier ou second choix). Pour un problème d'inefficacité d'un faisceau, l'opérateur se préoccupe plutôt du nombre de prises et du nombre d'appels efficaces. Enfin, pour un problème de dégradation d'un faisceau, l'opérateur examine le nombre de circuits en service par rapport au nombre de circuits équipés.

Pour compléter son exploration, l'opérateur peut avoir recours aux outils de péri-supervision et/ou au guide de traitement des alarmes en temps réel. Cependant, et comme nous l'avons vu précédemment, les outils de péri-supervision ne proposent pas de diagnostic proprement dit. Quant au guide de traitement des alarmes en temps réel, il est du domaine de la tâche prescrite et donc généralement peu pertinent pour rendre compte de la variété des incidents de trafic.

L'observation en situation des opérateurs de supervision a permis de constater que, pour un opérateur peu expérimenté, il était parfois difficile d'élaborer un diagnostic à partir des seules informations fournies par le superviseur de trafic ou les outils de péri-supervision. Face à cette situation et dans les limites de ses possibilités et des moyens dont il dispose, l'opérateur tente de réutiliser les connaissances relatives au traitement d'un incident similaire passé [Caulier et Perron-Bouvier 94a]. Dans la différenciation des incidents candidats, les descripteurs symptomatiques et contextuels, véhiculant une grande quantité d'informations, jouent un rôle important. La réutilisation de connaissances s'apparente à la méthode de résolution de problèmes par reconnaissance de configuration présentée au chapitre précédent. Elle s'avère être une méthode de résolution de problèmes très efficace et souvent mise en œuvre en priorité par les opérateurs. Toutefois, elle reste tributaire des contraintes suivantes :

- un même opérateur ne traite qu'une partie des incidents de trafic ;
- les capacités de mémorisation et de récupération de l'opérateur sont limitées ;
- les informations archivées relatives aux incidents traités sont, en l'état actuel, incomplètes et imprécises ;
- l'archivage n'est pas organisé dans un but d'assistance au diagnostic.

Au cours de son activité de diagnostic, l'opérateur peut, en heure ouvrable, solliciter le concours du (ou des) correspondant(s) trafic du (ou des) CPE concerné(s) par l'incident. Pour émettre de nouvelles hypothèses ou pour confirmer son diagnostic, il cherche alors à obtenir des informations plus fines sur l'état de tel ou tel équipement du réseau impliqué dans l'incident. Dans les cas d'incident majeur ou grave, l'opérateur de supervision est assisté par des spécialistes de l'organisation topologique du réseau et des règles d'acheminement du trafic en Île de France, réunis en cellule de crise.

De la justesse des conclusions de l'activité de diagnostic dépend l'efficacité du traitement de l'incident. La pertinence de l'information et les moyens d'y accéder jouent donc un rôle essentiel dans le succès de cette activité. Dans les faits, le processus de diagnostic n'est pas isolé. Il s'intègre dans l'activité globale de supervision avec le risque d'être perturbé par l'arrivée d'incidents supplémentaires, de gravité et de priorité différentes.

### 3.3.1.3 Planification des actions

Lorsque la cause de l'incident est déterminée et ses conséquences cernées, l'opérateur construit un plan procédural d'action dont le but premier est de pallier les conséquences négatives de l'incident sur le trafic avant de remédier à la cause originelle. En effet, conformément aux prérogatives de sa tâche, l'opérateur a en priorité la charge d'assurer le bon écoulement du trafic et non de veiller à la sûreté de fonctionnement du réseau physique. La planification d'une solution à l'incident est donc tournée vers le traitement palliatif de ses conséquences sur le trafic et non vers le traitement curatif de sa cause. La démarche de construction d'un plan de sauvegarde du trafic suivie par l'opérateur peut prendre deux chemins différents :

1. Évocation d'un plan préexistant.
2. Élaboration d'un plan nouveau.

Le premier chemin, généralement privilégié par l'opérateur, s'inscrit dans une logique naturelle de réutilisation. Au cours de son expérience, l'opérateur a mémorisé des solutions d'incidents qu'il a eu à traiter ou dont il a pris connaissance dans des comptes rendus d'incident, ou encore au travers de sa formation. Ces solutions ont été stockées en mémoire épisodique et font partie du savoir individuel. De telles solutions "préexistantes" peuvent être récupérées en mémoire pour traiter l'incident courant. Pour pouvoir être appliquée au contexte du nouvel incident, la solution récupérée devra être "contextualisée", c'est-à-dire adaptée au problème actuel. Selon l'heure, ouvrable ou non, à laquelle se produit l'incident, les procédures de traitement ne sont forcément pas identiques. Cette adaptation peut demander à nouveau une méthode de résolution de problèmes. Aucune solution n'est donc développée sans une certaine activité de traitement. Toutefois, les solutions qui peuvent être évoquées sont à distinguer des solutions qui doivent être construites. Les premières demandent, en effet, bien moins de traitements que les dernières. Sources d'économie cognitive, elles sont récupérées en l'état, en mémoire, grâce aux indices qu'elles entretiennent avec l'incident courant. Si un incident ne possède pas d'indices, même indirects, avec une solution préexistante sa résolution est menée à partir d'une certaine théorie du domaine. Dans ce cas, il y a construction d'un nouveau plan.

Les actions planifiées sont de différentes natures :

- actions de sauvegarde du trafic ;
- actions d'information à l'attention de la hiérarchie et de la clientèle touchée par l'incident ;
- actions de retour à la configuration initiale du réseau.

Les actions de conservation du trafic amènent à reconfigurer le réseau, c'est-à-dire à forcer l'organisation physique de façon à "contourner" les équipements défectueux, dans le but de continuer à accomplir la mission. Il existe plusieurs possibilités de reconfiguration du réseau dont les performances varient selon le type de perturbation et les critères de comparaison utilisés, citons, par exemple :

- la modification des tables d'acheminement. Le trafic est aiguillé temporairement vers des chemins non affectés par l'incident et possédant les ressources adéquates et disponibles pour écouler la catégorie de trafic concernée ;
- le filtrage des appels. Son objectif est d'éviter au trafic inefficace, n'ayant aucune chance d'aboutir, de créer un engorgement du réseau. Il consiste en une restriction, sur les faisceaux de premier choix et/ou de second choix, d'un certain pourcentage des appels de la catégorie de trafic touchée, de façon à rendre le flux des communications moins dense ;
- la mise sur une bande sonore d'encombrement.

En cas de crises graves, des plans de sauvegarde préétablis (CRISTEL, si CRISe TÉLÉphonique ou CRISTRAF, si CRISe de TRAFic) précisent, en fonction du type et de la catégorie de trafic affectés, les réacheminements à mettre en œuvre.

L'opérateur de supervision mène également des actions d'information. Il identifie les clients affectés par l'incident et transmet aux services chargés des relations avec la clientèle, les données utiles à leur information : le niveau de gravité de l'incident, le type et la catégorie de trafic touchés ou bien encore la durée de la perturbation. Il informe aussi sa hiérarchie et les opérateurs des CPE sur l'évolution de la situation.

Suite à la disparition des symptômes de l'incident, l'opérateur de supervision décide et contrôle le retour progressif à la configuration initiale du réseau. En effet, les actions de sauvegarde du trafic conduisent à modifier la programmation des acheminements. De façon à maintenir une gestion cohérente du réseau, des actions de retour au mode de fonctionnement nominal du réseau sont indispensables. Elles concernent l'annulation des mesures conservatoires et la vérification de l'absence de problèmes subsidiaires.

À la démarche de construction d'un plan succède la démarche d'exécution des décisions prises. L'exécution effective des actions de sauvegarde du trafic et de retour à la configuration normale du réseau est déléguée aux opérateurs des CPE concernés. À partir du diagnostic transmis par les opérateurs de supervision, les opérateurs des CPE se chargent également des actions correctives. Les opérateurs du CSR se préoccupent de l'ordonnancement des actions, du suivi de leurs effets sur le trafic et, le cas échéant, décident des ajustements nécessaires.

Enfin, tout au long du traitement d'un incident, l'opérateur renseigne les rubriques d'une "fiche historique" décrivant essentiellement le contexte de l'incident, son diagnostic et les actions entreprises pour le traiter. Le contenu de la fiche vient ensuite enrichir la base de données de l'application JdB.

Avant de conclure ce chapitre, nous complétons cette description des composantes de l'activité de supervision par la définition d'une typologie des incidents de trafic auxquels l'opérateur doit faire face.

### 3.3.2 Typologie des incidents de trafic

Au cours de son activité l'opérateur de supervision est amené à gérer de nombreuses situations d'écoulement anormal du trafic. Ces dernières peuvent être catégorisées selon leur origine. La figure 3.10 présente une typologie des incidents de trafic.

Les **pannes d'équipement** concernent les deux fonctions principales remplies par le réseau. Les pannes de **commutation** résultent d'une diminution de la capacité de traitement d'un commutateur comme, par exemple, l'arrêt total ou partiel de ses unités de commande. Une panne d'équipement de **transmission** affecte simultanément la capacité de plusieurs faisceaux transportés sur les mêmes supports. Ces pannes

d'équipement ont des origines multiples très perturbatrices. Elles sont prises en compte par des actions de réacheminement du trafic permettant d'absorber au mieux la dégradation des performances en attendant le basculement éventuel sur des équipements de réserve. Cette réaffectation a pour but d'assurer un service équitable pour les flux affectés par la panne.

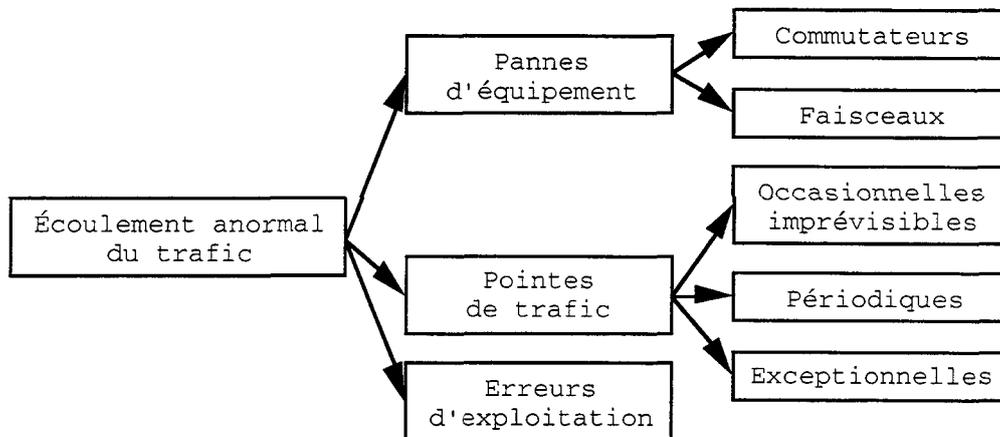


Figure 3.10 — *Typologie des incidents de trafic.*

Les surcharges dues à des **pointes de trafic** sont de natures variées :

- **occasionnelles imprévisibles** : ce type de situation correspond typiquement aux afflux d'appels vers des jeux télévisés ou radiophoniques non déclarés ou à la mauvaise utilisation des services par les abonnés. Les actions adéquates pour remédier à cette classe de pointe de trafic passent par l'application de méthodes d'acheminement dynamique ;
- **périodiques** : plusieurs événements, essentiellement saisonniers, appartiennent à ce type de situation. Citons, par exemple, la fête des mères, le jour de l'an ou encore le Téléthon. Ces surcharges prévisibles sont absorbées par le déclenchement d'actions de protection du réseau pour éviter son engorgement. Elles consistent à réserver des circuits de façon à interdire des débordements successifs, avides de ressources, et en des actions de restriction d'appels à la source lorsque leur origine est identifiée ;
- **exceptionnelles** : les appels en masse vers une destination ou depuis une origine fixée suite à une catastrophe accidentelle ou naturelle se rapportent à ce type de pointe de trafic. Dans une telle situation, il est difficile d'acheminer le trafic avec la même qualité. Les actions les plus appropriées ne permettent pas de préserver la qualité d'écoulement du trafic nominal puisque de nombreux chemins sont surchargés, mais elles peuvent cependant éviter l'effondrement du réseau.

Les catégories présentées peuvent être complétées par des surcharges de trafic suite à des **erreurs d'exploitation**. D'une proportion bien moindre que les pannes d'équipement ou les pointes de trafic, ces surcharges sont généralement dues à une mauvaise coordination de la gestion du réseau.

La typologie offre un aperçu de l'imprévisibilité et de la variété des incidents de trafic avec, pour corollaire, une activité de supervision intense, complexe et aux enjeux considérables réclamant, de la part des opérateurs, une solide expertise. Dans ces situations de fonctionnement anormal du réseau, les apports d'un système d'assistance, fondé sur l'expertise, sont indispensables.

## 4 Conclusion

Ce chapitre a présenté les caractéristiques de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France, terrain d'application et d'évaluation de la méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances objet de ce mémoire. La présentation est divisée en deux parties.

La première partie a permis d'introduire les notions de télécommunications indispensables à la compréhension de la structure et du fonctionnement du RTC. Outre les aspects liés à la structure du réseau, les fonctions de transmission, de commutation et d'acheminement du trafic ont été explicitées. La description des niveaux de gestion du RTC a montré, au niveau opérationnel, l'existence de deux activités indispensables à la qualité des services de communication et à la disponibilité du réseau, respectivement : la supervision du trafic téléphonique en temps réel et l'exploitation des équipements de commutation et de transmission. Enfin, le dernier paragraphe a introduit quelques-unes des caractéristiques du RTC de l'Île de France. La supervision en temps réel des flux de trafic écoulés par ce réseau, fortement maillé et aux règles d'acheminement complexes, est assurée par les opérateurs du CSR de Paris-Montsouris.

La seconde partie du chapitre a décrit l'activité de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Sur le plan fonctionnel, la description de l'organisation du travail au CSR de Paris-Montsouris constate, en particulier, un renouvellement fréquent des opérateurs de supervision et la nécessité d'une capitalisation des connaissances de façon à pallier les pertes d'expérience qui en résulte. Sur le plan matériel, la présentation des outils de supervision, dont le superviseur de trafic est la pièce maîtresse, reflète la complexité de l'activité de supervision. Lors du fonctionnement normal du réseau, entièrement automatisé, l'activité est réduite au suivi et au contrôle des variables du procédé, pour devenir rapidement importante, complexe et déterminante dès lors que l'écoulement du trafic se dégrade. En cas de perturbation du trafic, l'opérateur de supervision doit faire preuve de réelles capacités d'intégration et d'analyse de données sans pour cela disposer de moyens d'assistance fonctionnels pour diagnostiquer et/ou traiter en temps réel, efficacement et en toute sécurité, l'incident de trafic. L'analyse des composantes de l'activité de traitement des incidents de trafic conduit à deux enseignements principaux. Le premier concerne le recours prioritaire et efficace à la réutilisation de l'expérience. Cependant, certaines limites actuelles s'opposent au recours systématique à cette méthode de résolution de problèmes de la part des opérateurs. Le second enseignement montre l'importance des rôles joués par les notions de point de vue et de contexte dans le traitement d'un incident. Élaborer un système prenant en compte ces enseignements répond à un double besoin, d'une part, d'aide efficace aux activités de diagnostic et de planification exercées par les opérateurs en cas d'incident de trafic et, d'autre part, de capitalisation et de pérennisation de l'expertise du CSR.

La perspective du développement d'un tel système d'assistance passe par la définition préalable d'une méthodologie interdisciplinaire résolument centrée sur le futur utilisateur. Le chapitre suivant présente la méthodologie définie dans le cadre de ce travail.

---

## Chapitre 4

# Méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances

## 1 Introduction

Au-delà des critères d'efficacité et d'ergonomie, le développement d'un système d'assistance aux activités de résolution de problèmes dans le domaine de la supervision doit pouvoir :

- pallier la mobilité des opérateurs de supervision ;
- systématiser le recours à des solutions éprouvées lors de situations passées pour le traitement des modes de fonctionnement anormaux courants du procédé ;
- prendre en compte les notions de point de vue et de contexte de façon à établir les diagnostics et les procédures de traitement les mieux adaptés.

Dans cette perspective, ce chapitre présente la méthodologie que nous proposons pour spécifier et concevoir des systèmes d'aide à la supervision fondés sur la capitalisation et la réutilisation de l'expérience. Il est composé de quatre parties.

La première partie aborde les aspects liés à la capitalisation et à la réutilisation de l'expérience. Après avoir défini la notion d'expérience, elle caractérise les étapes du cycle pour la maîtrise du retour d'expérience et montre ses avantages dans la pratique collective des activités de résolution de problèmes.

La deuxième partie est consacrée à la présentation générale de la méthodologie. Après avoir énoncé ses objectifs fondateurs, nous introduisons le cycle de développement qu'elle sous-tend pour l'élaboration d'un système d'assistance. Le rôle et la place des principaux acteurs impliqués dans la mise en œuvre de la méthodologie sont discutés. La description des phases du cycle de développement souligne, plus particulièrement, les rôles joués par les phases de spécification et de conception qui, en

amont dans le cycle, sont le siège des apports significatifs de la méthodologie par rapport, notamment, aux approches classiques du génie logiciel. Les deux dernières parties du chapitre sont consacrées aux modalités de mise en œuvre de ces deux phases. Le dernier paragraphe focalise sur les notions de point de vue et de contexte dont la prise en compte par les phases de spécification et de conception conditionne la pertinence des aides délivrées par le système final.

La phase de spécification s'inscrit dans un cycle incrémental d'Acquisition Structurée des Connaissances (ASC). La troisième partie de ce chapitre décrit les étapes de ce cycle. Menée en référence au modèle de l'expertise *CommonKADS*, la phase de spécification débouche sur un modèle conceptuel de l'expertise du domaine d'application vérifié et validé. Celui-ci met en exergue une activité de réutilisation de connaissances. La présence de cette méthode de résolution de problèmes motive le choix du mode de Raisonnement à Partir de Cas (RàPC) pour la conception du système d'assistance. La dernière partie détaille les étapes du cycle de RàPC et précise à quels niveaux sont pris en compte le point de vue sur la résolution de problèmes et le contexte de la résolution de problèmes.

## 2 Capitalisation et réutilisation de l'expérience

La gestion de l'expérience est devenue une nécessité stratégique pour les entreprises [Delange et Vogin 94]. Pour être compétitives et le rester, ces dernières se doivent de préserver et d'exploiter leur capital de connaissances constitué au fil des années et trop souvent encore volatile. La maîtrise du retour d'expérience passe par sa capitalisation, son organisation et sa réutilisation. Dans cette première partie, nous présentons la notion d'expérience et précisons les modalités de sa maîtrise au titre du retour d'expérience.

### 2.1 Notion d'expérience

Pour une large part, le savoir s'enrichit par l'expérience. Les échecs comme les succès, sous réserve d'en analyser les raisons et de les transformer en savoir-faire, deviennent les composantes fondamentales de l'amélioration de la fiabilité et donc de la confiance et de la réussite. L'expérience relève d'un acquis de connaissances tirées de la pratique d'une activité. Ainsi, l'exécution d'une activité suppose l'existence, en tant que ressources, d'un savoir et d'un savoir-faire et génère, en retour, un accroissement de l'expérience [Boy 91].

Toutefois, l'expérience peut être la meilleure et la pire des alliées. D'un côté, elle permet d'améliorer notre capacité à faire face à des situations variées de résolution de problèmes alors que de l'autre, elle fige et parfois fossilise des représentations qui, bien que justifiables par le bon sens commun, n'en sont pas moins erronées ou simplistes. L'expérience peut donc être porteuse d'erreurs si ses descripteurs pertinents sont négligés lors de son analyse.

### 2.2 Cycle pour la maîtrise du retour d'expérience

Plusieurs actions, non exclusives l'une de l'autre, peuvent contribuer à l'amélioration de la compétitivité d'une entreprise, par exemple :

- le recours à un spécialiste pour disposer à un instant donné d'une source de savoir la plus à jour possible ;

- la formation et l'entraînement pour maintenir l'efficacité de l'activité des opérateurs et leur maîtrise des technologies utilisées ;
- la recherche et le développement pour créer de nouveaux savoirs et déboucher sur de nouvelles technologies plus performantes ;
- la maîtrise du retour d'expérience de façon à faire bénéficier la pratique de l'activité individuelle des enseignements de l'expérience collective.

Parmi ces actions, la maîtrise du retour d'expérience est certainement la plus opportune car la plus contextualisée, la plus pérenne et la moins coûteuse. Ainsi, au sein d'un groupe, les savoirs et savoir-faire individuels sont, par osmose, imprégnés des savoirs et savoir-faire collectifs, figure 4.1.

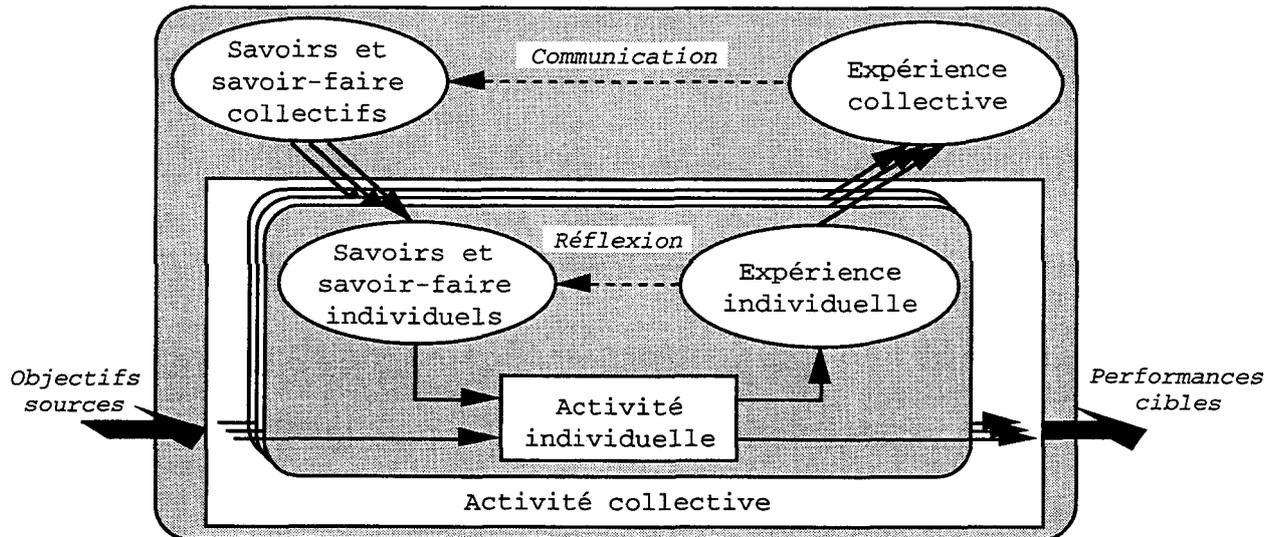


Figure 4.1 — Émergence de savoirs et de savoir-faire partagés dans le cadre d'une activité collective.

Bien que séduisante, la maîtrise du retour d'expérience se heurte à des freins dès que l'on se préoccupe de sa pratique :

- la communication, orale ou écrite, est souvent informelle et peu structurée. Elle ne constitue pas un savoir et un savoir-faire partageable ;
- les capacités intrinsèques de mémorisation et de récupération de l'expérience sont limitées pour chaque opérateur du groupe ;
- un opérateur ne peut pas se remémorer une expérience qu'il n'a pas vécu ou dont il n'a pas pris connaissance ;
- en général, l'expérience n'est pas formalisée, stockée et organisée à des fins de réutilisation.

Toutes ces limites, intra et extra-individuel, justifient la définition d'un cycle pour la maîtrise du retour d'expérience. Un tel cycle a pour but d'assurer un retour d'expérience collective adapté et efficace en reconduisant les bons choix et en évitant de refaire les erreurs du passé [Steels 93]. Il enchaîne les deux étapes de **mise à disposition** et de **valorisation** de l'expérience [Malvache *et al.* 94], figure 4.2. En pratique, dans une organisation humaine, seule une démarche participative et quotidienne de tous, motivée par une volonté de répondre efficacement aux objectifs de leur activité, permet d'en assurer le bien-fondé et la pérennité.

La mise à disposition de l'expérience implique la constitution et la restitution "d'unités d'expérience". Une unité d'expérience est formée à partir de l'analyse des contenus d'un cas d'expérience et de la formalisation des descripteurs génériques de ce cas. Elle est

assimilable à un ensemble de recommandations contextualisées en rapport avec le domaine d'application et pertinentes pour les activités de résolution de problèmes. Par exemple, dans le contexte de la supervision du trafic téléphonique les unités d'expérience correspondent à autant de situations résolues d'écoulement anormal du trafic. Les unités d'expérience sont ensuite capitalisées et organisées pour être, enfin, restituées, à la demande d'un opérateur, sous une forme adaptée au problème à résoudre.

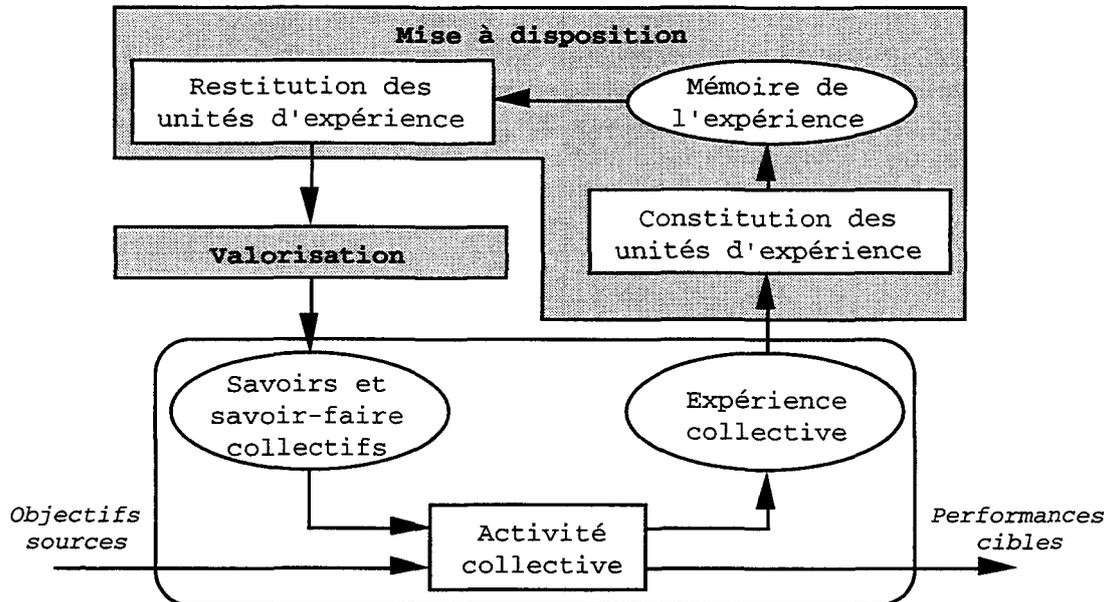


Figure 4.2 — Cycle pour la maîtrise du retour d'expérience.

L'étape de valorisation de l'expérience concerne la réutilisation effective et efficace de l'expérience collective pour la résolution de problèmes [Fadier *et al.* 94]. L'efficacité de la réutilisation de l'expérience peut être évaluée au moyen de deux indicateurs [Malvache *et al.* 94] : le taux de rappel et la précision. L'indicateur de rappel représente le rapport du nombre d'unités d'expérience pertinentes récupérées au nombre d'unités d'expérience pertinentes présentes dans la mémoire. L'indicateur de précision mesure la proportion d'unités d'expérience pertinentes dans la réponse, c'est-à-dire le rapport du nombre d'unités d'expérience pertinentes au nombre total d'unités d'expérience mémorisées. Pour être efficace, un système de réutilisation de l'expérience doit donc conjuguer un fort taux de rappel et une bonne précision.

La méthodologie que nous proposons dans ce chapitre pour le développement d'un système d'assistance à la capitalisation et à la réutilisation de connaissances vise en fait à automatiser, autant que possible, le cycle pour la maîtrise du retour d'expérience.

### 3 Présentation générale de la méthodologie

La méthodologie que nous présentons dans ce travail s'inscrit résolument dans le développement actuel des interactions fructueuses au sein des sciences cognitives, particulièrement dans le contexte de l'aide à la résolution de problèmes [Caulier et Houriez 94a]. Elle est fondée sur la prise en compte des caractéristiques de l'activité et des aspirations de l'utilisateur du système final dès les phases amont du développement. En d'autres termes, la méthodologie ne s'attache pas uniquement à l'élaboration d'un système intrinsèquement performant mais se préoccupe également d'apporter une réponse efficace aux besoins cognitifs et attentes ergonomiques de l'utilisateur. Elle met à contribution, dans une approche interdisciplinaire centrée sur l'utilisateur, la psychologie cognitive et ergonomique et l'IA. Les apports de la psychologie cognitive

concernent l'analyse des interactions entre l'opérateur et son environnement de travail. La psychologie ergonomique, pour la partie qui nous préoccupe, permet d'assortir les caractéristiques des interfaces logicielles du système d'assistance aux besoins cognitifs du futur utilisateur. Enfin, la contribution de l'IA intervient à deux niveaux dans la méthodologie : lors de la phase de spécification, pour la construction d'un modèle conceptuel de l'expertise du domaine d'application et, au niveau de la conception, pour la représentation des connaissances du domaine et du mode de raisonnement sous-jacents à la méthode de résolution de problèmes modélisée.

Avant de présenter le cycle de développement sous-tendu par la méthodologie, nous en précisons les objectifs fondateurs.

### 3.1 Objectifs fondateurs

Le développement d'un système d'assistance, ou Système à Base de Connaissances (SBC), relève avant tout d'un projet informatique et doit s'inscrire dans un cycle de développement strict à même d'organiser et d'accompagner l'ensemble des phases du projet, depuis sa naissance jusqu'à la fin de sa mise en œuvre. La définition de ce cycle de développement doit répondre à plusieurs objectifs relevant, d'une part, de considérations d'ordre scientifique et général et, d'autre part, des caractéristiques propres au domaine d'application. Parmi les nombreux objectifs qui ont présidé à la définition de la méthodologie, nous insistons, plus particulièrement, sur [Caulier 93] :

- la maîtrise de la complexité du problème à résoudre ;
- la rationalisation du développement afin d'éviter les réalisations empiriques ;
- l'amélioration de la communication entre l'ensemble des acteurs impliqués dans le projet ;
- l'amélioration des coûts, des délais et de la productivité des activités de développement ;
- la pertinence, la robustesse et la maintenabilité du SBC élaboré ;
- l'acceptabilité, l'utilité et l'utilisabilité du SBC par la prise en compte explicite et à part entière des besoins de l'utilisateur final tout au long du cycle de développement ;
- la construction d'un modèle conceptuel de l'expertise du domaine d'application ;
- la caractérisation des étapes du cycle pour la maîtrise du retour d'expérience ;
- l'intégration des notions de point de vue et de contexte dans la méthode de résolution de problèmes.

### 3.2 Cadre méthodologique

Le cadre méthodologique auquel se réfère notre travail s'articule autour des notions de cycle de développement et d'acteurs relativement classiques en génie logiciel. D'une façon générale, le génie logiciel insiste sur les coûts importants générés par une mauvaise maîtrise des retours en arrière dans les phases du cycle de développement. Cet aspect est d'autant plus critique pour les applications à base de connaissances qui, par nature, sont mal définies, non seulement dans leur spécification, mais aussi dans leur modalité de coopération avec l'utilisateur terminal. En ce sens, notre méthodologie met à contribution les méthodes, les techniques et les outils de la psychologie cognitive et ergonomique et de l'IA [Caulier 93 ; Caulier et Houriez 94a].

Le tableau 4.1 met en correspondance les phases du cycle de développement [Boehm 84] avec le degré d'implication des divers acteurs. Les résultats de chaque phase font l'objet d'une vérification et d'une validation intrinsèques en rapport avec les spécifications de la phase précédente. Une phase se conclut par la rédaction de dossiers

qui notifient les résultats de la phase en cours et qui servent de point de départ pour la phase suivante. Le cycle de développement se distingue d'une démarche de prototypage par le fait qu'il maintient le découpage en phases, justifié par le respect des finalités de chaque phase et par le souci de conserver une bonne maîtrise du projet.

Phases de développement		Groupes					
		Acteurs		Groupe de pilotage	Groupe de développement	Groupe d'application	
		Direction	Cogniticien	Informaticien	Ergonome	Expert	Utilisateur
Cycle de développement	Analyse du problème	■	■	■	■	■	■
	Spécification	▣	■	■	■	■	■
	Conception	□	■	■	■	▣	▣
	Réalisation	□	□	■	□	□	□
	Validation	▣	■	■	■	■	■

**Légende :**

- : Contribution majeure (rôle moteur)
- ▣ : Contribution mineure (rôle participatif)
- : Se tient informé

Tableau 4.1 — Phases du cycle de développement et degrés d'implication des acteurs [Duribreux 95].

Notre contribution s'inscrit plus significativement dans les phases d'**analyse du problème**, de **spécification** et de **conception** que nous avons orientées de façon à valoriser au mieux le retour d'expérience. En effet, de par leur objet et leur position en amont du cycle de développement, ces phases sont les plus délicates et les plus cruciales. Elles visent à répondre efficacement aux besoins de l'utilisateur final et à réduire les boucles de retour dans le cycle, nécessaires, mais non moins pénalisantes en temps et en coûts de développement. Parmi les acteurs les plus impliqués, nous insistons, plus particulièrement, sur le groupe d'application dont le rôle est majeur.

Le **groupe d'application** englobe l'expert et l'utilisateur. Le rôle de l'**expert** est central dans la réalisation du système d'assistance. Il est le détenteur du savoir et du savoir-faire. L'**utilisateur** est la personne qui va bénéficier de cette expertise accessible par le biais du SBC. Les utilisateurs doivent exprimer leurs attentes et apprécier, dans la mesure du possible, les incidences des changements que va induire l'introduction du SBC. Cette démarche, qui suppose une critique *a priori* centrée sur les aspects fonctionnels externes du produit réalisé, est déterminante pour une bonne intégration du SBC dans son milieu opérationnel. Duribreux [95] distingue deux rôles clairement identifiés pour l'utilisateur du SBC :

1. **Spécifieur** : en tant qu'utilisateur final du SBC et normalement avisé du contexte opérationnel réel, l'utilisateur est à même de faire des recommandations ou des propositions sur les services attendus. Il peut exprimer ses préférences et faire valoir des arguments quant à la performance de sa prestation avec le SBC. Avant que le SBC ne soit réalisé, l'utilisateur peut même contribuer à la définition des critères d'acceptabilité du SBC implanté dans son environnement.

2. **Évaluateur** : dans cette perspective d'évaluation des résultats, le groupe de développement peut négocier les alternatives de développement ou les prises de décision auprès des utilisateurs. En finale et dans les limites de ses compétences, l'utilisateur doit approuver les fonctionnalités retenues pour le SBC.

Nous précisons maintenant les modalités de mise en œuvre des phases du cycle de développement.

### 3.3 Phases du cycle de développement

L'objectif des phases du cycle de développement est de passer d'un problème réel à une solution retenue qui doit être analysée de façon détaillée avant d'en aborder la réalisation et la validation. La décision de démarrer un projet de développement est provoquée par l'existence d'un problème qui, par nature, est généralement mal défini. La première phase du cycle consiste à analyser le problème et à définir les besoins. Dans la phase suivante, les connaissances requises sont spécifiées pour ensuite, en troisième et quatrième phase, permettre la conception et la réalisation du système. En dernier lieu, après avoir franchi la phase de validation, le SBC entre dans les phases opérationnelles d'intégration, d'exploitation et de maintenance. Dans ce paragraphe, nous focalisons sur les caractéristiques des phases déterminantes d'analyse du problème, de spécification et de conception du système cible.

#### 3.3.1 Analyse du problème

Le cycle de développement du SBC débute par une phase qui, plus qu'une analyse de besoins classique, se préoccupe de la caractérisation du problème et du domaine de l'expertise concerné. La phase d'analyse permet, d'une part, la description du domaine dans lequel se situe le problème et, d'autre part, de décrire le problème, de définir les objectifs du futur SBC, sa faisabilité, ses fonctions de base, c'est-à-dire les grandes orientations de la solution. Elle permet au cognicien d'acquérir un premier niveau de langage opératoire. Dès cette phase, la participation active et la motivation des utilisateurs potentiels, des experts et des dirigeants sont primordiales pour minimiser le risque de marginalisation, voire même de rejet, du futur SBC. Inscrire une démarche volontariste est une condition indispensable à l'établissement d'un véritable dialogue enrichissant pour tous les membres de l'Équipe pluridisciplinaire du projet.

La **spécification du problème** vise à cerner et caractériser les différents aspects du problème situé dans son contexte. Elle consiste à identifier le problème par une exploration de ses tenants et aboutissants. Elle porte essentiellement sur l'identification des objectifs. Il est nécessaire de clarifier les attentes de l'entreprise vis-à-vis du SBC : le champ d'application, la nature et le niveau du service rendu par le système et les conditions d'utilisation du SBC. De la bonne définition de ces objectifs dépend, en grande partie, le succès opérationnel du système. Cette étape doit permettre aux membres des groupes de travail de spécifier, autant que faire se peut, la forme de solution à élaborer par le SBC et les critères de validation du système final.

L'**identification du domaine** permet de vérifier que le contexte du problème est favorable au recueil des connaissances. La description de l'environnement opérationnel, dans lequel le SBC sera intégré, est indispensable pour spécifier les interactions avec le système d'information global de l'entreprise, tant au niveau humain que matériel. L'identification des ressources humaines amène, d'une part, à contrôler l'existence et la disponibilité d'un ou de plusieurs experts, la présence d'une expertise en adéquation avec les objectifs du projet et la possibilité d'assister à des traitements de cas réels sur le site

et, d'autre part, à définir le profil des utilisateurs terminaux, soit par recensement des utilisateurs existants ou, à défaut, par la caractérisation d'un profil type réaliste. L'identification des ressources matérielles permet d'inventorier les aspects techniques de l'environnement opérationnel du SBC tels, par exemple, la disponibilité d'outils de développement ou de modules logiciels réutilisables, ou l'accès à un réseau de communication informatique.

### 3.3.2 Spécification des connaissances

La spécification des connaissances du domaine d'application constitue la phase majeure et centrale de la méthodologie. Dans cette phase, l'expertise est définie et structurée de façon précise et non ambiguë. La spécification des connaissances définit ce que doit faire le SBC sans en préciser le comment. Les connaissances relatives au domaine et aux raisonnements à mettre en œuvre pour résoudre le problème posé sont explicitées. Les objectifs de la méthodologie et les faiblesses de la démarche de prototypage à l'origine du développement des systèmes experts de première génération [Krivine et David 91], nous ont incité à inscrire la phase de spécification des connaissances dans une approche de modélisation. Dans une telle approche, l'acquisition des connaissances n'est plus vue comme une reproduction des mécanismes de raisonnement réellement mis en œuvre par le SBC mais plutôt comme une activité créative de modélisation.

La phase de spécification des connaissances s'inscrit dans un cycle itératif d'acquisition structurée des connaissances de résolution de problèmes dont les acteurs sont l'expert et le cogniticien. L'objectif de la spécification est de rassembler et de formaliser les savoirs et savoir-faire relatifs au problème à résoudre. Le résultat est une description abstraite et intermédiaire de la méthode de résolution de problèmes mise en œuvre par le SBC : le **modèle conceptuel de l'expertise**, figure 4.3.

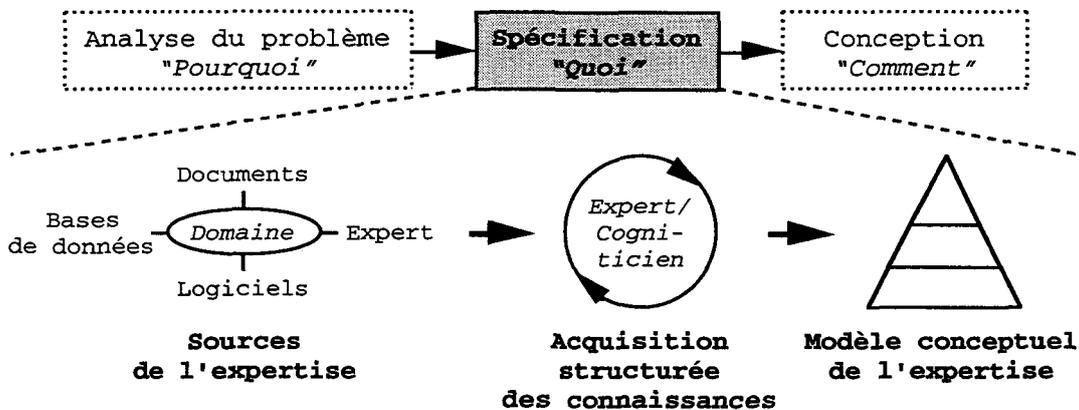


Figure 4.3 — La spécification : une phase d'acquisition structurée des connaissances.

Le cycle d'ASC associe recueil et modélisation des connaissances du domaine d'application pour définir un premier état du modèle conceptuel de l'expertise, qui est ensuite raffiné au travers de vérifications et de validations successives [McGraw et Herbison-Briggs 89], figure 4.4.

La vérification implique le cogniticien et concerne l'intégrité structuro-syntaxique du modèle conceptuel de l'expertise. La validation est du ressort de l'expert qui contrôle, en référence à son expertise, la conformité, qualitative et quantitative, des connaissances modélisées. L'ASC est une démarche incrémentale. Dans un premier temps, le cogniticien cherche à reconnaître le type de méthode de résolution de problèmes que le SBC doit réaliser. Dans un second temps, le modèle élaboré sert de base au recueil des connaissances : l'ASC est alors dirigée par un modèle de résolution de problèmes.

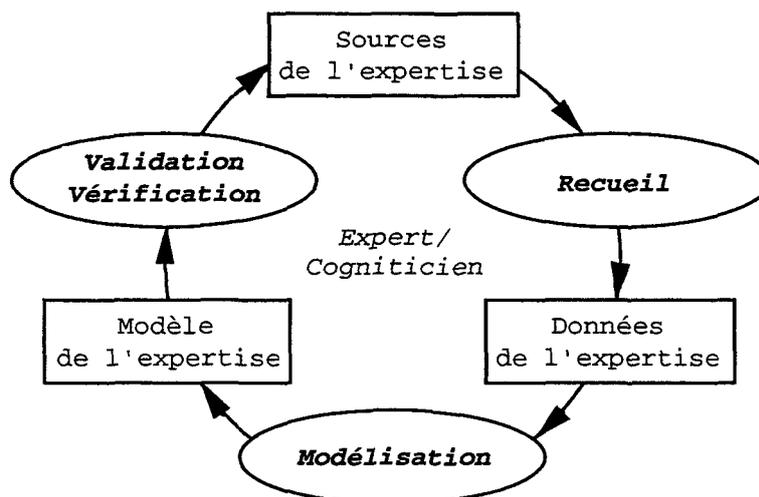


Figure 4.4 — *Cycle incrémental d'acquisition structurée des connaissances.*

La méthode de résolution de problèmes joue un rôle important de guide dans l'ASC [Le Roux et Laublet 93] en influençant notamment l'organisation des connaissances du domaine d'application. Dès lors, il convient qu'elle soit suffisamment spécifiée pour qu'il soit possible d'inférer le "comment" (acquérir les connaissances) à partir du "quoi" (le type de structuration des connaissances qu'elle procure). Les modèles construits par cette approche ne sont plus des modèles de l'expert ni des reflets de son raisonnement. Ce sont des modèles originaux et performants dont la description, en des termes compréhensibles par l'ensemble des acteurs, leur confère une "plausibilité cognitive". En finale, le modèle conceptuel de l'expertise, vérifié et validé, spécifie la méthode selon laquelle le SBC résoudra les problèmes. Il sert de lien entre les phases de spécification et de conception du SBC. L'organisation et les formalismes de modélisation utilisés par la phase de spécification de la méthodologie sont présentés en troisième partie de ce chapitre.

### 3.3.3 Conception

L'objectif de la phase de conception est de préciser le "comment" de "l'opérationnalisation" du modèle conceptuel de l'expertise. En ce sens, la conception transforme les connaissances descriptives et opératoires abstraites du modèle conceptuel en une représentation formelle opérationnelle : le **modèle de conception**, figure 4.5. Cette transformation est plus ou moins complexe selon la fonctionnalité opérationnelle demandée au SBC. Le modèle de conception, dans sa version initiale, est une forme réduite du système final qui vise à en cerner toutes ses caractéristiques. Il est relativement pauvre en connaissances situationnelles et riche en connaissances analytiques.

À la différence du modèle conceptuel de l'expertise, le modèle de conception est décrit dans un langage formel dont le choix est guidé par la méthode de résolution de problèmes. La transformation du modèle conceptuel de l'expertise en un modèle de conception nécessite l'utilisation de formalismes symboliques de représentation et de traitement des connaissances du domaine. Le choix du mode de représentation des connaissances doit répondre au double objectif suivant :

1. Être compatible avec les natures et les formes des connaissances expertes modélisées.
2. Être en accord avec les contraintes de performance et d'homogénéité matérielle et logicielle imposées par l'environnement d'exploitation.

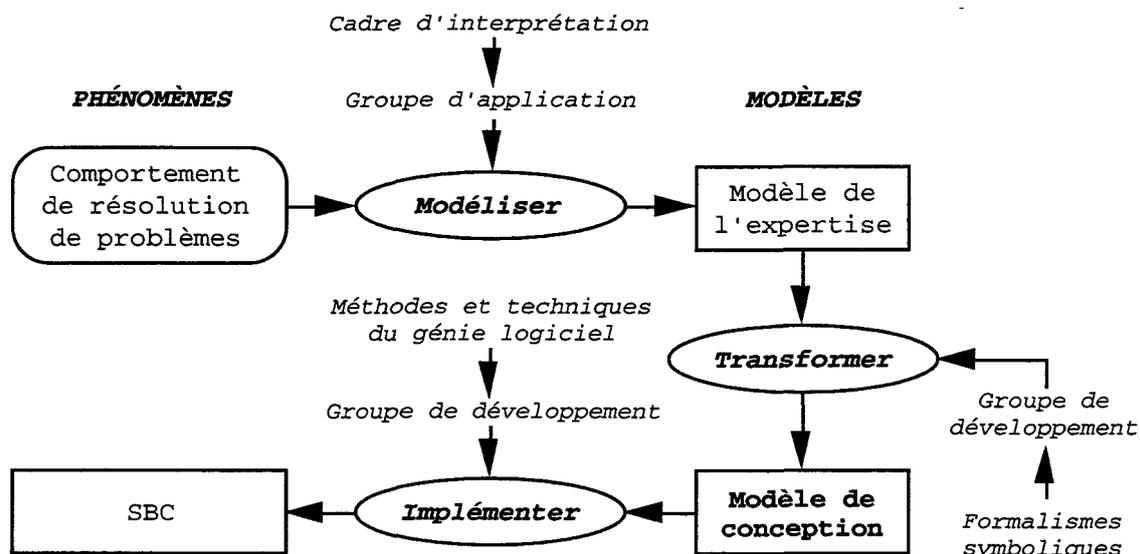


Figure 4.5 — Transformation du modèle de l'expertise en un modèle de conception [Wielinga et al. 92].

Ce dernier point doit faire l'objet d'une concertation entre les acteurs pour évaluer les performances et les caractéristiques de l'outil informatique requis. Les formalismes de l'IA, tels que ceux introduits au chapitre 2, offrent un éventail de solutions efficaces pour la conception de la base de connaissances et du squelette du système [Haton et al. 91]. À chaque fois que cela est possible, et pour des raisons de pérennité et d'efficacité, les choix de conception du SBC débouchent sur l'utilisation de générateurs ou d'environnements de développement de SBC commercialisés [Stylianou et al. 92].

Les spécifications énoncées par le modèle conceptuel de l'expertise de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France [Caulier et Perron-Bouvier 94a] ont conduit au choix des objets structurés pour la représentation des unités d'expérience accumulées dans la base de connaissances du système d'assistance, figure 4.6. En effet, dans les formalismes relationnels, comme les règles de production et les réseaux sémantiques, un objet n'existe pas en tant que tel mais seulement comme participant à un ensemble d'énoncés dispersés dans la base de connaissances. À l'opposé, dans le formalisme objet, les unités d'expérience ont une existence réelle et un espace propre dans la base de connaissances.

La mise en évidence de la réutilisation de connaissances comme méthode de résolution de problèmes privilégiée par l'opérateur de supervision dans ses activités de diagnostic et de planification s'est traduite par le choix du RàPC [Kolodner 91] comme modèle de représentation des connaissances opératoires, figure 4.6.

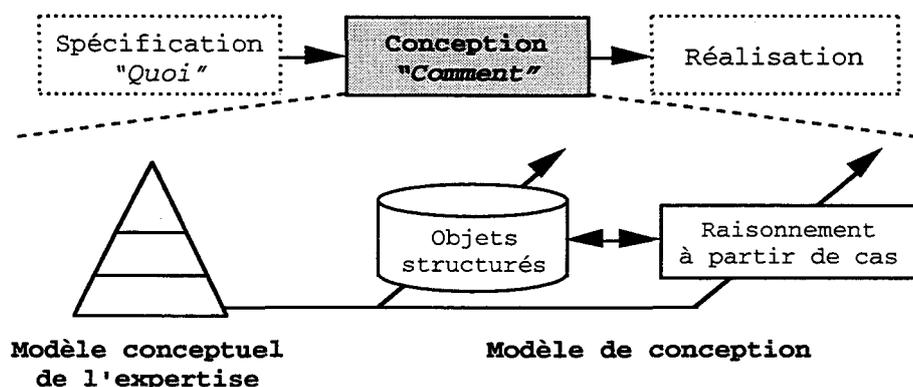


Figure 4.6 — La phase de conception.

Le chapitre 2 a présenté le formalisme des objets structurés et l'analogie transformationnelle à l'origine de la formalisation du RàPC en résolution de problèmes. La dernière partie de ce chapitre décrit les étapes du cycle de RàPC.

La phase de conception débouche sur l'implémentation du système opérationnel. De par leurs préoccupations fortement axées sur le "comment", c'est-à-dire sur les aspects techniques, les phases de conception et de réalisation sont par nature très voisines. Toutefois, si l'objectif principal de la phase de conception est de montrer la faisabilité du SBC, celui de la phase de réalisation est de concrétiser le système final avec ses interfaces homme-machine.

### 3.3.4 Réalisation et validation

La réalisation est une phase de codage qui débouche sur un système opérationnel. Ce travail est grandement facilité par l'existence d'outils et de langages de très haut niveau qui permettent d'implémenter, plus rapidement et plus efficacement, les modèles conceptuels. Le SBC réalisé doit satisfaire l'ensemble des spécifications techniques définies lors de la conception sans omettre les interfaces homme-machine, l'intégration dans l'environnement opérationnel et les exigences de performances et d'évolutivité.

À la réalisation succède les activités de validation, de vérification et d'évaluation. La vérification contrôle l'opérationnalité des formalismes de représentation et de traitement des connaissances. L'évaluation teste l'adéquation des services rendus par le SBC en référence aux besoins exprimés lors de l'analyse du problème. Cette opération s'effectue de façon incrémentale par une mise en exploitation progressive et surveillée du SBC. Les résultats produits sont comparés avec les résultats "raisonnables" attendus par l'expert et modifiés itérativement le cas échéant. La phase de validation du SBC s'effectue ensuite sur la base des spécifications cognitives et ergonomiques retenues. Elle vise à contrôler le domaine de compétence du SBC et son aptitude à répondre aux besoins de l'utilisateur. Plusieurs critères de validation importants sont analysés :

- l'exactitude des connaissances représentées au sein du SBC ;
- la pertinence des résultats proposés par le SBC ;
- la conformité des interfaces aux spécifications ergonomiques statiques et dynamiques ;
- le respect des objectifs visés : degré et impact du service rendu en termes de gains socio-économiques ;
- la qualité de la documentation du projet.

La validation finale du système est d'autant plus facilitée que le souci de répondre aux souhaits des utilisateurs a été considéré dès les premières phases du cycle de développement. De par le caractère ouvert du domaine de compétence cerné par un SBC, la validation constitue à elle seule un axe de recherche en plein essor [Guida et Mauri 93].

Pour terminer ce paragraphe, précisons que différentes expériences, comme celle relative au système d'aide à la conception de configurations particulières d'ordinateurs R1 relatée par Krivine [92], ont montré que pour faciliter la mise en œuvre des phases opérationnelles d'intégration, d'exploitation et de maintenance les connaissances mises en œuvre par le SBC doivent être structurées et liées à une description abstraite de leur rôle dans la réalisation. Ceci justifie le caractère fondamental de la phase de spécification du SBC qui définit de façon explicite la méthode de résolution utilisée par le système final. Pour sa partie originale, la méthodologie se base sur l'analyse de l'activité

réelle des opérateurs de supervision concernés par le système d'assistance. En ce sens, elle établit un pont entre une activité réelle actuelle, sans le système d'assistance, et une activité future prévisible dès l'intégration du système d'assistance. Même si les notions de point de vue et de contexte sont habituellement bien perçues, notre méthodologie, au travers de l'analyse de l'activité des opérateurs de supervision, a très vite révélé que ces notions jouent un rôle important dans la définition des méthodes de résolution de problèmes. Le paragraphe suivant est consacré à ce point.

### 3.4 Notions de point de vue et de contexte

Les recherches pluridisciplinaires actuelles tentent d'intégrer, dans une nouvelle génération de systèmes d'assistance intelligents, les notions de point de vue et de contexte [Brézillon 93 ; Caulier et Houriez 96a]. Ces notions sont intimement liées et jouent un rôle important en résolution de problèmes. Nous en donnons une définition.

#### 3.4.1 Point de vue sur la résolution de problèmes

Étymologiquement, un **point de vue** est une façon particulière de considérer une situation. En résolution de problèmes, le point de vue est une sorte de "filtre" au travers duquel l'opérateur focalise, selon lui, sur les compétences et connaissances pertinentes pour la résolution de problèmes. Le point de vue adresse une classe de méthodes de résolution de problèmes, en ce sens qu'un problème sera abordé par un opérateur selon les compétences sous-tendues par son point de vue. Il peut être vu comme un critère de reformulation des connaissances du domaine en fonction du problème à résoudre [Py 94]. Ce qui diffère d'un résultat à l'autre dans la résolution d'un problème, c'est la façon de voir une même entité, c'est-à-dire le point de vue que l'opérateur adopte [Coulon *et al.* 90].

Le point de vue définit et type les connaissances descriptives indispensables au raisonnement. Son principe est de faire émerger les connaissances prégnantes pour résoudre le problème. Dans notre approche, la modélisation d'un point de vue émane du travail d'ASC. Il considère le profil et l'objectif de l'opérateur dans son activité de résolution de problèmes.

#### 3.4.2 Contexte de la résolution de problèmes

Par définition, le **contexte** est l'ensemble des circonstances qui fait que les faits peuvent prendre sens. Dans notre cas, les faits représentent les descripteurs des unités d'expérience définis et typés par le point de vue. Les circonstances définissent le contexte de la résolution de problèmes et regroupent des connaissances du domaine dont le rôle peut être caractérisé d'implicite dans la résolution de problèmes. Le contexte de la résolution d'un problème est intimement lié au point de vue qui le gouverne. Les deux exemples qui suivent permettent de mieux cerner les particularités attachées aux notions de point de vue et de contexte.

L'exemple de la figure 4.7 peut conduire à deux acceptions auxquelles il est possible d'associer les deux points de vue musical et littéral, sans disposer *a priori* d'une raison de considérer l'un plutôt que l'autre. Le point de vue adopté encapsule le choix du contexte lié au problème. En effet, si le problème de la figure 4.7 est abordé du point de vue musical, alors les données du problème prennent implicitement le sens particulier de notes de musique. Selon ce point de vue, si l'on se place dans le contexte de la recherche d'un ordre MI deviendra SOL. En revanche, si c'est le point de vue littéral qui est adopté, les données du problème seront interprétées, dans le contexte de la recherche d'une distance en référence à l'ordre alphabétique, comme des chaînes de caractères, alors MI pourra devenir SI ( $S = M + 6$  dans l'ordre alphabétique, comme  $L = F + 6$ ). Selon le point de

vue et le contexte retenus, les données sont analysées en terme de notes de musique ou en terme de chaînes de caractères.

	Point de vue	Contexte
FA → LA	Musical	Ordre dans la gamme
MI → ?	Littéral	"Distance" alphabétique

Figure 4.7 — *Ambiguïté sur le point de vue [Bourelly et Savelli 92].*

Lorsqu'un point de vue est précisé, des ambiguïtés peuvent subsister dans le choix de l'interprétation du problème. Par exemple, la figure 4.8 renvoie à un point de vue arithmétique. Ce point de vue rend néanmoins possible plusieurs interprétations du rapport arithmétique entre 3 et 6 : "le deuxième terme vaut trois de plus que le premier" ou "le second terme vaut le double du premier". Ces deux énoncés appliqués à la cible donnent, respectivement, 7 ou 8 comme solution.

3	→	6
4	→	?

Figure 4.8 — *Problème de l'interprétation multiple [Bourelly et Savelli 92].*

Si l'importance du point de vue et de la composante contextuelle des connaissances du domaine sont reconnues, il subsiste un fossé pour comprendre, modéliser, représenter et raisonner sur ces aspects [Brézillon 93]. Comblé ce déficit sera d'une grande valeur et d'un grand bénéfice pour aborder de nombreux problèmes d'IA.

## 4 Acquisition structurée des connaissances

L'ASC concerne la phase de spécification de la méthodologie. Elle constitue l'une des difficultés majeures rencontrées lors du développement d'un SBC. Initialement perçue comme un processus de transfert de l'expertise, l'évolution des recherches dans ce domaine débouche aujourd'hui, de façon consensuelle, sur des approches considérant l'acquisition des connaissances comme une activité constructive de modélisation [Wielinga *et al.* 92 ; Laublet 94]. Elle consiste à établir un modèle conceptuel de la méthode de résolution de problèmes mise en œuvre par le SBC permettant, notamment, à l'expert d'évaluer la plausibilité cognitive de cette méthode. Le modèle clarifie le rôle des connaissances dans le processus de résolution de problèmes et facilite ainsi l'organisation et la validation de leur acquisition.

Dans cette troisième partie, nous présentons les modalités de mise en œuvre des deux principales étapes du cycle incrémental d'ASC : le recueil des données de l'expertise et la modélisation des connaissances.

### 4.1 Le recueil des données de l'expertise

Le recueil des données de l'expertise représente la première étape du cycle itératif d'ASC. Il prend place dans un environnement essentiellement humain impliquant le cognicien et l'expert du domaine dans une relation interactive de confiance, figure 4.9.

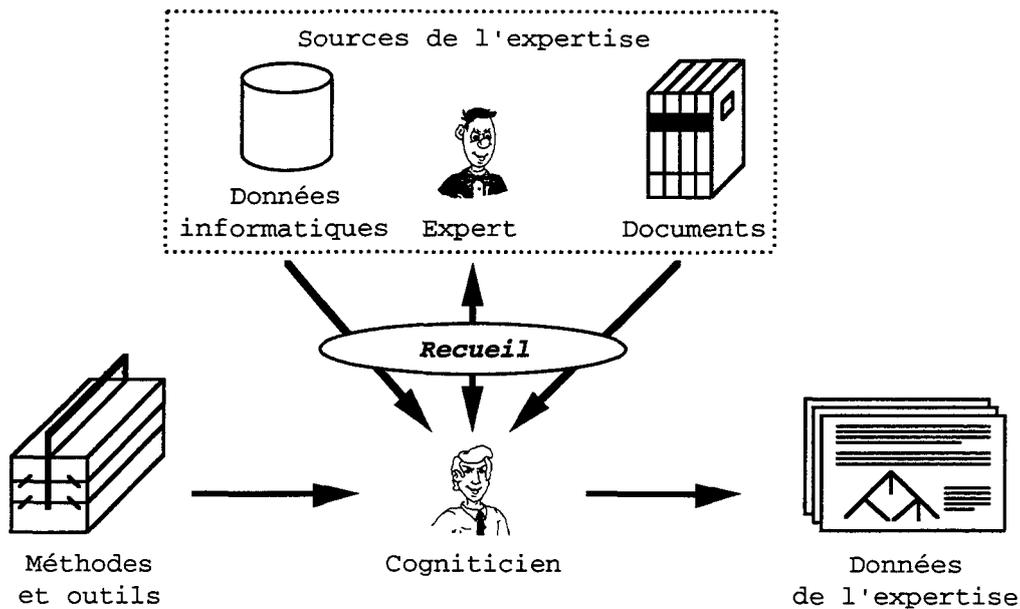


Figure 4.9 — *Recueil des données de l'expertise.*

Malgré le biais ou la distorsion que peut provoquer son intervention, le cogniticien est la personne motrice chargée d'identifier, d'extraire, de modéliser et de faire valider les connaissances descriptives et les mécanismes de raisonnement détenus en majorité par l'expert. Son premier objectif est de disposer d'un ensemble de connaissances du domaine d'application qui lui permet d'aborder l'étape de modélisation. Il a recours dans son activité à un ensemble de méthodes et d'outils. L'expert, personne d'expérience reconnue comme spécialiste dans la résolution de problèmes, se doit d'être motivé et prêt à s'investir dans le développement du SBC [Bonnet *et al.* 86]. Sa motivation et sa disponibilité sont des gages de la réussite du processus d'ASC. Sur le plan individuel, le cogniticien et l'expert sont avant tout des personnes soumises à des états physiologiques, psychologiques et émotionnels variables et rarement en phase. Les deux parties doivent savoir en tenir compte et tenter de s'en accommoder au mieux de l'intérêt général.

Ce paragraphe définit les catégories de connaissances intervenant dans la composition du modèle conceptuel de l'expertise puis s'intéresse aux méthodes de recueil des connaissances.

#### 4.1.1 Catégories de connaissances

Lors des séances de recueil, le cogniticien identifie les différents éléments de connaissance nécessaires à la résolution de problèmes et leurs relations. Quatre catégories de connaissance se distinguent [Houriez 94] :

1. Les connaissances relatives aux concepts manipulés au cours de la résolution, généralement appelées connaissances du domaine ou descriptives.
2. Les connaissances sur les opérations élémentaires, ou inférences primitives, immédiatement applicables sur les concepts du domaine.
3. Les connaissances sur les méthodes de résolution qui permettent de décomposer un problème en sous-problèmes ou de le résoudre directement en appliquant des opérations élémentaires.
4. Les connaissances de contrôle qui permettent de choisir et d'adapter les méthodes de résolution aux problèmes à résoudre en tenant compte de la situation courante et de directives externes.

Il incombe au cogniticien de recueillir des données dans chacune de ces catégories de connaissance. Cette tâche passe d'abord par l'identification des sources de l'expertise disponibles dans le domaine d'application, telles que l'expertise proprement dite, les connaissances livresques ou les données informatiques [Ermine 93].

#### 4.1.2 Méthodes de recueil

La collecte des données de l'expertise est une opération de tri sélectif dans un ensemble hétérogène, selon la pertinence par rapport à un ou plusieurs objectifs, et de différenciation suivant le support d'origine. Son résultat est une matérialisation des données qui délimite les contours nécessaires de la connaissance utile à la finalité assignée au SBC [Ermine 93].

Pour aider le cogniticien dans son activité de recueil des données de l'expertise, plusieurs méthodes, **directes** et **indirectes**, souvent inspirées de travaux en psychologie cognitive et en apprentissage symbolique automatique, ont été étudiées et présentées par de nombreux auteurs [Boy 88 ; Galloüin 88 ; Hart 88 ; Visser et Morais 88 ; Dieng 90 ; Benkirane 91]. En pratique, les méthodes sont complémentaires et une seule ne permet pas de recueillir des données dans la totalité des catégories [Visser et Morais 88]. Le rôle du cogniticien est alors, non seulement de choisir les méthodes adéquates, mais aussi de définir leur ordre d'application. L'application des méthodes de recueil débouche sur une description détaillée des connaissances utilisées par l'expert mais ne permet pas d'en préciser l'organisation. À partir des données recueillies, le cogniticien doit organiser et abstraire des concepts, des relations, des inférences et des stratégies : c'est le travail le plus noble mais aussi le plus fastidieux du cycle d'ASC. Les recherches sur des langages de formalisation du modèle abstrait de l'expertise, indépendants des formalismes de représentation et compréhensibles par les acteurs impliqués dans le cycle de développement du SBC, visent à améliorer cette tâche [Dieng 90].

## 4.2 La modélisation des connaissances

Au-delà des problèmes de recueil des données de l'expertise, l'ASC vise la mise en œuvre d'une méthode de résolution de problèmes experte, dans un domaine d'application particulier et pour une tâche précise. Il est donc nécessaire de construire un modèle conceptuel de cette méthode. Pour définir le comportement d'un SBC de façon indépendante des représentations, Newell [82] a formulé l'hypothèse du **niveau connaissance**. Ce niveau de modélisation de l'expertise permet une description et une compréhension approfondies du fonctionnement du SBC dans des termes accessibles à l'expert, au cogniticien et à l'utilisateur, sans se soucier des choix liés à son implémentation. Les travaux en ASC s'accordent pour distinguer deux types de modélisation des connaissances dans la spécification d'un SBC :

1. La modélisation des **connaissances du domaine** (ou descriptives) qui élabore les modèles abstraits de l'ensemble des éléments de connaissance qui interviennent ou sont manipulés dans tout problème concernant le domaine d'application.
2. La modélisation des **connaissances de raisonnement** (ou opératoires) qui porte sur la construction des modèles abstraits décrivant et contrôlant la méthode de résolution de problèmes mise en œuvre sur les connaissances du domaine pour satisfaire l'objectif assigné au SBC.

Plusieurs approches de construction du modèle conceptuel de l'expertise ont été définies : tâches génériques [Chandrasekaran 87], limitation de rôles [McDermott 88],

méthode à la tâche [Musen 89], composants de l'expertise [Steels 90, 91] et modèle de l'expertise *CommonKADS* [Wielinga *et al.* 93]. Elles permettent de caractériser la méthode de résolution de problèmes par la définition de composants génériques et/ou de primitives de modélisation. Parmi ces approches, la définition du modèle de l'expertise *CommonKADS*<sup>17</sup> est certainement la plus complète, sur le plan des formalismes de spécification des connaissances descriptives et opératoires et des primitives de modélisation, la plus répandue et la plus utilisée dans la communauté européenne de l'ASC [Laublet 94]. C'est précisément le cadre proposé par le modèle de l'expertise *CommonKADS* qui a été choisi pour la spécification de l'expertise du domaine d'application. Les motivations de ce choix tiennent en plusieurs points :

- il constitue un moyen effectif, rigoureux et efficace de spécification des connaissances d'un SBC ;
- il offre un jeu de primitives et de formalismes de modélisation performant ;
- il permet de guider et d'organiser le travail du cognicien ;
- il permet un niveau d'abstraction compatible avec les besoins de dialogue entre l'expert et le cognicien ;
- il est supporté par l'outil de modélisation KADS-Tool qui offre un maximum de confort d'utilisation en tant qu'éditeur spécialisé de connaissances.

Nous décrivons maintenant le principe de construction, l'organisation, les formalismes de modélisation et les caractéristiques de l'outil KADS-Tool.

#### 4.2.1 Construction du modèle de l'expertise *CommonKADS*

Le modèle de l'expertise *CommonKADS* permet d'exprimer les spécifications cognitives du SBC d'une façon propre à une approche d'IA. Wielinga *et al.* [93] le définissent ainsi : "Le modèle de l'expertise caractérise le comportement de résolution de problèmes d'un agent en termes de connaissances appliquées pour résoudre une certaine tâche". La démarche de construction de ce modèle passe par trois étapes [Brunet 91], figure 4.10 :

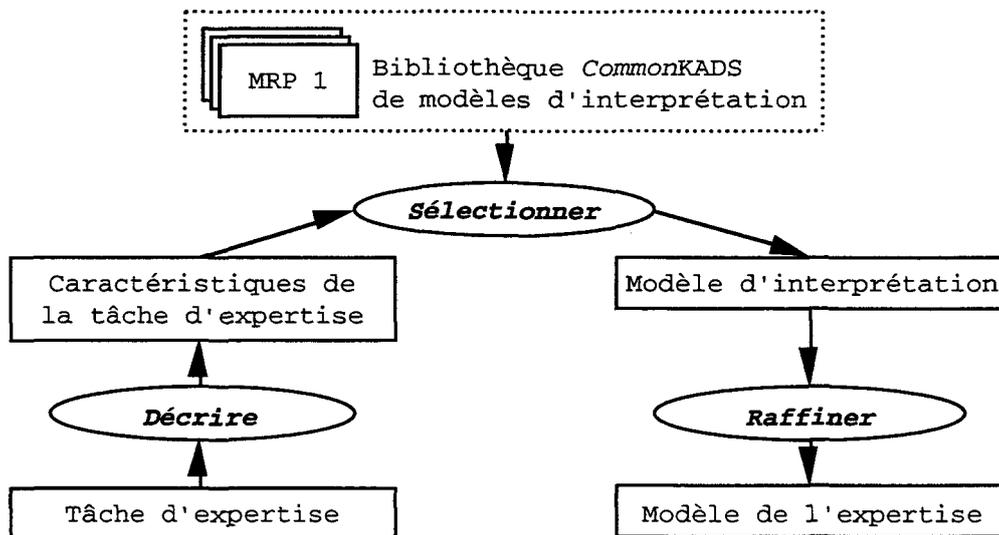


Figure 4.10 — Démarche de construction du modèle de l'expertise.

<sup>17</sup> La méthode *CommonKADS*, *Common Knowledge Acquisition and Design Support*, est le résultat de travaux de recherche, entamés en 1985, au sein des programmes européens ESPRIT : KADS-I, *Knowledge Analysis and Documentation System* (programme P12), puis KADS-II, *Knowledge Analysis and Design Support* (programme P5248). La méthode KADS-I a connu de nombreux prolongements et améliorations. Ainsi, *CommonKADS*, la méthode issue des travaux du consortium KADS-II, propose de nombreuses transformations et compléments à KADS-I [Porter 92 ; Gustafsson et Menezes 94].

1. **La description de la tâche d'expertise à modéliser.** Cette première étape concerne le recueil et l'analyse d'un premier ensemble de connaissances descriptives et opératoires du domaine d'application.
2. **La sélection d'un modèle d'interprétation<sup>18</sup> dans une bibliothèque.** La sélection d'un modèle d'interprétation adéquat suppose une description suffisamment approfondie de la nature de la méthode de résolution de problèmes et une bonne connaissance des modèles d'interprétation disponibles en bibliothèque [Breuker *et al.* 87]. Le choix d'un modèle d'interprétation, ou la combinaison de plusieurs modèles d'interprétation, requiert, de la part du cognitif, de bonnes facultés d'abstraction et permet ensuite de canaliser l'activité de recueil vers des entretiens plus ciblés avec l'expert. Cependant, à défaut de modèles d'interprétation adaptés au problème, *CommonKADS* propose un certain nombre de primitives de modélisation indépendantes d'un domaine d'application et susceptibles d'aider à la construction du modèle de l'expertise. Ce sont les inférences primitives de résolution de problèmes.
3. **Le raffinement du modèle d'interprétation sélectionné.** Cette dernière étape à caractère itératif est nécessaire pour spécialiser le modèle d'interprétation au domaine d'application abordé. Au-delà, le modèle est instancié avec les connaissances du domaine et ses inférences contrôlées pour donner le modèle conceptuel de l'expertise du domaine d'application.

Le modèle de l'expertise *CommonKADS* formalise les connaissances de résolution de problèmes que doit posséder le SBC pour atteindre le but de sa tâche. Nous explicitons maintenant son organisation et les formalismes de modélisation qu'il offre.

#### 4.2.2 Le modèle de l'expertise *CommonKADS*

Le modèle de l'expertise *CommonKADS* est fondé sur une distinction entre les connaissances du domaine et les connaissances de raisonnement. Une telle séparation avait déjà été utilisée par Clancey dans le système NEOMYCIN [Clancey 85]. Le modèle de l'expertise *CommonKADS* suggère d'aller plus loin en distinguant deux niveaux de modélisation pour les connaissances de raisonnement : les niveaux inférence et tâche [Wielinga *et al.* 93]. Le modèle de l'expertise *CommonKADS* propose donc une décomposition des connaissances descriptives et opératoires en trois niveaux de modélisation, complémentaires et utilisables séparément [Albert 93] :

1. Le niveau **domaine** décrit l'ensemble des connaissances du domaine exploitées par les structures de raisonnement lors de la résolution de problèmes.
2. Le niveau **inférence** organise, au sein de structures de raisonnement, les connaissances du domaine suivant leur rôle dans la résolution de problèmes.
3. Le niveau **tâche** organise les tâches selon le but et les sous-buts de la méthode de résolution de problèmes. Il précise le contrôle, ou la dynamique, des structures de raisonnement utilisées pour atteindre ces buts de façon optimale.

Ces trois niveaux de modélisation sont liés : le niveau tâche contrôle les structures de raisonnement du niveau inférence et le niveau inférence utilise les connaissances descriptives du niveau domaine, figure 4.11a. Le modèle de l'expertise *CommonKADS* aborde une méthode de résolution de problèmes comme un moyen de contrôle des raisonnements effectués sur et avec les connaissances du domaine. Cette définition fonctionnelle et l'organisation structurelle du modèle de l'expertise conduit à inscrire les connaissances mises en œuvre par le SBC dans un espace à trois dimensions, reflet d'une certaine interdépendance de toutes les composantes, figure 4.11b.

<sup>18</sup> Les modèles d'interprétation sont des structures de raisonnement génériques (indépendantes d'un domaine d'application) adaptées à la résolution d'un type de problème (Diagnostic systématique de panne, par exemple). Ils permettent d'éviter la construction du modèle de l'expertise *ex nihilo* en proposant des exemples de structuration de la méthode de résolution de problèmes.

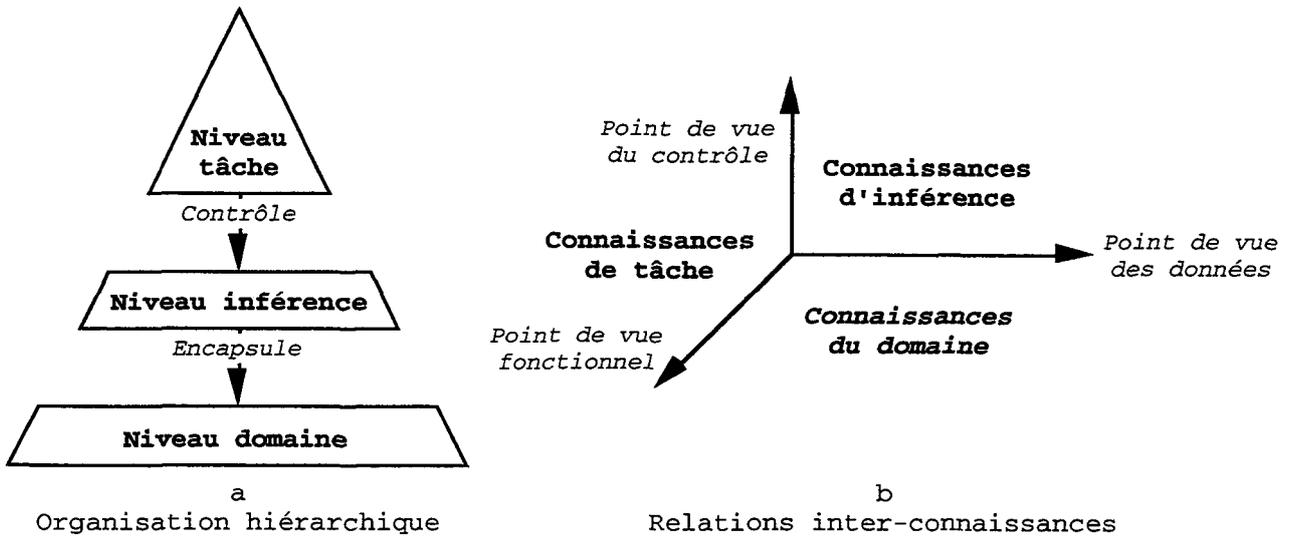


Figure 4.11 — Organisations du modèle de l'expertise CommonKADS.

À chaque niveau, le modèle de l'expertise CommonKADS définit des formalismes de modélisation permettant de décrire les connaissances nécessaires à la résolution de problèmes. Ces formalismes de modélisation sont énoncés dans le tableau 4.2.

Niveaux de modélisation	Formalismes de modélisation
Niveau domaine	Concept Propriété et valeur Expression Relation entre concepts Hiérarchie Réseau sémantique
Niveau inférence	Pas d'inférence Rôle statique et rôle dynamique Structure d'inférence
Niveau tâche	Hiérarchie de tâche Structure de tâche

Tableau 4.2 — Formalismes de modélisation du modèle de l'expertise CommonKADS.

Les trois prochaines sections décrivent, pour chaque niveau de modélisation, l'objet des formalismes qu'ils utilisent. Des exemples de ces formalismes sont donnés dans le chapitre 5 consacré à l'application de la méthodologie au domaine de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.

#### 4.2.2.1 Modèle au niveau domaine

Les formalismes de modélisation du niveau domaine permettent de caractériser et de relier entre elles les connaissances descriptives du domaine d'application. Un **concept** représente une entité physique ou logique du domaine d'application. Il est décrit et caractérisé par un ensemble de **propriétés valuées**. Une **expression** décrit, sous la forme d'un prédicat, d'une formule ou d'une règle, une relation logique permettant de représenter la connaissance sur les états d'une propriété. Les **relations entre concepts** précisent la sémantique des liens qui unissent les concepts du domaine d'application. Ces relations sont essentiellement binaires et orientées tels, par exemple, des liens de spécialisation, d'association ou de composition. La cardinalité d'une relation est définie par le minimum et le maximum du nombre des instances des concepts concernés. Les relations permettent d'organiser ou de composer les concepts sous la

forme de **hiérarchies** ou de **réseaux sémantiques**. En finale, le modèle au niveau domaine est le reflet de la vision structurée, selon le point de vue de l'expert, des connaissances du domaine sur et avec lesquelles il raisonne. Les structures de raisonnement sont modélisées au niveau inférence.

#### 4.2.2.2 Modèle au niveau inférence

Les types de connaissance du niveau d'inférence permettent de décrire l'organisation statique des raisonnements suivis par l'expert dans sa méthode de résolution de problèmes. La modélisation est réalisée en faisant abstraction des connaissances descriptives du domaine d'application. Les structures de raisonnement prennent la forme de **structures d'inférence**. Une structure d'inférence organise, dans un graphe de dépendance, des **pas d'inférence** (ou inférences primitives) qui pointent vers les connaissances du domaine à l'aide des **rôles**. La figure 4.12 présente la structure d'inférence relative à une tâche de Diagnostic systématique de panne [Wielinga *et al.* 92]. Le but de cette tâche est de trouver le plus petit équipement d'un système ayant un comportement défectueux.

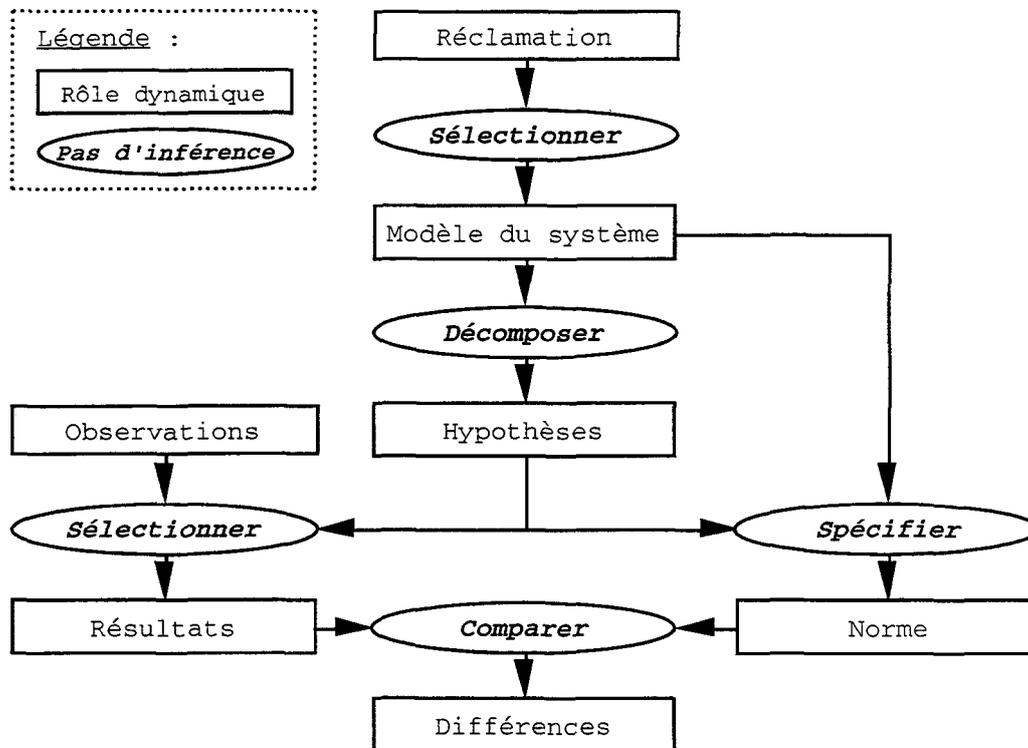


Figure 4.12 — Structure d'inférence de la tâche Diagnostic systématique de panne.

Un pas d'inférence est représenté par une ellipse et permet de spécifier une opération de transformation de connaissances primitive réalisée au cours du processus de raisonnement<sup>19</sup>. Une structure d'inférence combine des pas d'inférence sans en préciser le "quand" et le "pourquoi" ils seront activés, ni le "comment" ils seront utilisés. Elle spécifie une compétence de résolution de problèmes du SBC en mettant en évidence les dépendances entre les différentes inférences primitives. Les pas d'inférence opèrent sur les connaissances descriptives du domaine d'application par l'intermédiaire des rôles.

Un rôle est symbolisé par un rectangle et correspond à une entité abstraite qui, comme son nom le suggère, définit la façon dont les connaissances du domaine sont

<sup>19</sup> Il existe également des **pas d'inférence composites**. Un pas d'inférence composite représente une opération macroscopique décrite, à son tour, par une, ou plusieurs, structures d'inférence. La décomposition peut être multiple. La non unicité de décomposition est une caractéristique intéressante puisque un raisonnement produit souvent des résultats qui peuvent être obtenus de différentes façons. Un pas d'inférence composite est précisé à l'intérieur d'une ellipse dédoublée dans une structure d'inférence.

utilisées par le raisonnement. L'instanciation des rôles avec les connaissances du domaine permet d'appliquer le niveau de raisonnement sur le domaine d'application. Une structure d'inférence distingue deux types de rôle, selon l'usage et l'origine des connaissances du domaine qu'ils dénotent : le **rôle dynamique** et le **rôle statique**. Un rôle dynamique pointe sur les connaissances du domaine manipulées par le raisonnement. Il correspond à un résultat intermédiaire de la structure d'inférence : le résultat d'un pas d'inférence. Un rôle statique pointe sur les connaissances du domaine utilisées par le raisonnement sans les affecter. La représentation de ces ressources du raisonnement se distingue de celle des rôles dynamiques par un rectangle au contour appuyé.

Chaque structure d'inférence du modèle de l'expertise est entachée du point de vue de l'expert sur la résolution de problèmes, en ce sens que l'expert aborde un problème selon le point de vue induit par ses compétences. Le point de vue borne le champ d'application de la structure d'inférence. Quant à l'instanciation des rôles, elle permet de spécifier, non seulement les connaissances du domaine avec et sur lesquelles porte le raisonnement, mais aussi de contextualiser la vision des entités du niveau domaine. La structure d'inférence montre ainsi que le contexte d'un problème est directement fonction du point de vue qui régit sa résolution.

Les modalités d'exécution des structures d'inférence sont définies au niveau tâche du modèle de l'expertise.

#### 4.2.2.3 Modèle au niveau tâche

Le niveau tâche précise le contrôle sur le déroulement de la méthode de résolution de problèmes. Il est utilisé, d'une part, pour modéliser la décomposition hiérarchique du problème général à résoudre en sous-problèmes plus élémentaires et, d'autre part, pour décrire précisément comment chaque sous-problème doit être résolu. Les sous-problèmes sont modélisés en termes de tâches. Une tâche spécifie le but de la résolution de problèmes et la structure de contrôle des sous-tâches et/ou des structures d'inférence à exécuter pour atteindre ce but. Ces connaissances du niveau tâche sont modélisées à l'aide de deux formalismes complémentaires : la **hiérarchie de décomposition de tâche** et la **structure de tâche**.

Une tâche modélise un sous-problème, à un niveau précis d'abstraction, par l'ensemble de ses entrées-sorties. Elle inscrit une stratégie de résolution de problèmes en précisant les modalités de décomposition en sous-tâches plus élémentaires. La hiérarchie de décomposition de tâche matérialise les niveaux d'abstraction. Une hiérarchie de décomposition de tâche renferme trois types de tâches :

1. La **tâche composée** qui se divise en sous-tâches plus élémentaires.
2. La **tâche terminale** qui n'admet pas de décomposition. Elle active directement une inférence primitive, caractérisée au niveau inférence, dont elle porte généralement le nom.
3. La **tâche de transfert** caractérise une tâche en interaction avec un agent du monde extérieur, en général, l'utilisateur du SBC.

La hiérarchie de décomposition de tâche et *a fortiori* les connaissances d'inférence qu'elle contrôle sont raffinées progressivement au cours du cycle d'ASC pour évoluer vers la définition des tâches terminales. La figure 4.13 présente la hiérarchie de décomposition de la tâche Diagnostic systématique de panne. Les nœuds Générer les hypothèses et Tester les hypothèses sont des tâches composées. Les feuilles de la hiérarchie sont des tâches terminales, à l'exception de la tâche de transfert Obtenir.

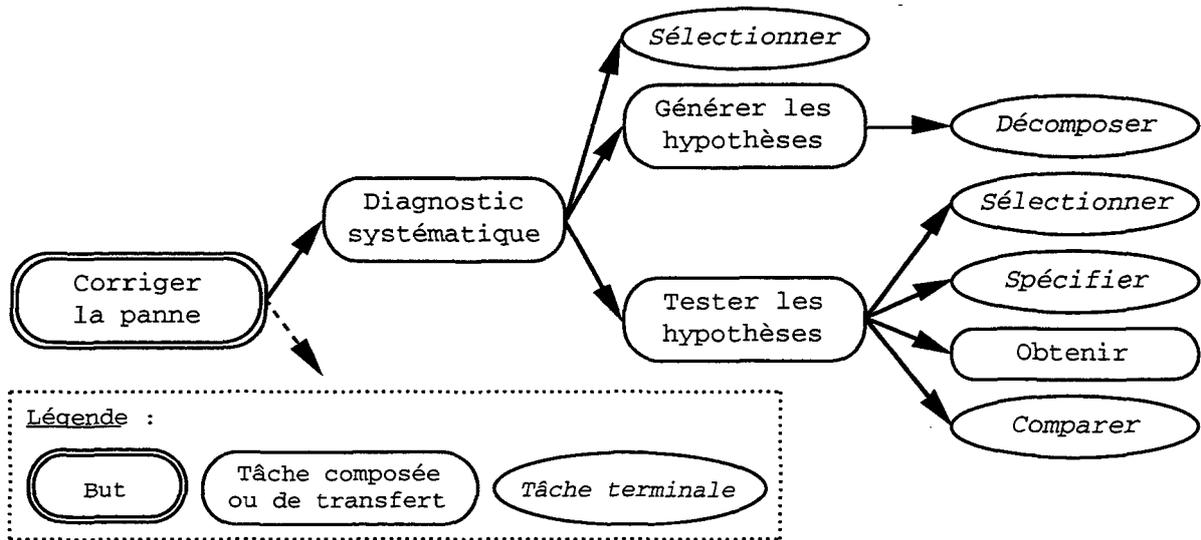


Figure 4.13 — Hiérarchie de décomposition de la tâche Diagnostic systématique de panne.

À chaque tâche de la hiérarchie de décomposition est associée une structure de tâche. Une structure de tâche est composée de deux parties : la **définition de la tâche** et le **corps de la tâche**. La définition de la tâche précise les moyens nécessaires à sa réalisation. C'est une spécification déclarative du but assigné à la tâche. Elle décrit de façon structurée la stratégie de résolution de problèmes. La description du corps de la tâche (ou méthode) relève d'une décomposition du but en sous-buts et/ou de l'expression du contrôle du raisonnement nécessaire pour accomplir la tâche. Dans ce dernier cas, le corps de la tâche est une spécification procédurale de l'organisation dynamique des structures d'inférence.

En conclusion, le modèle au niveau inférence définit et organise "statiquement" les raisonnements qui doivent être enchaînés pour résoudre le problème posé au SBC. Le modèle au niveau tâche "dynamise" ces raisonnements, c'est-à-dire qu'il précise quand, pourquoi et comment ils doivent être mis en œuvre, en leur associant les connaissances de contrôle de leur déroulement. Le modèle au niveau tâche fournit ainsi "la clé" de l'organisation des connaissances de résolution de problèmes au sein du modèle conceptuel de l'expertise.

Cette description des formalismes de connaissance du niveau tâche termine la présentation du modèle de l'expertise *CommonKADS* qui est au cœur de la méthodologie. Sa construction demande au cogniticien beaucoup d'investissements et de rigueur. L'utilisation d'un outil dédié, tel que KADS-Tool, n'en est que plus appréciable.

#### 4.2.4 KADS-Tool : l'outil de modélisation

L'élaboration du modèle de l'expertise est une tâche difficile. Le cogniticien doit veiller, tout au long de son travail, à maintenir la cohérence syntaxique et sémantique de l'ensemble des niveaux du modèle. Cette difficulté tient, non seulement au volume de connaissances et à la variété des formalismes de modélisation rigoureux manipulés, mais également à la complexité de l'expertise modélisée. Le cogniticien trouve en l'outil de modélisation KADS-Tool<sup>20</sup> [Albert 93] une assistance appréciable.

L'outil de modélisation KADS-Tool peut être assimilé à un éditeur spécialisé de connaissances au sens du modèle de l'expertise *CommonKADS*, auquel est associé la

<sup>20</sup> L'outil de modélisation KADS-Tool a été développé conjointement par les sociétés Ilog et Cap Gemini Innovation, suite aux travaux des projets européens KADS-I et KADS-II.

bibliothèque de modèles d'interprétation. Il assure, notamment, la traçabilité des connaissances par le maintien de liens entre les données brutes recueillies pour élaborer le modèle et le modèle construit. En outre, KADS-Tool veille à la cohérence, essentiellement syntaxique, des connaissances modélisées au fur et à mesure de l'enrichissement du modèle et dispose de procédures de gestion efficaces de la documentation du modèle engendré. Deux types de documentation sont gérés : une documentation analytique, prenant la forme d'un dictionnaire des connaissances classées alphabétiquement par type et par niveau de modélisation, et une documentation synthétique et explicative du modèle, combinant graphiques et textes, utilisée pour produire le dossier de spécification.

Nous terminons la présentation de la méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances par la description des étapes du RàPC. L'intérêt de ce mode de raisonnement pour l'assistance aux activités de résolution de problèmes en supervision des procédés automatisés complexes a été révélé par le modèle conceptuel de l'expertise [Caulier et Houriez 94b].

## 5 Processus de raisonnement à partir de cas

Une forme particulière du raisonnement analogique décrit dans le chapitre 2, notamment pour les tâches analytiques de diagnostic et de planification, est le RàPC. Il repose sur l'hypothèse que la résolution de problèmes consiste en l'accès à des informations mémorisées lors d'expériences passées et organisées en vue d'une exploitation ultérieure [Kolodner 92 ; Mignot 93]. Selon cette hypothèse, l'expertise humaine ne serait pas constituée par un ensemble de règles conditionnelles, mais plutôt par un grand nombre d'épisodes qu'il est possible de retrouver aisément en mémoire et de généraliser.

### 5.1 Introduction au raisonnement à partir de cas

Le RàPC tire ses origines de travaux en psychologie cognitive sur la réutilisation de connaissances et l'étude de la mémoire<sup>21</sup>. Ce mode de raisonnement a vu le jour, aux États-Unis, il y a environ dix ans<sup>22</sup>. Pour principe de base, il pose qu'il est préférable, pour effectuer un nouveau traitement, d'utiliser, éventuellement en les modifiant, une, ou plusieurs, expériences (ou cas) du domaine d'application mémorisées. Le RàPC peut être appréhendé comme un raisonnement analogique complété par des mécanismes de mémorisation et d'extraction des expériences, et conçu pour une tâche et un domaine d'application bien spécifiques.

Le RàPC est particulièrement adapté aux domaines pour lesquels la théorie est incomplète, inconsistante, complexe voire inexistante. Deux types de tâches sont généralement distinguées dans le RàPC [Maurice-Demourieux *et al.* 93 ; Bichindaritz 94] :

<sup>21</sup> Plusieurs théories de la mémoire ont successivement dominé [Fortin et Rousseau 93]. Parmi celles-ci, les théories fondamentales sont la théorie des mémoires sémantique [Quillian 68] et épisodique [Tulving 72], la théorie des scripts [Schank et Abelson 77] et la théorie de la mémoire dynamique [Schank 82]. Cette dernière a donné naissance aux premiers systèmes de RàPC [Slade 91].

<sup>22</sup> Le premier *workshop* américain sur le RàPC a eu lieu en 1988 [DARPA 88]. D'autres ont eu lieu en 1989 [DARPA 89] et en 1991 [DARPA 91]. En Europe, plusieurs pays, comme l'Allemagne, l'Angleterre ou encore la France, organisent régulièrement des séminaires de recherche. Les premières manifestations européennes sur le sujet se sont tenues en 1993 à Kaiserslautern [EWCBR 93], en 1995 à Chantilly [EWCBR 94] et en 1996 à Lausanne [EWCBR 96]. Enfin, la première conférence internationale sur le RàPC a eu lieu, en 1995, à Sésimbra [ICCBR 95]. En outre, il existe en Europe, à notre connaissance, deux programmes importants sur le thème du RàPC. Le programme européen ESPRIT : INRECA (*INtegrated REasoning from CAses*, programme P6322) porte sur des méthodes et une boîte à outils pour développer, valider et maintenir les systèmes d'aide à la décision [Manago *et al.* 93]. Le second programme, FABEL, est à l'initiative du ministère allemand de la recherche et concerne la réalisation d'une maquette de recherche fondée sur des cas de dessins techniques [Voß et Schmidt-Belz 93].

1. La **résolution de problèmes** : elle consiste à trouver un chemin, par une suite d'inférences, entre les données d'un problème et une, ou plusieurs, solutions. De même, dans un système de résolution de problèmes à partir de cas, les expériences passées ont pour rôle de proposer une solution, ou une séquence de résolution, en terme de suite d'inférences, pour satisfaire les objectifs et les contraintes posés par le problème nouveau. Les problèmes résolus peuvent relever, soit de tâches analytiques, telles que le diagnostic ou la planification, soit de tâches synthétiques, telles que la conception. Les tâches analytiques disposent d'un ensemble fini de solutions de taille restreinte. À la différence, les tâches synthétiques sont telles que l'ensemble des solutions n'est pas connu à l'avance et est potentiellement infini [Clancey 85].
2. L'**interprétation** : elle concerne l'évaluation de situations ou de solutions dans le contexte d'expériences précédentes ou la comparaison et le contraste de cas pour interpréter une situation nouvelle.

En supervision des procédés automatisés, les tâches confiées à l'opérateur humain sont, pour l'essentiel, des tâches de résolution de problèmes. Dans ce contexte, le RàPC de résolution de problèmes constitue un mode de raisonnement pertinent et efficace.

## 5.2 Étapes constitutives du raisonnement à partir de cas

Le raisonnement dans un système de résolution de problèmes à partir de cas enchaîne plusieurs étapes structurées selon l'organigramme fonctionnel de la figure 4.14 [Aamodt et Plaza 94] :

1. L'évaluation du problème à résoudre.
2. La recherche, dans une mémoire de cas, des candidats potentiels et la sélection du, ou des, meilleurs cas.
3. L'adaptation éventuelle du, ou des, cas sélectionnés au problème à résoudre suivie de la proposition d'une solution.
4. L'évaluation de la qualité de la solution proposée.
5. L'apprentissage entraînant la modification de la mémoire de cas.

La première étape consiste à fournir au système le problème à résoudre. Celui-ci peut être décrit *a priori* sous n'importe quelle forme. Une phase d'évaluation du problème à résoudre modifie la représentation du problème posé de façon à ce qu'il puisse être comparé aux cas de la mémoire de cas. Ensuite, débute la recherche du ou des meilleur(s) cas à utiliser pour résoudre le problème posé. Celle-ci est réalisée en deux phases. La première phase consiste à extraire de la mémoire de cas les cas en rapport avec le problème à traiter. La seconde phase, la phase de classement selon une évaluation de similarité, permet de sélectionner le ou les meilleurs. La solution du ou des cas les plus proches est alors utilisée pour construire la solution recherchée. Elle est éventuellement adaptée au nouveau problème puis évaluée. Si elle ne convient pas, elle peut être corrigée. Enfin, le nouveau problème résolu peut, à son tour, être stocké dans la mémoire de cas pour un cycle de raisonnement ultérieur du système. Ce principe constitue l'apprentissage de base d'un système de RàPC.

Un tel cycle de RàPC évoque dans le principe des connaissances :

- d'évaluation du nouveau problème à résoudre ;
- d'organisation de la mémoire de cas ;
- d'évaluation de la ressemblance ;
- d'adaptation de la solution proposée ;
- d'amélioration de la solution en cas d'échec.

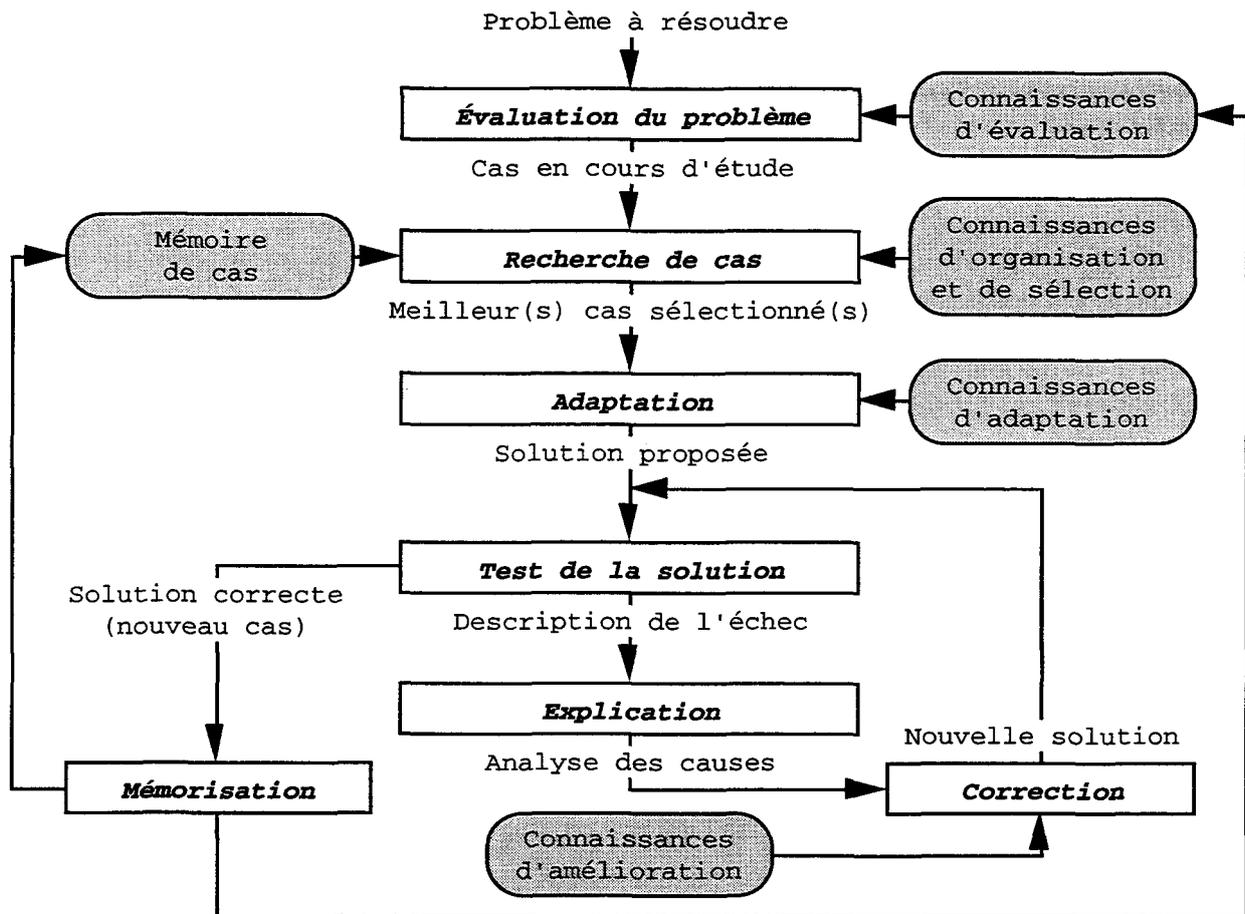


Figure 4.14 — Cycle du raisonnement à partir de cas [Slade 91].

Après une présentation des aspects relatifs à la mémoire de cas, au concept de cas et à l'organisation de la mémoire de cas, nous précisons dans le détail l'objet des étapes du RàPC.

### 5.2.1 Mémoire de cas

Pour fonctionner, le RàPC utilise des cas stockés dans une mémoire ou une base de cas. Celle-ci doit être représentative de l'ensemble des problèmes susceptibles d'être posés au système. L'organisation de la mémoire de cas est un paramètre important de l'efficacité du RàPC.

### 5.2.2 Le cas : une structure en mémoire

Un **cas** est une entité au sein de laquelle sont réunies les connaissances expérimentales relatives au problème passé. Les éléments de sa représentation sont appelés des **descripteurs** ou des **indices de description**. Ainsi, un cas, dans sa composante descriptive, peut être représenté par une conjonction de descripteurs :

$$\text{Cas} = \left\{ \bigwedge_{i=1}^n (D_i) \right\}$$

La détermination des descripteurs utiles aux étapes futures du raisonnement et, en finale, à l'utilisateur du système de résolution de problèmes à partir de cas, est perçue, depuis la théorie de la mémoire dynamique, comme le problème le plus important pour le RàPC. Il consiste à déterminer ce qui, dans la représentation du problème, en fait un cas

qui sera réutilisable par la suite, c'est-à-dire les descripteurs significatifs pour la tâche à résoudre [Kolodner 93]. Les descripteurs sont exprimés en fonction des connaissances du domaine. Leur détermination exige une bonne compréhension du domaine d'application et de la tâche à réaliser. Pour aborder ce problème, notre méthodologie propose de se référer au modèle conceptuel de l'expertise présenté précédemment, de façon à identifier et caractériser l'ensemble des descripteurs utiles à la sémantique du cas [Caulier et Houriez 95b].

Les critères permettant d'évaluer la qualité des descripteurs sont variés. Parmi ceux-ci, citons :

- la **capacité de prédiction** : les descripteurs doivent avoir joué un rôle dans l'élaboration de la solution du problème ;
- l'**abstraction** : un cas doit pouvoir être utilisé dans plusieurs situations ;
- le **caractère concret** : un cas doit pouvoir être reconnu rapidement, sans trop d'inférence ;
- la **fonctionnalité** et la **pertinence** : c'est-à-dire l'aptitude à indiquer les circonstances dans lesquelles le cas est pertinent ;
- la **généralité**, la **spécificité**, l'**utilité** et le **pouvoir de discrimination**.

Respecter ces critères amène à faire des compromis, par exemple entre abstraction et spécialisation.

Pour une tâche de résolution de problèmes, la représentation du cas, comprend tous les éléments ayant servi à sa résolution. Par exemple, dans le domaine de la supervision des procédés automatisés complexes, les descripteurs pertinents d'une perturbation, pour le raisonnement et l'opérateur de supervision, se répartissent en plusieurs catégories [Caulier et Houriez 95a] : la description des symptômes de l'incident, ses conséquences, sa cause, la stratégie de diagnostic suivie, une solution justifiée (ou différents types de solution) et, éventuellement, les effets produits par l'application de cette solution. Ces connaissances sont spécifiques et opérationnelles par rapport à leur contexte. La représentation du problème doit donc également inclure celle du contexte dans lequel le cas s'est produit [Caulier et Houriez 95a]. Ainsi, un problème forme un ensemble cohérent et comporte une explication reliant ses différents descripteurs vis-à-vis de sa résolution.

### 5.2.3 Organisation de la mémoire de cas

Deux structures d'organisation de la mémoire de cas sont distinguées [Maurice-Demourieux *et al.* 93] : l'organisation **plate** et l'organisation **hiérarchisée**.

Dans le cas d'une mémoire plate, tous les cas sont organisés au plus haut niveau de la mémoire. Il est alors facile d'ajouter un nouveau cas à la mémoire. Par contre, la recherche d'un cas est très coûteuse car la totalité de la mémoire de cas est examinée. Ce mode d'organisation de la mémoire de cas est donc souvent inutilisable dans le cadre d'un système interactif [Maurice-Demourieux *et al.* 93].

L'organisation hiérarchisée est proposée pour optimiser l'étape de recherche. Elle repose sur une discrimination des cas selon la valeur de leurs descripteurs. Cette organisation de la mémoire de cas implique l'existence d'une hiérarchisation des descripteurs. Il existe essentiellement deux types d'organisation hiérarchisée :

1. L'organisation en **réseau à caractéristiques partagées** : dans ce type d'organisation hiérarchisée, les cas sont regroupés suivant leur similarité. Le regroupement des cas favorise, par voie de conséquence, la discrimination entre eux, mais elle est secondaire par rapport au regroupement. Un nœud du réseau

associe un ensemble de descripteurs et leurs valeurs. Ces valeurs sont partagées dans le réseau par tous les cas associés aux descendants de ce nœud. Ce type d'organisation fait appel à des méthodes de catégorisation conceptuelle. La mémorisation peut être redondante, ce qui signifie qu'un même cas peut être stocké à plusieurs endroits dans la mémoire, comme dans le système IPP [Lebowitz 82].

2. L'organisation en **réseau de discrimination** : les cas sont mémorisés ou accessibles à partir des nœuds d'un réseau orienté sans cycle (en général, un arbre). Les nœuds de ce réseau contiennent un test sur la valeur d'un descripteur. Chaque nœud subdivise l'ensemble des cas selon la réponse à cette question. Les cas sont ainsi regroupés suivant des descripteurs à fort pouvoir de discrimination.

Nous considérons l'organisation hiérarchique de la mémoire de cas comme un moyen efficace de prise en compte de la notion de point de vue sur la résolution de problèmes par un système RàPC [Caulier et Houriez 95a]. Le point de vue constitue le principe organisateur de la mémoire de cas. Les descripteurs pertinents pour l'organisation hiérarchique de la mémoire de cas forment une conjonction de descripteurs pondérés selon leur importance dans la résolution de problèmes. À chacun de ces descripteurs  $d_i$  est associée une variable de pondération de pertinence  $w_i$ . Sa valeur traduit le point de vue adopté par l'utilisateur du système de RàPC sur la résolution de problèmes. Les valeurs des variables de pondération de pertinence sont appréciées par le modèle de l'expertise du domaine d'application [Caulier et Houriez 95b]. De façon descriptive, le point de vue  $v_j$  d'un opérateur  $j$  peut être représenté par une conjonction de  $n$  descripteurs  $D_{ij}$ , chacun étant renseigné et associé à une variable de pondération de pertinence  $w_{ij}$  :

$$v_j = \bigwedge_{i=1}^n (x_{ij}, w_{ij})$$

La perspective d'une organisation multi dimensionnelle de la mémoire de cas permet de représenter plusieurs points de vue (création d'une base de réseaux organisationnels de la mémoire de cas) et d'envisager la remémoration multiple. L'étape de récupération des cas candidats s'effectue alors selon un (récupération simple) ou plusieurs (récupération multiple) points de vue. Dans ce dernier cas, le raisonnement multi points de vue considère l'union ou l'intersection des ensembles de cas candidats retournés par chaque réseau.

#### 5.2.4 Évaluation du problème à résoudre

L'évaluation du problème à résoudre consiste à analyser sa description initiale et à la transformer de façon à ce qu'elle soit exprimée dans le même langage que les cas en mémoire. Le nouveau problème devient alors un nouveau cas : le cas en cours d'étude ou le cas courant. Il constitue le point de départ de l'étape de recherche du, ou des, cas candidats à sa résolution.

#### 5.2.5 Remémoration de cas

Le problème de la remémoration est de trouver un ou plusieurs cas voisins pour la tâche à accomplir. Plus généralement, c'est le problème de la recherche des cas utiles au raisonnement. Des algorithmes de **recherche** explorent la mémoire de cas. Ils font tous intervenir les descripteurs du cas courant, c'est-à-dire les dimensions de la description du cas en cours d'étude jugées utiles pour l'évaluation de la similarité. L'utilité<sup>23</sup> des cas

<sup>23</sup> Utilité et similarité ne sont pas nécessairement synonymes. Le système HYPO [Ashley et Rissland 87], par exemple, recherche des cas qui sont "différents" du problème à résoudre.

recupérés est déterminée par des algorithmes d'**appariement** et de **classement**, figure 4.15.

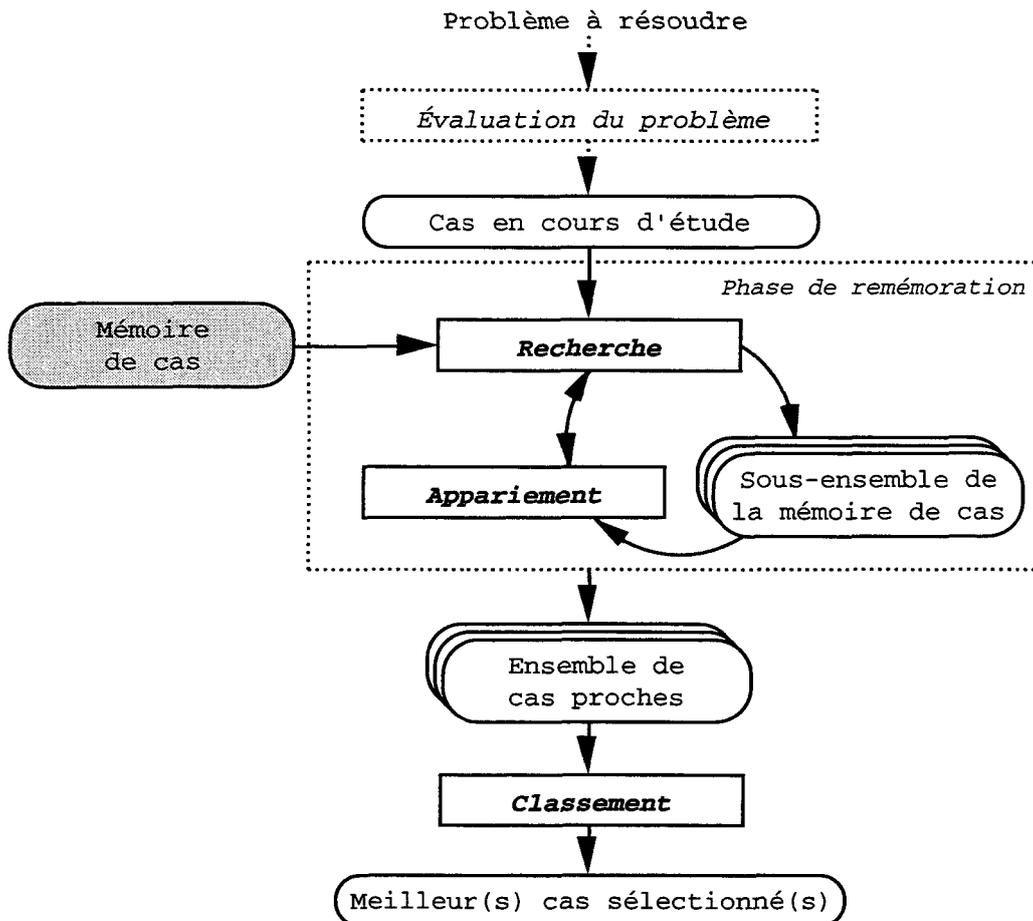


Figure 4.15 — *Processus de recherche des meilleurs candidats dans la mémoire de cas.*

#### 5.2.5.1 Extraction des candidats potentiels

La phase de recherche sélectionne un certain nombre de cas potentiels et la phase d'appariement évalue leur similarité avec le cas courant. Ces deux phases peuvent être aussi entremêlées, mais généralement elles se succèdent. Les algorithmes de recherche, sont variés et fortement tributaires de l'organisation de la mémoire de cas :

- la recherche en **largeur** est utilisée dans les organisations plates. À partir d'une liste numérotée de cas, par exemple, le système examine chacun des cas et évalue sa ressemblance avec le cas en cours d'étude. L'ensemble des cas extraits est alors constitué de tous les cas en mémoire. Le ou les cas retenus sont ceux qui présentent la plus grande ressemblance. Une telle recherche séquentielle est très longue et rend nécessaire la recherche parallèle dès que la mémoire de cas atteint une taille appréciable ;
- la recherche en **profondeur** est employée dans les organisations hiérarchiques et peut être séquentielle ou parallèle. Dans les réseaux à caractéristiques partagées, la descente dans la hiérarchie consiste à rechercher, à chaque niveau, les nœuds dont les caractéristiques sont partagées par le nouveau cas. Dans les réseaux de discrimination, la descente consiste à choisir les nœuds pour lesquels le cas en cours d'étude répond favorablement à une question.

La recherche en profondeur permet au système de prendre en compte la notion de point de vue sur la résolution de problèmes [Caulier et Houriez 95a]. En effet,

l'extraction des cas candidats à la résolution d'un cas courant  $C_c$  exploite les résultats du réseau d'organisation de la mémoire de cas auquel est associé un point de vue  $v$  :

$$\text{Rechercher}(C_c, v) \text{ avec } C_c = \left\{ \bigwedge_{i=1}^n (Dc_i) \right\}$$

### 5.2.5.2 Sélection du meilleur candidat

La phase d'extraction a permis de récupérer un, ou plus souvent, un ensemble de cas candidats potentiels au raisonnement. En général, ces cas ne se ressemblent pas. L'**appariement**<sup>24</sup> est partiel et doit être évalué pour permettre la sélection du plus proche. Le problème de l'évaluation de similarité prend, dans cette phase, une importance maximale. L'appariement de cas fait appel à :

1. La **recherche des correspondances entre descripteurs**, c'est-à-dire la définition des traits à appairer dans la description des cas. Elle peut être réalisée à partir d'un critère d'égalité des rôles structurels joués par les descripteurs dans les cas.
2. Le **calcul du degré d'appariement des descripteurs**. Soit deux descripteurs, l'un  $Dc_i$  appartenant au cas courant, ou cas cible, l'autre  $Ds_i$  à un cas mémorisé, ou cas source. La mesure de similarité entre ces deux descripteurs est exprimée par une fonction  $\text{Sim}(Dc_i, Ds_i)$ . Cette fonction peut être quantitative ou qualitative.
3. La **pondération éventuelle des descripteurs du cas**. Elle peut être également qualitative ou quantitative. Elle peut être calculée par des méthodes statistiques ou analytiques [Ashley 89] ou attribuée par un expert du domaine d'application. La pondération permet une prise en compte dynamique des connaissances contextuelles. Les poids sont attribués suivant la fonction des descripteurs dans la résolution de problèmes et permettent de tenir compte du contexte [Caulier et Houriez 95a]. L'intensité de la similarité est ainsi fonctionnellement quantifiée.

Des heuristiques relevant de l'expertise doivent être acquises pour permettre d'appairer les cas retrouvés. Celles-ci sont, dans notre méthodologie, fournies par le modèle de l'expertise suite à la phase de spécification [Caulier et Houriez 95b].

En finale, une étape de **classement** soumet à exploitation les cas remémorés selon l'ordre défini par leur score d'appariement avec le problème à résoudre, et donc suivant leur degré de pertinence pour la résolution du problème courant.

### 5.2.6 Adaptation de la solution

L'utilisation du cas sélectionné est dépendante du type de tâche réalisée par le système de RàPC. Concernant la résolution de problèmes, l'utilisation d'un cas remémoré pour résoudre un nouveau cas peut prendre plusieurs formes [Kolodner 87] :

- **transférer sa solution**, directement ou en l'adaptant ;
- **transférer sa séquence de résolution**, directement ou en l'adaptant ;
- **créer une abstraction des descriptions de problème des deux cas**, la compléter par l'abstraction de la solution à l'ancien cas et appliquer cette solution abstraite à la résolution du cas courant. Dans cette solution, des règles de transformation abstraites doivent être ajoutées au système. Celles-ci peuvent être indépendantes du domaine d'application [Collins 89].

<sup>24</sup> Cette étape porte aussi le nom de "mise en correspondance" à l'image de la terminologie utilisée pour décrire le processus de raisonnement analogique.

Ainsi, une étape d'adaptation de la solution du cas sélectionné en fonction du cas en cours d'étude est en général nécessaire. Il existe principalement deux types de méthodes : les méthodes par **substitution** et les méthodes par **transformation**. Les méthodes d'adaptation par substitution consistent à remplacer une valeur du cas sélectionné, jugée inadéquate dans un trait mis en correspondance, par une nouvelle valeur. Les méthodes d'adaptation par transformation visent à transformer une solution passée en une solution qui satisfera le nouveau problème. Dans son livre, Kolodner [93] développe les composantes de chacune de ces méthodes.

### 5.2.7 Évaluation de la solution

L'évaluation de la qualité de la solution proposée par le système de RàPC comporte deux facettes : une évaluation **interne** et une évaluation **externe**.

1. L'évaluation interne émane d'un raisonnement critique du système sur son propre travail, avant le retour d'expérience. Si cette évaluation est négative, par exemple si la recherche en mémoire d'un cas analogue au nouveau problème est mémorisée comme un échec, l'étape d'adaptation doit être réitérée jusqu'à aboutir à une solution ne correspondant pas à un échec mémorisé. Ce type d'évaluation relève d'un méta-raisonnement.
2. L'évaluation externe nécessite la confrontation de la solution avec l'expérience dans le domaine d'application qui peut être un succès ou un échec. Dans ce dernier cas, elle conduit à une explication de l'échec et à sa mémorisation.

### 5.2.8 Stockage dans la mémoire de cas

Le stockage d'un nouveau cas en mémoire correspond à l'apprentissage de base réalisé par un système de RàPC. Cette insertion du nouveau cas entraîne un enrichissement et une éventuelle réorganisation de la mémoire de cas. Un autre apprentissage peut se produire à l'issue de la phase d'évaluation de similarité lorsque la solution s'avère inexacte. Les connaissances apprises doivent éviter de reproduire, à l'avenir, la même erreur.

## 6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation d'une méthodologie interdisciplinaire dédiée au développement de systèmes d'assistance à la supervision de procédés dynamiques complexes fondés sur la capitalisation et à la réutilisation de l'expérience. Élaborée à partir d'une étude des aspects fondamentaux liés au contexte d'application, la méthodologie s'efforce d'analyser puis de prendre en compte les caractéristiques, les contraintes et les besoins du futur utilisateur du système. Sa description est structurée en quatre parties.

Après une définition de la notion d'expérience, la première partie a montré l'intérêt du retour d'expérience, non seulement pour l'efficacité de l'activité collective de résolution de problèmes, mais également pour la pérennité du capital de connaissances que constitue l'expérience d'une entreprise. Toutefois, elle a souligné les difficultés de la mise en pratique du retour d'expérience. En réponse à ces limites, nous proposons diverses modalités pour la maîtrise du retour d'expérience. La mise en œuvre de ces modalités est l'un des objectifs de la méthodologie.

La deuxième partie présente et décrit les phases et les acteurs de la méthodologie. Celle-ci s'inscrit dans un cycle de développement dont la principale originalité concerne

les phases de spécification et de conception du système d'assistance. La phase de spécification s'appuie sur la mise en œuvre d'un cycle incrémental d'ASC dont l'objectif est la construction du modèle conceptuel de l'expertise du domaine d'application. Par son haut niveau d'abstraction et la richesse de ses formalismes de modélisation, le modèle conceptuel constitue un guide à l'activité d'ASC, un outil de communication accessible à l'ensemble des participants au projet et est le siège des spécifications pour la phase de conception. L'objet de la méthodologie et les orientations du modèle conceptuel de l'expertise définies par l'application conduisent la phase de conception à faire le choix, d'une part, des objets structurés pour la représentation des connaissances descriptives du domaine d'application et, d'autre part, du RàPC pour la représentation de la réutilisation de l'expérience au sein du système d'assistance. Parmi les participants au développement de la méthodologie, l'utilisateur occupe une place centrale dans la phase de spécification et les validations qui jalonnent le développement du système. Pour conclure cette partie, nous avons abordé les notions de point de vue et de contexte qui jouent un rôle fondamental dans la maîtrise des connaissances. Ces notions sont positionnées par la suite en regard des problèmes de modélisation et de représentation des connaissances et du RàPC.

La troisième partie développe les deux étapes de recueil et de modélisation des connaissances resituées dans le cycle d'ASC. L'étape de recueil des données de l'expertise amène le cogniticien à rassembler des connaissances dans chacune des catégories de connaissance impliquées dans la méthode de résolution de problèmes qui sera mise en œuvre par le système final. Il est aidé dans cette tâche, longue et rigoureuse, par différentes méthodes complémentaires issues essentiellement de travaux en psychologie cognitive. L'étape de modélisation concerne la construction proprement dite du modèle conceptuel de l'expertise. Celle-ci repose sur l'utilisation et l'organisation des formalismes de modélisation définis par le modèle de l'expertise *CommonKADS*. L'élaboration du modèle conceptuel de l'expertise a été, pour nous, l'occasion de formaliser les notions de point de vue et de contexte qui, bien que souvent implicites, sont essentielles pour la définition d'une méthode de résolution de problèmes.

Enfin, la dernière partie du chapitre décrit l'objet et le déroulement des étapes du cycle de RàPC. Cette description du RàPC est motivée par le double souci, d'une part, de concrétiser la méthode de résolution de problèmes par réutilisation de l'expérience mise en évidence par l'analyse de l'activité des opérateurs de supervision et, d'autre part, pour la phase de conception, de réutiliser au mieux les résultats des travaux menés sur le RàPC. Comme nous l'avons fait au niveau spécification, nous détaillons comment sont traduites au niveau conception les notions de point de vue et de contexte. En finale, la méthodologie propose une démarche structurée permettant d'aborder un projet de développement d'un système de résolution de problèmes à partir de cas. Elle comble en cela une insuffisance de travaux exposée par la bibliographie sur la mise en application du RàPC.

La méthodologie que nous avons développée dans ce chapitre a été appliquée au développement d'un système de capitalisation et de réutilisation de cas d'incident destiné à assister les opérateurs de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France dans leurs activités de résolution de problèmes. Le chapitre 5 présente les principaux résultats des phases de spécification et de conception de ce système.

## Chapitre 5

# Spécification et conception de SACRÉ : Système d'Assistance à la Capitalisation et à la RÉutilisation de connaissances

### 1 Introduction

La méthodologie présentée au chapitre 4 a pour principal objectif le développement d'un système de capitalisation et de réutilisation de connaissances destiné à aider les opérateurs de supervision dans leurs activités complexes de résolution de problèmes. Elle s'articule autour de deux phases majeures : la spécification et la conception du système. La phase itérative de spécification débouche sur le modèle conceptuel de l'expertise du domaine d'application. Les spécifications de ce modèle conduisent la phase de conception à faire le choix, d'une part, des objets structurés pour la représentation des incidents déclarés sur le procédé supervisé et, d'autre part, du Raisonnement à Partir de Cas (RàPC) pour permettre au système la maîtrise du retour d'expérience.

La méthodologie a été confrontée au domaine particulier de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Une telle mission de supervision, dont l'objectif est globalement de veiller en continu au bon écoulement du trafic téléphonique au travers du Réseau Téléphonique Commuté (RTC) de l'Île de France, constitue une tâche complexe qui requiert des connaissances importantes et de tous ordres. Au-delà d'une connaissance structuro-fonctionnelle du RTC concerné par la supervision, un large éventail de connaissances de surface est progressivement accumulé par les opérateurs au fil de la pratique et de l'observation. Ces connaissances empiriques sont aujourd'hui précairement résidentes dans la mémoire épisodique des opérateurs ou dans quelques documents écrits peu structurés et non organisés à une fin de réutilisation. Ce dernier

constat et l'observation de tentatives de réutilisation de ces connaissances par les opérateurs ont motivé l'application d'une démarche de capitalisation et de réutilisation de l'expérience dont le principal résultat est une maquette expérimentale baptisée SACRÉ<sup>25</sup>. Son développement fait l'objet des deux parties de ce chapitre.

La première partie relate les résultats significatifs de la phase de spécification. Nous commençons par présenter l'organisation de l'activité de recueil des données de l'expertise exercée au Centre de Supervision du Réseau (CSR) de Paris-Montsouris. Les données obtenues permettent la construction incrémentale du modèle conceptuel des connaissances de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Pour chacun des niveaux de ce modèle, nous exposons les principaux résultats obtenus et précisons leurs apports pour la conception de SACRÉ. Les aspects liés à la vérification et à la validation du modèle conceptuel de l'expertise sont également abordés. Enfin, nous tirons quelques enseignements de la pratique des formalismes de modélisation du modèle de l'expertise *CommonKADS* et de l'outil de modélisation *KADS-Tool*.

La seconde partie concerne la conception de SACRÉ dont les orientations émanent des spécifications du modèle conceptuel de l'expertise du domaine d'application. La présentation de l'architecture logicielle de SACRÉ introduit deux modes d'utilisation. Un mode qualifié "d'expert" destiné à constituer et à organiser la base de cas d'incident du système et un mode dit "utilisateur" dédié à la réutilisation des cas d'incident de la base. Nous détaillons successivement les modalités de mise en œuvre de chacune des composantes des modes d'utilisation de SACRÉ.

## 2 Spécification de SACRÉ

La conception d'un Système à Base de Connaissances (SBC), utile pour et utilisé par son utilisateur, exige une phase préalable de spécification des connaissances du domaine d'application. Ce travail a pour objectifs :

- de prendre en compte, dès le début du développement du SBC, l'activité, les ressources, les contraintes, les besoins et les attentes de l'opérateur, futur utilisateur du SBC ;
- de formaliser, d'une façon précise et non ambiguë, l'ensemble des connaissances du domaine d'application relatives à la méthode de résolution de problèmes qui sera mise en œuvre par le SBC.

D'après la méthodologie présentée au chapitre précédent, atteindre ces objectifs réclame la construction du modèle conceptuel de l'expertise selon un cycle incrémental d'Acquisition Structurée des Connaissances (ASC). Le cycle englobe successivement, et de façon itérative, une étape de recueil des données de l'expertise, une étape de modélisation et une étape de vérification et de validation du modèle. Cette première partie du chapitre détaille les résultats de l'application de chacune de ces étapes au domaine de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.

### 2.1 Recueil des données de l'expertise

L'expertise dans un domaine d'application relève de l'organisation et de la façon d'utiliser les connaissances relatives au domaine. L'organisation des connaissances sous-tend la définition de types de connaissance donnés pour et au travers de concepts propres au domaine d'application. La façon d'utiliser les connaissances du domaine se

---

<sup>25</sup> Abréviation de Système d'Assistance à la Capitalisation et à la Réutilisation de connaissances.

doit d'être le reflet des raisonnements utilisés pour la résolution de problèmes. Formaliser ces connaissances descriptives et opératoires du domaine d'application nécessite un premier travail de collecte des données de l'expertise.

Ce paragraphe présente l'organisation du travail de recueil des données de l'expertise de supervision du trafic téléphonique. Il s'est échelonné sur une période de près d'un an dont un semestre, environ, consacré directement à des séances de travail au CSR de Paris-Montsouris, à raison de une à deux journées par semaine en moyenne. L'activité de recueil des données de l'expertise peut être décomposée en trois parties [Caulier et Perron-Bouvier 94b] :

1. Le recueil des connaissances descriptives.
2. L'analyse de la tâche.
3. L'analyse de l'activité et des traces de l'activité.

La première activité concerne le recueil des concepts du domaine, de leurs caractéristiques et de leurs relations. Les deux suivantes s'intéressent, plus particulièrement, à l'analyse de la façon dont les opérateurs de supervision utilisent les connaissances du domaine, c'est-à-dire aux raisonnements qui composent la méthode de résolution de problèmes qui sera mise en œuvre par le SBC. En pratique, ces trois parties de l'activité s'entremêlent. La présentation éclatée qui en est faite, ci-dessous, vise un but de clarté de l'exposé. Chacune des parties est maintenant déclinée par la description de : son but, des sources de l'expertise examinées, des méthodes de recueil utilisées et des résultats obtenus.

### 2.1.1 Recueil des connaissances descriptives

Le but de cette activité est, pour le cognicien, de se constituer un premier référentiel structuré de connaissances descriptives à partir duquel il pourra affronter plus sereinement la complexité du domaine d'application. En pratique, le recueil des connaissances descriptives, de leurs caractéristiques et de leurs relations ne nécessite pas une présence fréquente et prolongée sur le site, mais constitue un travail long et rigoureux de collecte, de compréhension, d'identification, de caractérisation et d'organisation des connaissances. Il se déroule suivant le schéma de la figure 5.1.

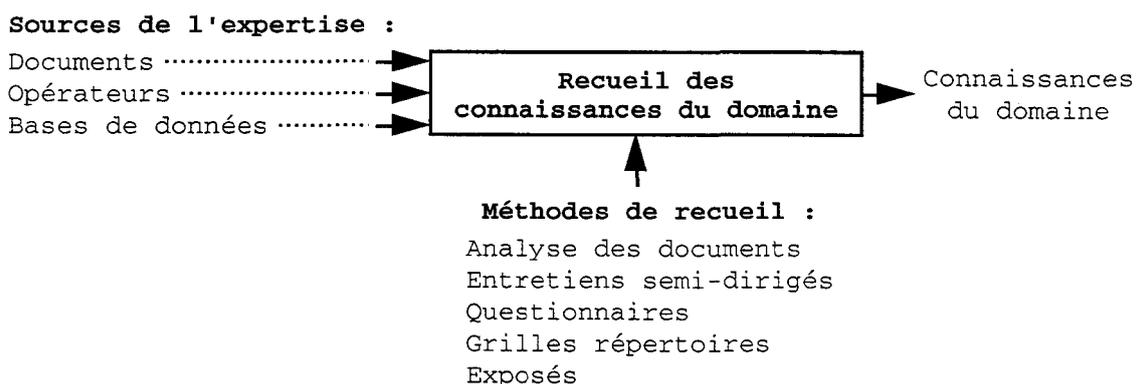


Figure 5.1 — *Recueil des connaissances du domaine.*

Les sources de l'expertise sollicitées au cours du travail de recueil des connaissances du domaine ont été de différentes natures :

- documents relatifs au domaine d'application ;
- opérateurs de supervision et spécialistes de la topologie du RTC et des règles d'acheminement du trafic téléphonique en Île de France ;
- bases de données du superviseur de trafic et de l'outil de péri-supervision BDIR.

Le recueil des connaissances du domaine a débuté par un examen minutieux et attentif de la littérature relative au domaine. Initialement d'ordre général, les documents consultés se sont progressivement spécialisés jusqu'à concerner les documents de travail des opérateurs en charge de la supervision du trafic téléphonique. Les principaux thèmes abordés par ces documents concernent :

- le RTC de l'Île de France et les principes de sa gestion ;
- les règles d'acheminement, de débordement et de partage de charge du trafic téléphonique de l'Île de France ;
- l'utilisation du superviseur de trafic ;
- les fonctions d'état relatives aux commutateurs et aux faisceaux supervisés.

L'analyse des documents a porté aussi bien sur leur fond que sur leur forme. Par exemple, il est très intéressant de constater que l'opérateur utilise la documentation d'une façon bien spécifique. En effet, il crée ses propres classeurs avec des extraits choisis de documents. Ces documents sont ensuite enrichis par des annotations personnelles et indexés de façon à permettre un accès plus rapide à l'information recherchée.

Les séances de recueil auprès des opérateurs du CSR de Paris-Montsouris ont pris la forme d'entretiens semi-dirigés centrés sur les connaissances du domaine indépendantes de tout raisonnement. Ils ont permis de cerner les propriétés, les domaines de valeurs et les modalités d'organisation des concepts. En complément, l'analyse de "grilles répertoires"<sup>26</sup> [Galloüin 88] a constitué une méthode efficace pour caractériser la façon dont l'opérateur se représente un incident de trafic.

Au cours de cette première étape, nous avons également bénéficié de présentations relatives au RTC de l'Île de France, au superviseur de trafic et aux outils de péri-supervision. En final, les résultats obtenus concernent :

- l'identification des principaux concepts du domaine, de leurs propriétés et de leurs domaines de valeurs ;
- l'identification des relations d'organisation des concepts du domaine ;
- la classification des concepts. Chaque concept du domaine peut être classé dans une typologie suivant une relation d'héritage de type *est-un* ;
- la structuration des concepts du domaine. Par exemple, un concept du domaine peut être décrit à l'aide d'autres concepts qui lui sont associés par un lien de composition de type *composé-de*.

Au terme de cette étape, nous obtenons un premier ensemble structuré de connaissances du domaine avec et sur lequel l'opérateur fonde sa méthode de résolution de problèmes. Les connaissances recueillies ont été modélisées au niveau domaine du modèle conceptuel de l'expertise. Leur maîtrise est un passage nécessaire pour l'analyse de la tâche de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.

### 2.1.2 Analyse de la tâche

L'étude de l'activité psychologique de résolution de problèmes correspond à l'analyse d'une interaction entre l'opérateur et la tâche qu'il réalise. Avant de la mener, il est indispensable pour le cognicien, surtout dans un domaine d'application aussi complexe que celui de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France, de maîtriser les propriétés de la tâche. Hoc [87] précise à ce sujet que : *"Pour rendre compte du fonctionnement d'un système adaptatif comme le système cognitif humain, il est nécessaire*

<sup>26</sup> Méthode dérivée de la "Personal Construct Theory" développée en psychologie de la personnalité par le psychologue Kelly [55].

de l'étudier dans sa confrontation à des tâches. Il n'y aurait aucun sens, en effet, à parler du fonctionnement cognitif, sans référence aux tâches qu'il réalise". La figure 5.2 illustre l'étape d'analyse de la tâche.

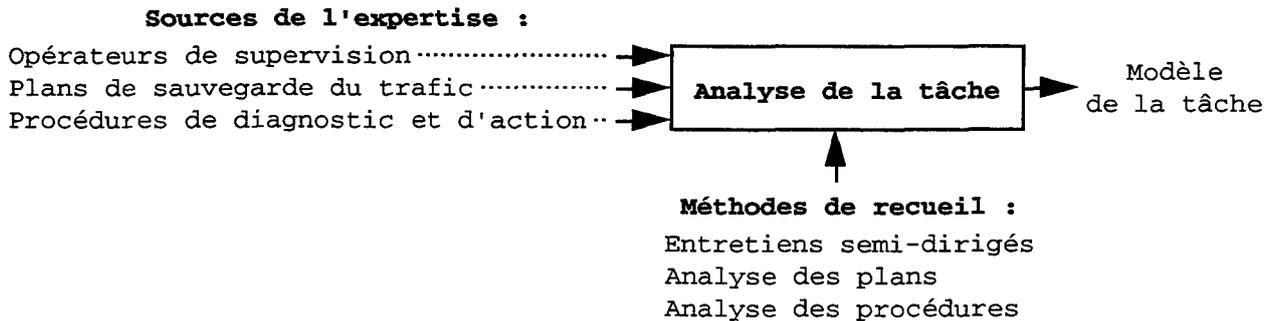


Figure 5.2 — Analyse de la tâche.

Pour accéder à la représentation qu'un opérateur de supervision se fait de sa tâche effective, des entretiens semi-dirigés ont privilégié deux types de question :

1. Des questions en terme de "Pourquoi ... ?", permettant d'accéder aux buts super-ordonnés des actions.
2. Des questions en terme de "Comment ... ?", permettant d'accéder aux procédures utilisées pour atteindre les buts.

Ces entretiens ont fournis des connaissances sur la caractérisation et l'organisation des composantes de l'activité globale de supervision du trafic téléphonique, telles qu'elles sont décrites en fin de chapitre 3.

L'analyse documentaire a concerné trois types de documents à la disposition des opérateurs de supervision :

1. Les plans de sauvegarde CRISTEL et CRISTRAF utilisés en cas de crises graves.
2. Le guide du diagnostic des incidents de trafic.
3. Les fiches de procédures d'action établies par les spécialistes de l'écoulement du trafic téléphonique en Île de France.

Toutefois, l'intérêt de ces documents, pour l'approche de l'activité de traitement des incidents de trafic, est limité par de nombreux défauts :

- manque de retour d'expérience sur la supervision du trafic ;
- incomplétude et niveau de généralité trop élevé face à la variété des types d'incident de trafic constaté en fin du chapitre 3 ;
- désignation de l'incident de trafic dans les documents pas toujours en accord avec la perception qu'en a l'opérateur ;
- référence à la tâche prescrite qui, généralement, n'est pas le reflet de l'activité réelle.

Les connaissances obtenues sur la tâche de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France sont essentiellement constituées d'actions élémentaires auxquelles sont attachés des agents, des contraintes et des résultats. Elles ont été modélisées au niveau tâche du modèle conceptuel de l'expertise, sous la forme d'une hiérarchie de décomposition. Les modalités de mise en œuvre de chacune des tâches y sont précisées.

L'analyse de la tâche de l'opérateur demeure théorique et ne peut rendre compte réellement des besoins de cet opérateur. Une analyse de l'activité et des traces de l'activité est indispensable pour compléter le recueil de l'expertise [De Keyser 88].

### 2.1.3 Analyse de l'activité et des traces de l'activité

L'analyse de la tâche procure des connaissances pour la spécification du système d'assistance mais ne permet pas de tenir compte des activités de l'opérateur. Comprendre et exploiter l'écart entre les procédures et les opérations effectivement réalisées par l'opérateur permet de concevoir une aide mieux adaptée. L'activité désigne ce qui est mis en œuvre par l'opérateur pour atteindre les objectifs qui lui sont assignés. Elle comprend une facette observable et une facette inobservable. Au-delà de l'identification des connaissances et des sources d'information auxquelles l'opérateur fait appel, l'analyse de l'activité a pour but de :

- caractériser les raisonnements effectués par l'opérateur ;
- déterminer les facteurs intra et extra-individuels intervenant dans la régulation de l'activité ;
- examiner les productions, intermédiaires et finales, de l'activité ;
- prendre en compte les caractéristiques des futurs utilisateurs, leurs besoins et le mode d'interaction homme-machine nécessaire.

Pour mener à bien l'analyse de l'activité et des traces de l'activité, deux méthodes ont été utilisées : l'observation directe de l'opérateur en situation de travail et la verbalisation consécutive assistée par les traces de l'activité, figure 5.3.

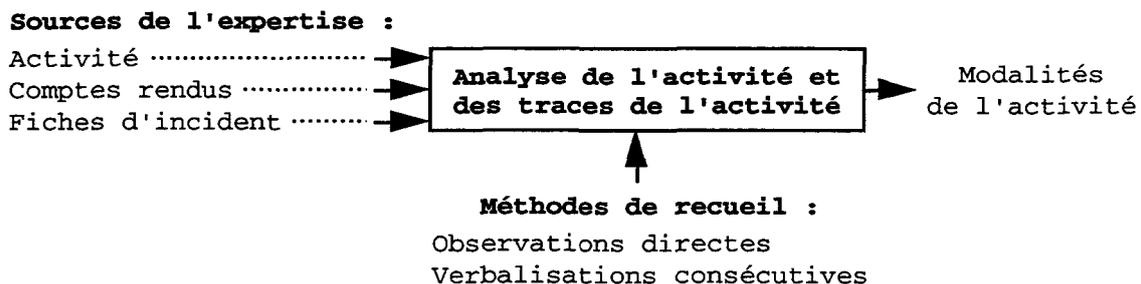


Figure 5.3 — Analyse de l'activité et des traces de l'activité.

L'observation directe consiste à examiner le comportement de l'opérateur en situation réelle de travail. Elle constitue la méthode indiquée pour recueillir des données pertinentes sur les démarches de traitement "en temps réel", en particulier celles qui ne sont pas exprimées par l'opérateur. L'observation directe se prête également à l'étude des facteurs dont on sait déjà par ailleurs, ou dont on suppose, qu'ils influencent l'activité. Pour la partie mentale de l'activité, les seuls observables sont des productions, intermédiaires ou finales, de l'activité. La majeure partie de l'activité mentale est inobservable. Une verbalisation concomitante à l'exécution de sa tâche permet à l'opérateur de produire des données sur son activité mentale. La verbalisation simultanée permet d'appréhender, dans une certaine mesure, les informations traitées, les opérations effectuées sur ces informations ainsi que les justifications. Toutefois, cette méthode introduit des biais dont le principal est l'interférence de la verbalisation avec la tâche principale.

Compte tenu du caractère imprévisible de l'activité de supervision du trafic téléphonique en temps réel, les résultats obtenus par la méthode d'observation directe de l'activité ont été complétés par ceux fournis suite aux verbalisations consécutives fondées sur les fiches d'incident stockées dans l'application Journal de Bord. Les

résultats des verbalisations sont très similaires à ceux que produisent une consigne de verbalisation simultanée. Une telle méthode doit toutefois être utilisée avec prudence. En effet, l'expérience en psychologie cognitive montre qu'un raisonnement restitué *a posteriori* peut ne pas coïncider avec le raisonnement tel qu'il s'est tenu. L'opérateur a tendance à structurer son raisonnement, c'est-à-dire à présenter un raisonnement plus linéaire et plus hiérarchisé qu'il ne l'a été en réalité.

L'analyse de l'activité des opérateurs et des fiches d'incidents traités par le passé ont permis de :

- comprendre l'activité globale de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France ;
- caractériser les activités de recherche d'informations en local lors du diagnostic d'un incident de trafic ;
- identifier et caractériser une méthode de traitement d'incident par réutilisation de l'expérience ;
- constater l'importance des notions de point de vue et de contexte dans le traitement d'un incident ;
- évaluer le rôle de chaque agent prenant part au traitement d'un incident.

Les raisonnements tenus par l'opérateur ont été décomposés pour y relever, d'une part, les connaissances manipulées et, d'autre part, les inférences primitives permettant de passer de l'une à l'autre. L'analyse de leurs imbrications a permis de faire émerger les critères de choix utilisés par les opérateurs pour déterminer leurs buts et les moyens de les atteindre. En dehors de ces connaissances de contrôle, l'analyse de l'activité a permis de dissocier, dans la chaîne des pas de résolution, les instants où l'opérateur fait appel à ses propres connaissances de ceux où il se réfère à des informations externes. L'accès à des informations externes a été caractérisé par le type de raisonnement appelant, par les conditions qui déclenchent leur utilisation et par le contenu de l'échange.

Les connaissances issues de l'analyse de l'activité et des produits de l'activité ont été essentiellement modélisées au niveau inférence du modèle conceptuel de l'expertise. Le cas échéant, elles ont permis de préciser le contrôle des tâches de la hiérarchie de décomposition.

Les séances de recueil des connaissances du domaine, d'analyse de la tâche et de l'activité nous permettent de disposer de données "filtrées" sur l'expertise de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. L'utilisation conjointe de plusieurs méthodes d'extraction de connaissances a permis de faire valoir les avantages de chacune et ainsi de compenser leur faiblesse. Les résultats évoqués ont été modélisés et validés au fur et à mesure de leur recueil pour constituer le modèle conceptuel de l'expertise. Ce sont les principaux résultats de ce travail qui sont maintenant présentés.

## 2.2 Modèle conceptuel de l'expertise

Selon le cycle incrémental d'ASC, les séances de recueil des données de l'expertise sont ponctuées par un travail de modélisation. L'objet de ce paragraphe est de décrire les résultats significatifs du modèle conceptuel de l'expertise de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France [Caulier et Perron-Bouvier 94b ; Caulier et Houriez 96b].

Le modèle conceptuel de l'expertise procure une description de l'univers des concepts et des raisonnements du domaine d'application impliqués dans la méthode de résolution de problèmes mise en œuvre dans le système d'assistance. Il comporte trois niveaux de modélisation dédiés chacun à un type particulier de connaissance : le niveau domaine, le

niveau inférence et le niveau tâche. Les prochaines sections présentent les apports majeurs de chaque niveau du modèle de l'expertise de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France pour la conception du système SACRÉ. Les exemples proposés reprennent plusieurs des abréviations du domaine d'application introduites au chapitre 3. Pour une lecture plus fine de ceux-ci, le lecteur peut se référer à l'index des sigles situé à la fin du mémoire. Nous achevons la présentation, en évoquant l'ultime étape de vérification et de validation du modèle conceptuel de l'expertise.

## 2.2.1 Modèle au niveau domaine

Le modèle au niveau domaine décrit l'ensemble des connaissances descriptives exploitées par les raisonnements de l'opérateur de supervision en situation de traitement d'un incident. Il capitalise les concepts du domaine, leurs propriétés et les expressions qui caractérisent ces dernières. Les hiérarchies et les réseaux sémantiques rendent compte des organisations effectuées par l'opérateur sur les concepts du domaine. Le modèle au niveau domaine est indépendant de tout raisonnement participant à la résolution de problèmes. Il se borne à caractériser les connaissances du domaine jouant un rôle dans les raisonnements. Il figure la vision structurée des connaissances du domaine que s'est forgé l'opérateur pour mener à bien sa tâche.

### 2.2.1.1 Concepts et propriétés

Le modèle au niveau domaine comporte, environ, 430 concepts. À titre d'exemple, Le tableau 5.1 présente la description des concepts Commutateur et Alarme commutateur.

Concepts	Propriétés {valeurs}
Commutateur	Fonction {CL, CU, CAA, CTU, CTZP, CTS, CTP, ...} Code SGTQS {AB02, AB03, BC92, RP31, RP44, RU32, RU43, RU48, ...} Technologie {11F spatial, E10B3 temporel 1G, AXE10 temporel 3G, ...} Palier logiciel {AF60, AF70, TN60, TN70, TN80} Classe {1..4} Capacité en Erlang {0..12000} Supervisé {oui, non}
Alarme commutateur	Libellé {arrêt DUPLEX CT, Surcharge CT, Perte d'appels sur un CT, ...} Degré d'urgence {AIM, AID, ASI} Couleur {blanc, jaune, rose, rouge, vert, sans} État {-1, 10, 11, 12, 13, 14, 20, 21, 22, 23} Numéro {..., 1942, 1943, 1945, 1947, 1949, 1951, 1953, 1956, 1972, ...} Fonction d'état {}

Tableau 5.1 — Propriétés des concepts Commutateur et Alarme commutateur.

### 2.2.1.2 Expressions

Une expression permet d'associer une valeur à une propriété d'un concept. Ainsi, la métrique permettant de calculer la valeur du concept Indicateur TPA d'un commutateur supervisé est donnée par l'expression Calcul TPA dont la forme est :

$$\langle \text{Indicateur TPA} \rangle . \langle \text{Valeur} \rangle = ((\langle \text{AP} \rangle - \langle \text{AJ} \rangle) / \langle \text{AP} \rangle \times 100)$$

Les expressions sont aussi utilisées pour définir les fonctions d'état du superviseur de trafic. Par exemple, la condition d'apparition de l'Alarme faisceau de dernier choix saturé est fixée, selon le sens de la catégorie de trafic, par l'expression suivante :

$$\langle \text{Alarme faisceau de dernier choix saturé} \rangle . \langle \text{Condition d'apparition} \rangle =$$

$\langle \text{FP} \rangle \geq 5$ ET $\langle \text{OT} \rangle \geq 10$ ET $\langle \text{RDT} \rangle \geq 80$	: catégorie de trafic entrant
$\langle \text{F1T} \rangle \geq 20$ ET $\langle \text{DBM} \rangle \geq 5$	: catégorie de trafic sortant

### 2.2.1.3 Hiérarchies

Les organisations hiérarchiques des concepts du domaine sont déduites des séances de recueil des connaissances du domaine et d'analyse de l'activité de supervision. Elles sont construites sur la base des rôles qu'elles jouent dans les raisonnements. Les hiérarchies construites mettent en œuvre la relation de type classification est-un (lien d'héritage). La hiérarchie de la figure 5.4 présente la racine de la typologie des concepts du modèle de l'expertise au niveau domaine.

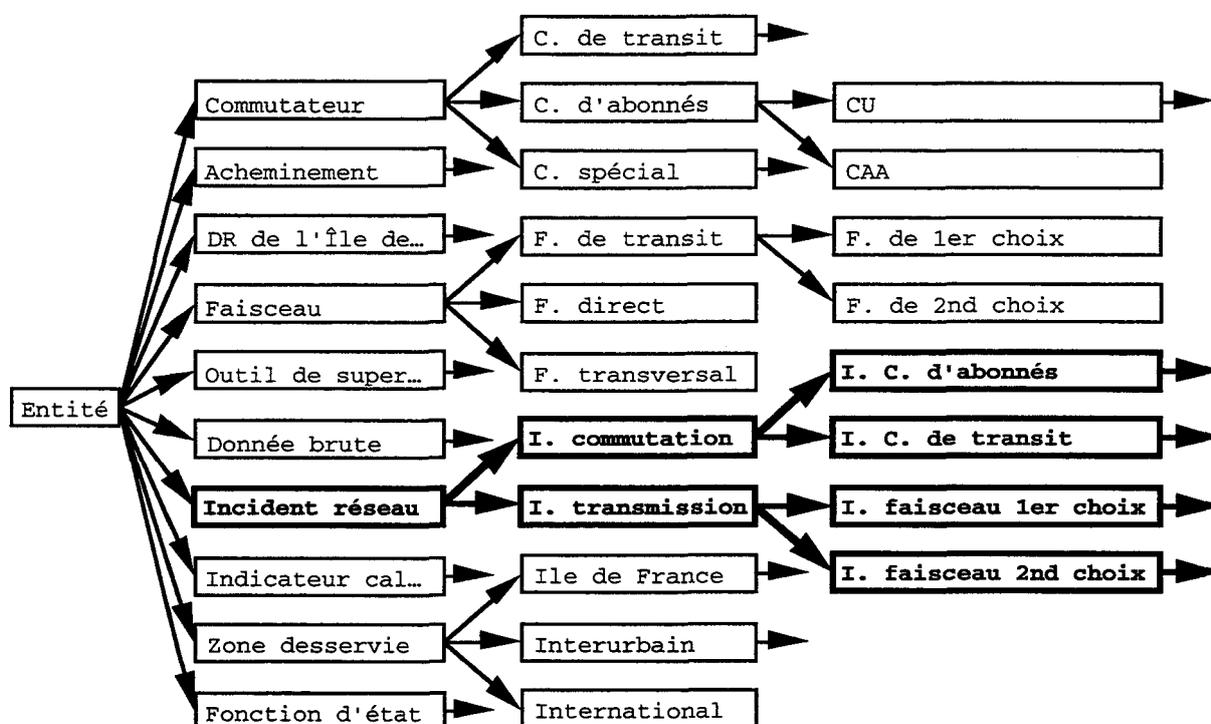


Figure 5.4 — Typologie des concepts de supervision.

La figure souligne la hiérarchie des types d'incident de trafic survenant sur le réseau téléphonique de l'Île de France. Elle est fondée sur le type d'équipement affecté par l'incident et émerge de la représentation que se fait l'opérateur des incidents qu'il a à traiter. Cette hiérarchie est à l'origine de la catégorisation des classes de cas d'incident au sein de la base de cas du système SACRÉ [Caulier et Houriez 95a].

Parmi l'ensemble des connaissances du domaine modélisées, la principale contribution du modèle au niveau domaine à la spécification de SACRÉ concerne le modèle du cas d'incident de trafic. Nous consacrons la section suivante à sa description.

#### 2.2.1.4 Modèle du cas d'incident

Pour un système de résolution de problèmes à partir de cas, le cas représente un ensemble de circonstances structuré sous forme d'une description du problème et de sa solution expliquée, permettant une analyse, une évaluation et une prise de décision [Caulier et Houriez 95a].

Dans le domaine qui nous préoccupe, le cas est un cas d'incident perçu au niveau supervision. Son modèle caractérise le fonctionnement anormal du procédé et les connaissances nécessaires à son traitement. Il concourt ainsi au succès des activités de résolution de problèmes exercées par l'opérateur de supervision en procurant une structure d'accueil intégrée de la chaîne de traitement d'un incident : évaluation des symptômes, élaboration du diagnostic et exécution des actions palliatives et/ou

correctives. Chaque instance de ce modèle correspond à une explication d'un comportement anormal du procédé. Cette capacité d'explication, fondée sur l'exemple, accroît le niveau de confiance de l'opérateur amené à utiliser les connaissances contenues dans le cas d'incident.

La structure du modèle du cas d'incident se précise au fur et à mesure de l'élaboration du modèle conceptuel de l'expertise. Les raisonnements qui interviennent à chaque étape de la méthode de résolution de problèmes sont caractérisés sous forme de structures d'inférence. La spécification progressive des rôles statiques et dynamiques qui les composent et leur instanciation avec les connaissances du domaine permettent de déterminer l'ensemble des descripteurs du cas d'incident nécessaires aux raisonnements et à l'utilisateur de SACRÉ pour traiter un incident courant. Ainsi, la structure du modèle du cas d'incident reflète le point de vue inhérent à la méthode de résolution de problèmes.

Le modèle du cas d'incident doit inclure les descripteurs permettant, d'une part, son organisation et sa récupération en mémoire et, d'autre part, de fournir à l'opérateur les informations lui permettant de diagnostiquer et de traiter efficacement un incident en cours. Dans le cadre de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France, les descripteurs normatifs du cas d'incident sont répartis selon quatre facettes génériques [Caulier et Houriez 95d] : la description de l'incident, le diagnostic résultant, les traitements adaptés et les données nécessaires à l'analyse de son impact sur la qualité des services.

La description de l'incident recense l'ensemble des descripteurs symptomatiques présenté à l'opérateur de supervision. Parmi les descripteurs modélisés citons, par exemple :

- le libellé de l'alarme qualifiée ;
- le type et la catégorie de trafic affectés ;
- le(s) équipement(s) du réseau impliqué(s) ;
- le degré d'urgence de rétablissement du service altéré ;
- la zone et la méthode d'acheminement concernées.

Aux descripteurs symptomatiques s'ajoutent un ensemble de descripteurs contextuels, comme la date et l'heure de début de l'incident ou encore les caractéristiques de l'équipement perturbé ou en panne, dont les valeurs influencent directement le traitement de l'incident. Par exemple, selon l'heure, ouvrable ou non, à laquelle se déclare l'incident, les procédures d'action diffèrent.

Le diagnostic de l'incident indique et explique la cause de l'incident, ses conséquences probables sur l'écoulement du trafic, la stratégie de diagnostic et précise, le cas échéant, les hypothèses à vérifier.

La nature des actions de rétablissement du trafic et les modalités pratiques d'intervention sont définies par des descripteurs qui énoncent et planifient les différents types de procédures d'action. Trois types de procédures d'action se distinguent :

1. Les actions de sauvegarde du trafic.
2. Les actions d'information à destination de la hiérarchie et des abonnés pénalisés par l'incident.
3. Les actions de retour à la configuration initiale du réseau.

En conformité avec l'objectif de qualité des services rendus aux abonnés, ces actions visent, d'abord, à pallier les conséquences néfastes de l'incident sur la disponibilité des services offerts aux clients.

Enfin, le modèle du cas d'incident est enrichi de quelques descripteurs destinés à l'analyse en temps différé des conséquences sociales, techniques et économiques de l'incident. Ces descripteurs permettent de mentionner, par exemple, le nombre d'appels inefficaces, le nombre de refus de prise et la durée de l'incident.

L'ensemble de ces descripteurs du cas d'incident a été évalué, auprès des opérateurs, à partir de critères d'exhaustivité, de fidélité, de non ambiguïté et de spécificité par rapport aux différents aspects d'un incident. Le modèle du cas d'incident de trafic procure, à la phase de conception, l'ensemble des descripteurs que devra intégrer la représentation des incidents au sein de la mémoire de SACRÉ. En conclusion, chaque cas d'incident de la base est le siège d'une unité d'expérience de supervision du trafic téléphonique dont SACRÉ, par la méthode de résolution de problèmes qu'il met en œuvre, assure la pérennité et la valorisation.

### 2.2.1.5 Spécification d'une ontologie du domaine

De façon générale, une ontologie précise l'ensemble des éléments reconnus existant dans un domaine d'application. Construire l'ontologie d'un domaine, c'est décider de la pertinence des éléments retenus. Cette étape de décision est la conceptualisation du domaine d'application<sup>27</sup>.

Le modèle au niveau domaine fournit les spécifications pour la construction d'une ontologie commentée sur la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France [Caulier et Houriez 95b]. Cette ontologie constitue, d'une part, un moyen de pérenniser les connaissances du domaine et, d'autre part, une base réutilisable par d'autres applications, par exemple de formation. Toutefois, il convient de rester prudent quant à une éventuelle possibilité de réutilisation de l'ontologie. En effet, comme toutes les connaissances, la construction d'une ontologie est interprétée en fonction du point de vue qu'a son concepteur des tâches à effectuer dans le domaine d'application. La réutilisation d'une ontologie n'est donc pas une chose facile et immédiate. Charlet *et al.* [94] soulignent, à ce sujet, que la réutilisation d'une ontologie doit demeurer circonscrite à un même domaine d'application et pour des applications voisines pouvant, le cas échéant, nécessiter une phase d'adaptation. Une ontologie considérée comme réutilisable par un expert pour une tâche différente de celle pour laquelle elle a été construite peut, en finale, s'avérer inadaptée lors de son exploitation. Néanmoins, la réutilisation est facilitée dans la mesure où, à l'image du modèle conceptuel de l'expertise, les dépendances existantes entre les connaissances du domaine et les raisonnements qui les manipulent sont connues.

## 2.2.2 Modèle au niveau inférence

Le modèle au niveau inférence formalise les différents raisonnements de l'opérateur en situation de traitement d'un incident de trafic déclaré sur le réseau. Chaque raisonnement prend la forme d'une structure d'inférence. La construction de ce modèle débute, dans la mesure du possible, par la sélection d'un modèle d'interprétation.

### 2.2.2.1 Sélection d'un modèle d'interprétation

Pour débiter la modélisation des connaissances opératoires, le cognitif peut s'aider de la bibliothèque de modèles d'interprétation associée aux spécifications du modèle de l'expertise *CommonKADS*. L'analyse d'un premier contingent de connaissances du domaine, de la tâche et de l'activité de l'opérateur ainsi qu'une bonne connaissance des modèles d'interprétation présents en bibliothèque sont nécessaires à la sélection du

<sup>27</sup> Ainsi, dans le cadre des SBC qui nous intéressent ici, l'ontologie est vue par Gruber [93] comme une spécification formelle d'une conceptualisation.

modèle d'interprétation le plus approprié au domaine d'application. Quatre propriétés ont prévalu dans le choix d'un modèle d'interprétation pour engager la modélisation de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France :

1. L'ensemble des solutions possibles est considéré comme prédéfini et de taille restreinte ; ce qui oriente vers une tâche de type analytique.
2. La solution est de type catégorie et relève, plus précisément, d'une tâche d'identification.
3. Le but de la méthode de résolution de problèmes est de trouver une catégorie caractérisant le dysfonctionnement d'un procédé. Dans ce cas, il s'agit d'une tâche de diagnostic.
4. D'un point de vue méthode, la démarche de diagnostic utilise un modèle de mauvais fonctionnement.

Ces quatre critères convergent sur la sélection du modèle d'interprétation de la Classification heuristique, figure 5.5.

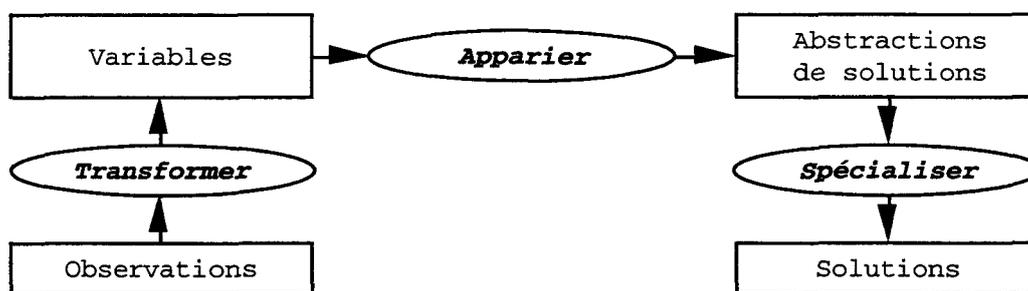


Figure 5.5 — *Modèle d'interprétation de la Classification heuristique.*

Ce modèle d'interprétation consiste à :

1. Transformer les données observables du procédé en variables (abstraction de données).
2. Apparier les variables avec un modèle de fonctionnement anormal à l'aide de relations qualitatives ou heuristiques de type cause-de.
3. Spécialiser, ou préciser, les abstractions de solutions en solutions plus spécifiques.

Chacun des quatre rôles dynamiques correspond à un élément de connaissance modélisé au niveau domaine. Dans le domaine d'application qui nous concerne, les observables correspondent aux données de surveillance ou d'analyse fournies par le superviseur de trafic, les variables représentent les connaissances d'évaluation de l'incident de trafic, les abstractions de solutions figurent des types de diagnostic, par exemple : "Panne d'un commutateur d'abonnés" et les solutions se rapportent au diagnostic spécifique du cas traité, par exemple : "Arrêt DUPLEX du commutateur d'abonnés Invalides 4".

En dépit de la connaissance, d'une part, du type de tâche dont relève le domaine d'application et, d'autre part, des modèles d'interprétation contenus dans la bibliothèque, la tâche de sélection d'un modèle d'interprétation s'avère délicate. La difficulté rencontrée émane de deux points. Le premier point concerne l'absence d'une méthode complète de sélection d'un modèle d'interprétation, d'autant plus nécessaire que certaines branches de la typologie de problèmes associée à la bibliothèque sont fortement développées. Sur ce point, la bibliographie relative au modèle de l'expertise *CommonKADS* reste, à ce jour, fort discrète. Le second point a trait à la limite du niveau de généralité des modèles d'interprétation. En effet, il existe une forte interaction

entre une méthode de résolution de problèmes et les connaissances du domaine sur et avec lesquelles elle opère. Ce constat est en rapport avec la notion "d'engagement ontologique" énoncée par Le Roux [94] pour souligner la dépendance entre connaissances descriptives et connaissances opératoires.

De ces considérations, il ressort que le modèle d'interprétation sélectionné est très générique et qu'il ne suffit pas à caractériser précisément l'ensemble des connaissances nécessaires à la mise en œuvre de la méthode de résolution de problèmes par le système d'assistance [Steels 90]. Une étape de raffinement, guidée par le modèle d'interprétation, suivie d'une étape de projection sur les connaissances du niveau domaine sont nécessaires. Le modèle de la Classification heuristique couvre, à un très haut niveau de généralité, l'ensemble de l'activité de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Nous l'avons progressivement raffiné pour arriver à la description de chacune des composantes du traitement d'un incident de trafic. Cette décomposition, sous la forme d'une hiérarchie de tâches, révèle une méthode de résolution de problèmes prioritairement et efficacement appliquée par les opérateurs de supervision : la réutilisation de connaissances. Sa spécification fait l'objet de la prochaine section.

### 2.2.2.2 La réutilisation de connaissances

La réutilisation de connaissances issues du traitement de situations antérieures peut être définie comme la récupération de connaissances épisodiques en mémoire et leur utilisation, via un raisonnement par analogie, pour résoudre des problèmes nouveaux. La réutilisation de connaissances dans le domaine de la supervision peut s'exprimer sous la forme : "Les symptômes de l'incident A peuvent être analysés et traités de la même façon que pour l'incident B". L'objectif de ce paragraphe est de présenter un modèle de méthode de résolution de problèmes par réutilisation de connaissances. La description de son contenu, de son organisation et l'identification des facteurs susceptibles de faire varier sa performance permettent d'exprimer plusieurs exigences pour la conception du système SACRÉ. La structure d'inférence de la Réutilisation de connaissances, révélée par l'analyse de l'activité des opérateurs de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France, est proposée en figure 5.6.

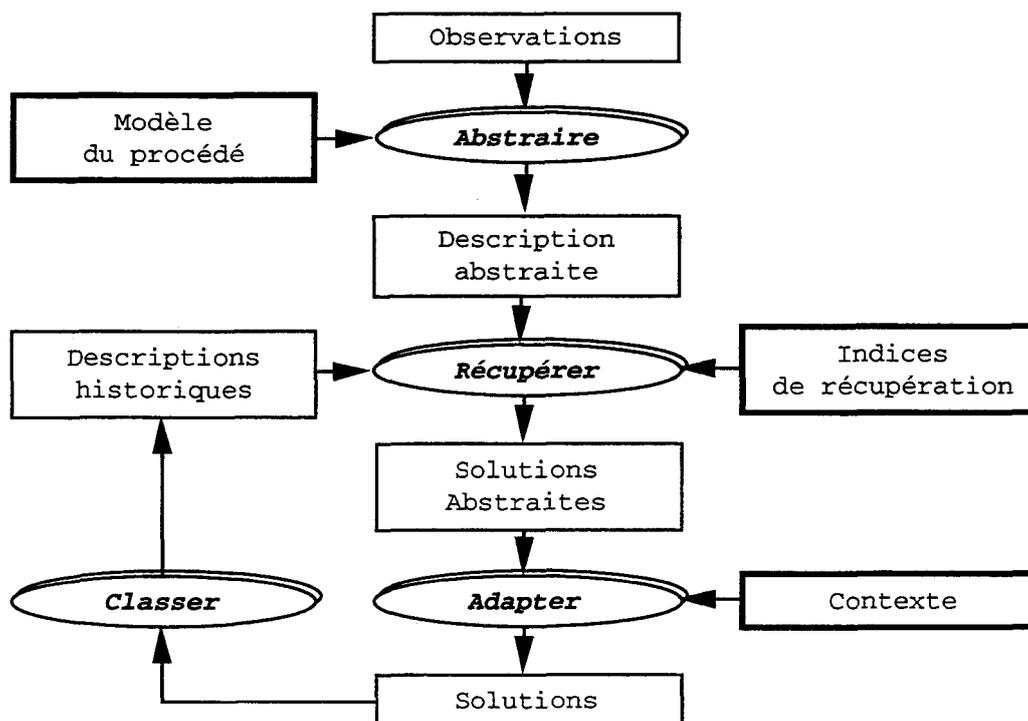


Figure 5.6 — Structure d'inférence de la Réutilisation de connaissances.

En présence d'un incident de trafic à diagnostiquer et à traiter, l'opérateur procède d'abord de la façon suivante [Caulier et Houriez 95c] :

1. À partir de son modèle mental du fonctionnement du réseau et des observations procurées par le superviseur de trafic et les outils de péri-supervision, l'opérateur abstrait une description de la situation anormale ou une classe d'incident.
2. À l'aide des indices de récupération que lui évoque la situation courante, l'opérateur tente de récupérer en mémoire épisodique la description d'un incident traité par le passé et appartenant à la même classe d'incident.
3. L'incident récupéré est ensuite adapté au contexte de l'incident en cours. Une fois "contextualisées", les connaissances qu'il renferme sont réutilisées pour diagnostiquer et traiter le nouvel incident.
4. Enfin, cette nouvelle résolution d'incident constitue pour l'opérateur une unité d'expérience susceptible de contribuer au traitement de futurs incidents analogues. Elle est donc catégorisée en mémoire épisodique.

Chaque pas d'inférence composite de la structure d'inférence a été décomposé en "sous-structures d'inférence". Ces dernières spécifient les connaissances nécessaires à la mise en œuvre de la réutilisation de connaissances par SACRÉ. Par exemple, les rôles des différentes sous-structures d'inférence et leur projection sur les connaissances du domaine précisent les descripteurs du cas d'incident et les connaissances utiles à la prise en compte des notions de point de vue et de contexte. Quand le raisonnement de réutilisation de connaissances peut être mis en œuvre par les opérateurs, il fait preuve d'une grande efficacité pour le traitement des incidents de trafic. Toutefois, son application systématique se heurte à de multiples contraintes :

- la perception, la représentation mentale et le traitement d'un incident restent fortement dépendantes de l'opérateur ;
- il n'existe pas de modèle de représentation du concept d'incident susceptible de déboucher sur un formalisme unique partagé par l'ensemble des opérateurs du CSR de Paris-Montsouris ;
- l'expérience mémorisée est répartie sur l'ensemble des opérateurs ;
- les capacités de mémorisation et de récupération de chaque opérateur sont limitées ;
- le roulement du personnel est grand ce qui favorise la dissémination naturelle de l'expérience ;

Son efficacité pour le traitement des incidents et la perspective de pallier ou d'affaiblir ces contraintes, nous ont conduits à mettre en œuvre la méthode de résolution de problèmes par réutilisation de connaissances au sein de SACRÉ. Elle correspond également à une réelle attente des opérateurs du CSR de Paris-Montsouris en matière d'assistance. Le prochain paragraphe présente les principales caractéristiques de la hiérarchie de décomposition de la tâche de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.

### 2.2.3 Modèle au niveau tâche

L'analyse de la tâche de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France a mis en évidence plusieurs buts et sous-buts. Chaque passage d'un but à un autre est régi par une ou plusieurs méthodes. La modélisation de ces connaissances de contrôle est décrite par le niveau tâche du modèle de l'expertise.

Le modèle au niveau tâche se concrétise par deux formalismes complémentaires : la hiérarchie de décomposition de tâche et la structure de tâche. La structure de tâche spécifie chaque tâche de la hiérarchie en termes de but et de méthode à exécuter pour

atteindre le but. Le but correspond typiquement à l'un des objectifs intermédiaires de l'opérateur de supervision. Il met en œuvre une stratégie chargée de contrôler l'enchaînement des méthodes filles nécessaires. Une méthode organise le savoir-faire indispensable à la réalisation du but d'une tâche. Le corps de la méthode précise le contrôle sur les éléments de la structure d'inférence référencée. La structure de tâche décrit ainsi, explicitement, les compétences requises par chacune des étapes du traitement d'un incident de trafic téléphonique.

Nous présentons maintenant la racine de la hiérarchie de décomposition de la tâche de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Ensuite, nous développons la branche de la hiérarchie relative aux méthodes de recherche d'informations menées par l'opérateur pour établir et confirmer le diagnostic d'un incident de trafic.

### 2.2.3.1 Tâche de supervision du trafic téléphonique

La supervision du trafic téléphonique de l'Île de France couvre un ensemble de tâches complexes depuis la surveillance de la qualité de l'écoulement du trafic jusqu'à la planification de procédures d'action en cas de fonctionnement anormal du réseau. La figure 5.7 présente un extrait de la décomposition hiérarchique de la tâche Supervision du trafic téléphonique en sous-tâches plus élémentaires.

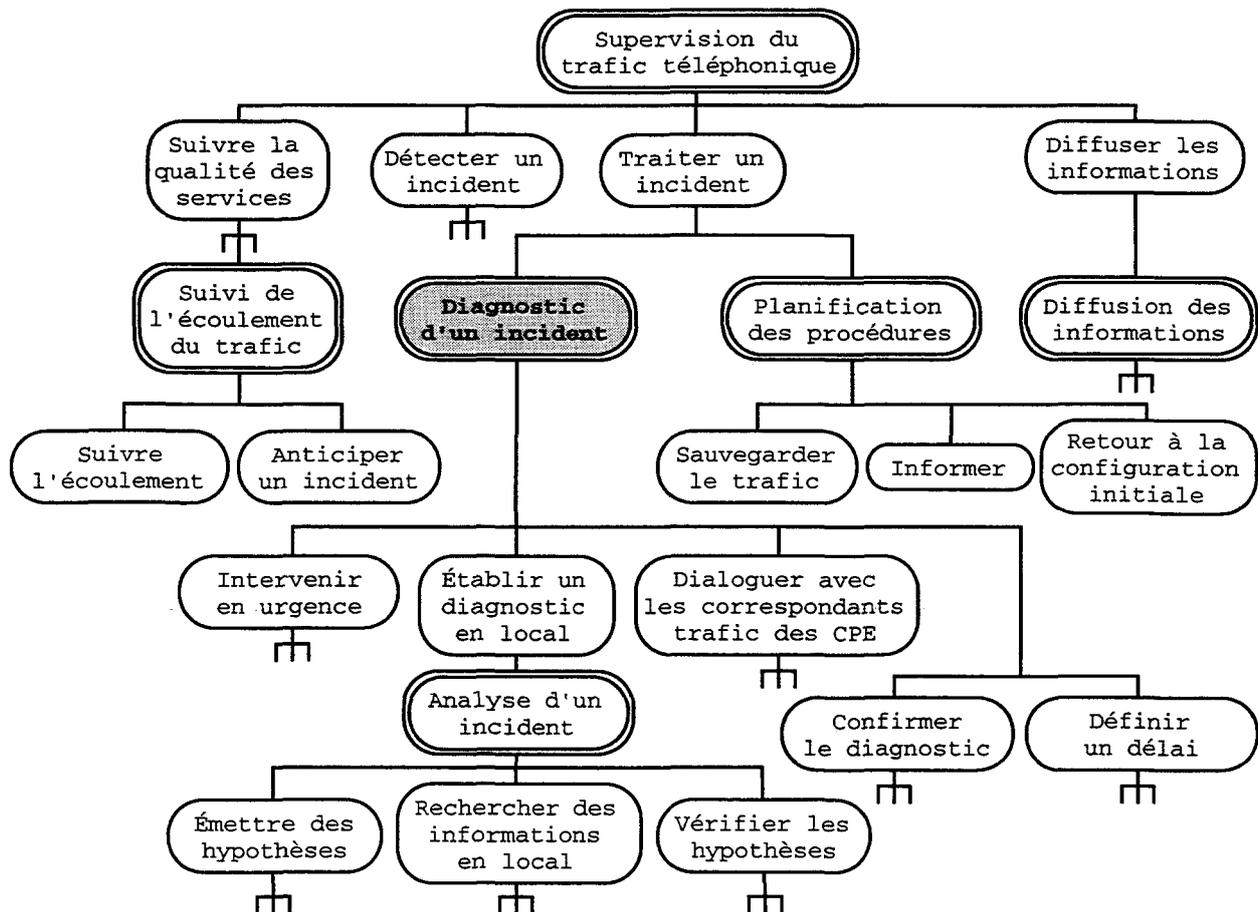


Figure 5.7 — Hiérarchie de décomposition de la tâche Supervision du trafic téléphonique.

Les stratégies modélisées au sein des buts font l'hypothèse de l'unicité d'incident mais gèrent le caractère inopiné de sa déclaration et les événements qui jalonnent son traitement. La hiérarchie reprend les composantes de l'activité de supervision du trafic téléphonique développées au chapitre 3. Elle s'organise, pour l'essentiel, autour d'une

activité d'exécution, relative à la détection d'un incident, suivie d'une activité de résolution de problèmes correspondant au traitement d'un incident.

Le tableau 5.2 décrit la stratégie attachée au but Diagnostic d'un incident de la figure 5.7. Les rôles mentionnés font référence à des connaissances du domaine. Les rôles d'entrée définissent le "contexte d'appel" de la stratégie. Les rôles de sortie qualifient la nature des résultats produits.

<b>BUT</b>	/*Définition de la tâche*/
<b>Nom</b>	Diagnostic d'un incident
<b>Rôles</b>	<b>Entrée :</b> Observations : symptômes de l'incident de trafic <b>Sortie :</b> Solutions : cause de l'incident de trafic vérifiée, expliquée et délai prévisible de rétablissement du service
<b>Stratégie</b>	Déterminer la cause de l'incident SI l'incident est grave ou majeur ALORS <Intervenir en urgence> SINON TANT QUE la cause de l'incident de trafic est inconnue FAIRE <Établir un diagnostic en local> SI diagnostic difficile à établir en local ET heure ouvrable ALORS <Dialoguer avec les correspondants trafic des CPE> FIN SI <Confirmer le diagnostic> FIN TANT QUE <Définir un délai prévisible de rétablissement du service> FIN SI

Tableau 5.2 — *Stratégie associée au but Diagnostic d'un incident.*

Le tableau 5.3 détaille la structure de contrôle de la méthode composée Établir un diagnostic en local. Celle-ci montre que la construction du diagnostic d'un incident s'articule autour d'une activité de recherche d'informations effectuée d'abord en interne par les opérateurs du CSR de Paris-Montsouris [Caulier et Houriez 95c].

<b>MÉTHODE</b>	/*Corps de la tâche*/
<b>Nom</b>	Établir un diagnostic en local
<b>Type</b>	Composée
<b>Corps</b>	<Établir un diagnostic en local> (observations → solutions) = RÉPÉTER <Émettre des hypothèses> (observations → hypothèses) <Rechercher des informations en local> (hypothèses → informations) <Vérifier les hypothèses> (hypothèses, informations → solutions) JUSQU'À solutions = cause établie

Tableau 5.3 — *Contrôle de la méthode Établir un diagnostic en local.*

### 2.2.3.2 Méthodes de recherche d'informations en local

La recherche d'informations en interne vise à rassembler l'ensemble des informations à partir desquelles l'opérateur pourra évaluer ses hypothèses de diagnostic puis planifier les procédures d'actions adéquates. Cette activité joue un rôle primordial dans la chaîne de traitement des incidents de trafic. De son succès dépend la qualité des services rendus et la sûreté de fonctionnement du réseau. Elle correspond à la composante "interprétation des indices" d'une activité de diagnostic, présentée au chapitre 2. La hiérarchie de décomposition de la figure 5.8 révèle que deux types de méthode de recherche d'informations sont susceptibles d'être mises en œuvre par l'opérateur [Caulier et Houriez 95c].

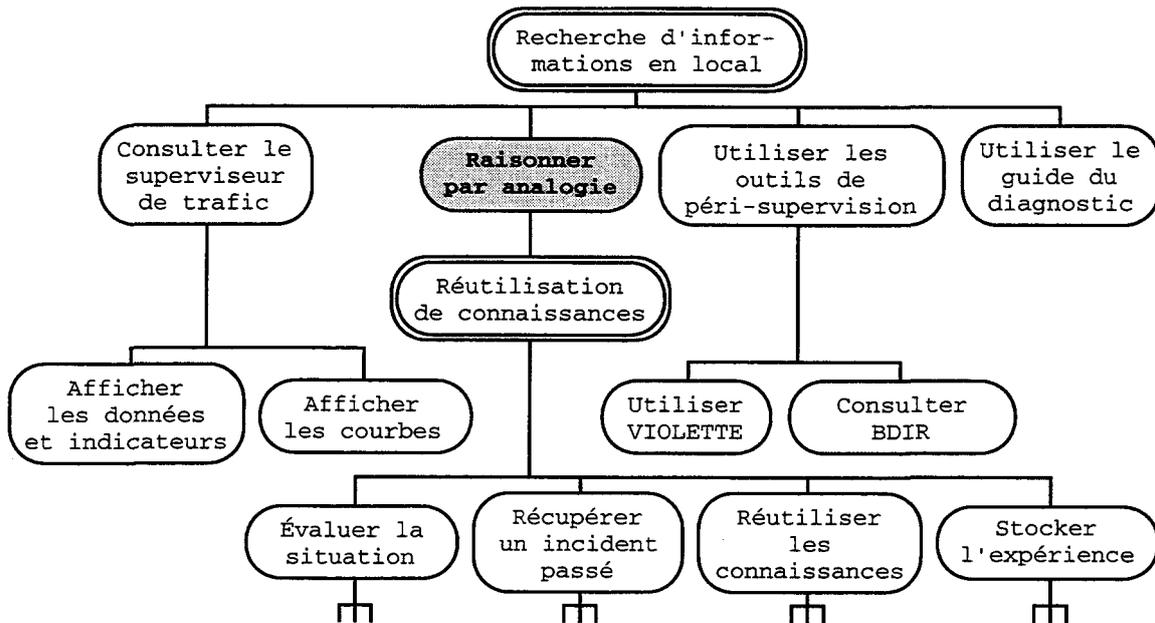


Figure 5.8 — Hiérarchie de décomposition de la tâche Recherche d'informations en local.

Le premier type de méthode, efficace et privilégiée par les opérateurs, concerne une activité d'évocation d'un diagnostic préexistant, fondée sur la récupération d'un incident similaire traité par le passé. Elle est représentée dans la hiérarchie par la méthode composée Raisonner par analogie. Cette méthode fournit les connaissances de contrôle de la structure d'inférence Réutilisation de connaissances de la figure 5.6.

Le second type de méthode se rapporte à une activité de pure élaboration d'un nouveau diagnostic, reposant sur des connaissances plus générales, moins liées à des cas particuliers déjà traités. Dans ce type d'activité constructive, l'opérateur a recours aux outils de péri-supervision et/ou au guide du diagnostic à sa disposition.

La pratique de ces méthodes est, non seulement dépendante des capacités intrinsèques des opérateurs, mais aussi, et surtout, des moyens de recherche disponibles au CSR de Paris-Montsouris. SACRÉ tente de favoriser voire de généraliser la réutilisation de l'expérience par la capitalisation et la réutilisation des incidents traités.

La description du modèle au niveau tâche termine la présentation du modèle conceptuel de l'expertise de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Nous consacrons les deux prochains paragraphes à l'étape de vérification et de validation du modèle et à un bilan méthodologique et pratique de sa construction.

#### 2.2.4 Vérification et validation du modèle conceptuel de l'expertise

Le cycle d'ASC s'achève par une ultime étape de vérification et de validation destinée à entériner la structure et la sémantique du modèle conceptuel de l'expertise.

La vérification s'intéresse à la cohérence, d'un point de vue structurel, des connaissances contenues dans le modèle conceptuel de l'expertise vis-à-vis des formalismes de modélisation établis par la méthodologie CommonKADS. Elle est effectuée par le cognicien à l'aide, notamment, des algorithmes de vérification proposés par l'outil de modélisation KADS-Tool.

La validation, pour sa part, se préoccupe de la pertinence, d'un point de vue sémantique, des connaissances contenues dans le modèle de l'expertise vis-à-vis du domaine d'application. Elle reste manuelle et procède par le dialogue entre le cogniticien et l'expert du domaine. Dans le cadre de l'application, différentes stratégies de validation ont été employées [Caulier et Houriez 95d] :

- **validation à partir des données de l'expertise** : chaque élément de connaissance modélisé peut être retrouvé dans les données de l'expertise, soit directement, soit par déduction. L'outil KADS-Tool procure des outils pour faciliter ce type de validation ;
- **validation par l'opérateur** : les formalismes utilisés par le modèle de l'expertise permettent à l'opérateur de contrôler la connaissance modélisée et, le cas échéant, d'apporter des correctifs ;
- **validation par l'exemple** : le traitement d'incidents typiques est simulé à l'aide des connaissances du modèle de l'expertise. Le résultat est soumis à l'opérateur pour critique.

Au terme de l'étape de vérification et de validation, le modèle constitue une caractérisation fiable et fidèle des connaissances de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France, à partir de laquelle la conception du système d'assistance à la capitalisation et à la réutilisation de connaissances peut être envisagée.

### 2.3 Bilan et enseignements de la modélisation "CommonKADS"

L'application des phases d'analyse du problème et de spécification de la méthodologie a permis [Caulier et Houriez 95d] :

- l'étude de la faisabilité cognitive et opérationnelle de SACRÉ ;
- la qualification du contexte de travail, des besoins du futur utilisateur et de la connaissance ;
- l'étude de l'environnement de développement et d'utilisation du futur système ;
- la constitution d'un modèle de l'ensemble de l'expertise compréhensible, et donc partageable, par l'ensemble des acteurs impliqués dans le projet.

La modélisation de l'expertise requise pour la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France a révélé une méthode centrale de réutilisation d'incidents passés pour le diagnostic et le traitement d'un nouvel incident. Cet aspect de l'activité de supervision a fait l'objet d'une analyse particulière pour [Caulier et Houriez 95d] :

- situer et décrire les activités de recherche d'informations au sein de l'activité globale de supervision ;
- situer et caractériser la réutilisation d'incidents analogues au sein des méthodes de recherche d'informations ;
- définir les descripteurs du modèle du cas d'incident nécessaires à une réutilisation pertinente ;
- identifier les types d'incident de trafic et leur organisation.

Sur le plan de la méthodologie, l'utilisation des formalismes de modélisation du modèle de l'expertise *CommonKADS* dans le cadre d'une application réelle et d'envergure a été appréciée, notamment, pour sa flexibilité. La spécification au niveau connaissance du modèle de l'expertise et la méthodologie suivie ont permis d'éviter les inconvénients inhérents au développement incrémental d'un système logiciel. Sur le plan de la pratique de l'outil de modélisation KADS-Tool plusieurs points, positifs et négatifs, peuvent être dégagés [Caulier et Houriez 95d].

### 2.3.1 Flexibilité des formalismes de modélisation

Le modèle de l'expertise *CommonKADS* propose un langage de modélisation qui permet, d'une part, de représenter et d'organiser l'ensemble des savoirs et savoir-faire du domaine et, d'autre part, de construire ses propres modèles de résolution de problèmes. Cette flexibilité, également soulignée par Karbach *et al.* [90], permet d'obtenir une bonne et complète décomposition de l'expertise. Elle peut s'expliquer par le fait que le langage de modélisation n'a, ni sémantique formelle, ni sémantique opérationnelle, à la différence d'autres approches qui figent le sens des primitives dans un outil informatique. En résultat du cycle d'ASC, le modèle de l'expertise définit et documente l'ensemble des spécifications cognitives du futur SBC.

### 2.3.2 "Bon" niveau d'abstraction

Le niveau d'abstraction [Newell 82] du modèle de l'expertise *CommonKADS* permet une représentation des connaissances dans un formalisme explicite et lisible par l'expert. Ce niveau d'abstraction adéquat facilite le dialogue expert/cogniticien, responsable de la modélisation de l'expertise. En pratique, nous avons, dans un premier temps, formé les opérateurs au vocabulaire, aux formalismes de modélisation et à l'organisation du modèle de l'expertise. Par la suite, nous avons proposé aux opérateurs une succession d'ébauches du modèle qu'ils ont été capables de critiquer et de faire évoluer jusqu'à ce qu'ils se "reconnaissent" au travers des connaissances modélisées.

### 2.3.3 Avantages et inconvénients de l'outil KADS-Tool

Lorsque le domaine de l'expertise est vaste et complexe, l'assistance d'un outil de modélisation est indispensable au cogniticien. Le modèle conceptuel de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France est supporté par l'outil de modélisation KADS-Tool. La pratique de cet outil, nous permet de dégager plusieurs avantages et inconvénients. Les principaux apports de l'outil KADS-Tool sont les suivants :

- les formalismes de description et d'organisation des concepts sont proches de la représentation des connaissances orientée objet ;
- la description des modèles de connaissances débouche sur la production d'un dossier de spécification clair et explicatif ;
- les procédures de vérification aide le cogniticien à maintenir la cohérence du modèle ;
- la possibilité de référencer les connaissances modélisées avec les données brutes de l'expertise recueillies constitue une justification rémanente des choix de modélisation effectués ;
- le partage du travail est rendu possible par l'existence de procédures de fusion de modèles détectant les incompatibilités éventuelles.

Plusieurs limites peuvent également être avancées à l'encontre de l'outil KADS-Tool. Elles concernent essentiellement l'absence :

- de guides intégrés à l'utilisation de l'outil, à la construction du modèle et/ou d'exemples de modèles simples, complets et commentés ;
- de fonctionnalités d'aide à la conception du système final fondées sur la préservation de la structure du modèle conceptuel de l'expertise ;

Ce paragraphe termine la présentation de la phase de spécification du système SACRÉ, dont nous abordons maintenant la description.

### 3 Conception de SACRÉ

Cette dernière partie du chapitre commence par présenter l'architecture logicielle du système de capitalisation et de réutilisation de cas d'incident destiné à assister l'opérateur de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France dans ses activités de diagnostic et de traitement d'incident. Après une présentation des interfaces de gestion et d'exploitation de la base de cas d'incident, nous détaillons les fonctionnalités de SACRÉ.

#### 3.1 Architecture logicielle de SACRÉ

L'architecture logicielle de SACRÉ, conçue à partir des spécifications du modèle conceptuel de l'expertise, est présentée en figure 5.9 [Caulier et Houriez 95e ; 95f].

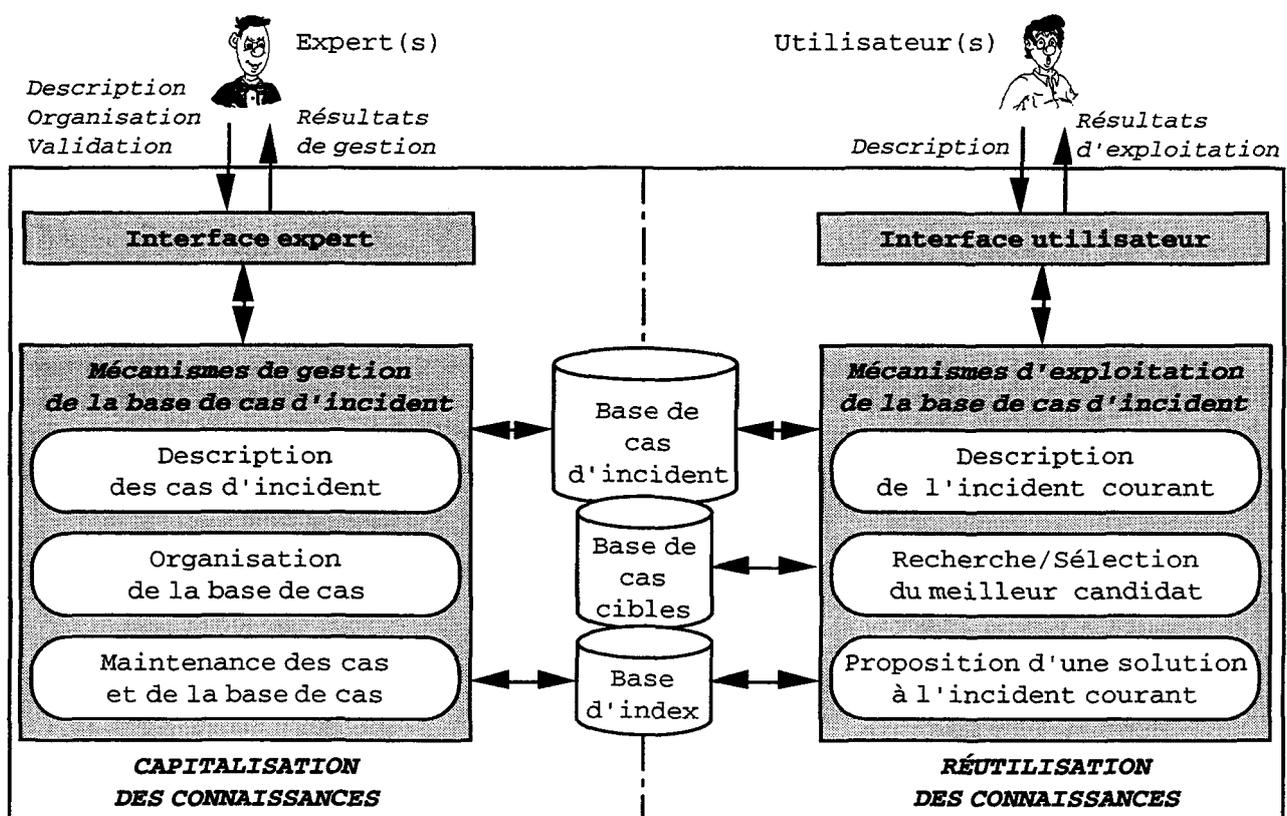


Figure 5.9 — Architecture logicielle de SACRÉ.

La base de cas d'incident réels et résolus par le passé constitue le cœur de SACRÉ. Elle joue deux rôles essentiels. D'une part, elle contraint l'espace de recherche des solutions et, d'autre part, elle permet une évaluation des incidents par comparaison. Deux modules distincts permettent de gérer et d'exploiter les connaissances de la base de cas. Chaque module héberge un ensemble de mécanismes correspondants à la mise en œuvre des étapes du RàPC. Ces mécanismes ont été implantés en langage C++ sur une station de travail Sun Sparc Station 20. À l'origine, ils sont basés sur l'utilisation de classes développées par la société ISoft. Les deux modules de SACRÉ sont en relation avec l'environnement extérieur par l'intermédiaire d'une interface homme-machine dédiée.

Des efforts importants concernant l'ergonomie de ces interfaces ont été consentis tout au long de la conception de SACRÉ. En effet, de la qualité des interfaces dépend,

bien souvent, l'utilité et l'utilisabilité du système dans son ensemble. Hollnagel [95] précise, à ce sujet, que la conception des interfaces ne doit pas être uniquement orientée par les exigences du système mais aussi, et surtout, par les exigences de la méthode de résolution de problèmes qu'il met en œuvre. L'objectif étant qu'en finale les utilisateurs s'approprient et acquièrent le réflexe de faire vivre la mémoire de leur expérience que constitue la base de cas d'incident.

La conception des interfaces a été menée selon une approche analytique basée sur l'intervention d'un spécialiste, l'apprentissage personnel du métier et l'utilisation de grilles d'évaluation [Kolski 93]. Nous avons tout particulièrement veillé à l'homogénéité des deux interfaces avec celles des outils de supervision et de péri-supervision présents au CSR de Paris-Montsouris. Le caractère ascendant et le recours aux disciplines des sciences cognitives de la méthodologie radicalement centrée sur l'utilisateur, augmentent en ce sens les chances de concevoir des systèmes qui leur sont mieux adaptés. Les interfaces de SACRÉ ont été implémentées à l'aide du générateur d'interfaces graphiques X-Designer, développé par la société Imperial Software Technology.

### 3.1.1 Interface de gestion de la base de cas d'incident

La première interface de SACRÉ est destinée à l'expert et permet de gérer la base de cas d'incident, de l'initialiser avec l'ensemble des cas d'incident résolus représentatifs du domaine et de l'organiser selon le point de vue. Ces actions sont proposées à l'expert par le biais de trois rubriques : Base de cas, Cas et Organisation, comme le montre la vue principale de l'interface, figure 5.10.

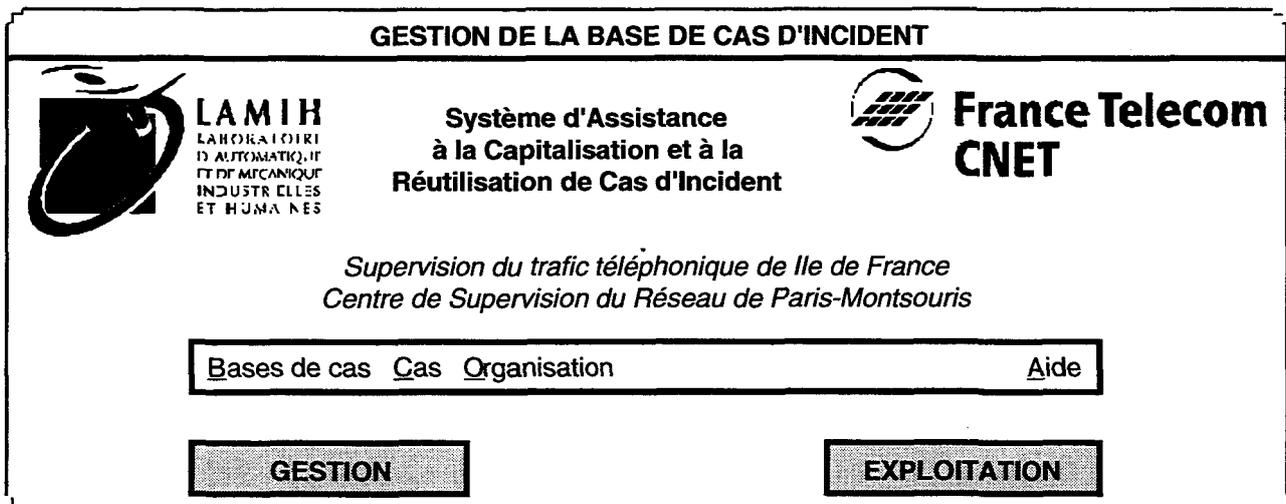


Figure 5.10 — Vue principale de l'interface de gestion de la base de cas d'incident.

La rubrique Base de cas permet à l'expert d'accéder à l'ensemble des commandes de gestion de la base de cas d'incident : sa création, son ouverture, sa modification, sa suppression et sa sauvegarde. Ainsi, la première opération de gestion du système SACRÉ consiste à créer la base de cas d'incident et à la garnir via la rubrique Cas.

La rubrique Cas concerne la capitalisation, proprement dite, des connaissances au sein de la base de cas. Elle permet à l'expert de saisir l'ensemble des connaissances attachées à un cas d'incident. Ces connaissances correspondent aux différentes facettes du modèle de cas d'incident présenté précédemment. D'autres options du menu permettent à l'expert d'afficher la liste des cas de la base et, si nécessaire, de détailler, de modifier ou de supprimer l'un d'entre eux.

Enfin, la rubrique *Organisation* se rapporte à l'organisation hiérarchique de la base de cas. En effet, pour optimiser la recherche de cas d'incident, SACRÉ propose à l'expert de construire et de maintenir un réseau de discrimination des cas de la base chargée en mémoire. La construction automatique de cet index repose, au préalable, sur la configuration de paramètres d'organisation, en fonction de l'objectif de la remémoration et du point de vue de l'expert sur la résolution de problèmes. Chaque index, une fois validé, peut être sauvegardé dans la base d'index de SACRÉ. Des options du menu *Organisation* permettent de gérer chaque index de la base : chargement en mémoire, suppression et sauvegarde.

### 3.1.2 Interface d'exploitation de la base de cas d'incident

Sous une forme analogue à la précédente, la seconde interface de SACRÉ permet à l'opérateur de supervision d'exploiter la base structurée de cas d'incident préalablement constituée. Cette interface d'exploitation de SACRÉ établit les liens avec les mécanismes du RàPC. Confronté à la description symptomatique de l'incident à traiter, le système recherche, dans la base de cas, les incidents similaires traités par le passé et propose des procédures d'action éprouvées à partir desquelles l'opérateur pourra résoudre l'incident courant. Trois rubriques sont accessibles à l'utilisateur : *Base de cas*, *Description* et *Recherche*.

La rubrique *Base de cas* permet à l'opérateur de charger en mémoire la base de cas d'incident qui sera utilisée par le raisonnement, sans toutefois en autoriser la modification.

L'exploitation de la base de cas débute par la description du cas cible, c'est-à-dire des symptômes et du contexte de l'incident de trafic déclaré sur le RTC, à l'aide du menu *Description*.

À partir de la description symptomatique du cas cible, la remémoration des cas d'incident historiques similaires de la base et la proposition de solutions au diagnostic et au traitement de l'incident courant sont déclenchées par la rubrique *Recherche*. Cinq options de ce menu permettent d'aboutir à ces résultats :

1. Sélectionner un index permet de charger en mémoire le réseau de discrimination sur lequel s'appuiera l'étape de recherche des cas proches.
2. Définir les pondérations offre la possibilité d'associer un poids à chaque descripteur, ou indice de description, des cas d'incident. Ces poids seront utilisés lors de l'évaluation de similarité des cas retrouvés par rapport à l'incident cible. Ils permettent de tenir compte du contexte de la résolution de problèmes.
3. Rechercher les cas proches enchaîne successivement deux traitements. Le premier utilise l'index en mémoire et la description du cas d'incident à traiter pour isoler un ensemble de cas proches de la base. Le second, sur la base des pondérations définies précédemment, apparie et classe les cas remémorés selon leur degré de ressemblance avec l'incident cible.
4. Afficher les cas remémorés présente de façon ordonnée les cas retrouvés et leur contenu.
5. Proposer une solution affiche la solution la plus crédible pour traiter l'incident courant, compte tenu des connaissances du système.

Après traitement, le nouvel incident pourra, via l'interface de gestion, compléter la base de cas et donc enrichir l'expérience capitalisée. Pour chacun des modes d'utilisation, nous expliquons maintenant comment sont mises en œuvre les options des rubriques présentées. Les choix de conception décrits dans ce paragraphe résultent des spécifications apportées par le modèle conceptuel de l'expertise.

## 3.2 Gestion de la base de cas d'incident

Les sections de ce paragraphe abordent successivement les modalités de représentation, de catégorisation, de description et d'organisation hiérarchique des cas d'incident au sein de SACRÉ.

### 3.2.1 Représentation des cas d'incident

À un cas d'incident est associé un objet structuré au sens des *frames* présentés au chapitre 2. L'intérêt de ce formalisme est, d'une part, de pouvoir considérer un incident comme une entité homogène et structurée, à l'image de son modèle, facilitant ainsi sa maintenance et, d'autre part, de permettre sa catégorisation par l'exploitation du mécanisme d'héritage.

Les cas d'incident sont classés selon la typologie établie au niveau domaine du modèle de l'expertise. À chaque type est associé une classe d'incident. Une classe d'incident définit un gabarit générique du type d'incident qu'elle décrit. Elle est indépendante de l'infrastructure du réseau supervisé et des catégories de trafic qu'il supporte. SACRÉ comprend 7 classes d'incident dont les noms sont fonction de l'équipement du réseau concerné par les symptômes de l'incident : Incident, Incident commutateur, Incident commutateur d'abonnés, Incident commutateur de transit, Incident faisceau, Incident faisceau de premier choix et Incident faisceau de second choix. Conformément au modèle de l'expertise ces classes sont en nombre limité et ont des noms évocateurs, mutuellement exclusifs et suffisamment généraux pour faciliter la consignation des cas d'incident. Ils ne nécessitent pas d'effort particulier d'interprétation de la part de l'opérateur.

Chaque descripteur des classes d'incident est spécifié par un ensemble de facettes :

- **“domaine”** indique le domaine de valeurs du descripteur. Ces valeurs peuvent être simples, telles que un entier, un réel, un booléen, une date ou une chaîne de caractères, ou complexes. Dans ce dernier cas, le descripteur agit comme un lien qui relie une instance d'une classe à une instance d'une autre classe. Par exemple, la propriété Catégorie de trafic touchée de la classe Incident est reliée à une classe particulière permettant de décrire la catégorie de trafic ;
- **“type”** fixe le type de la valeur attendue. Ce typage permet à SACRÉ d'effectuer une vérification de cohérence lors de l'affectation d'une valeur à un descripteur ;
- **“cardinalité”** précise le nombre de valeurs admissibles par le descripteur ;
- **“défaut”** contient une valeur par défaut. Cette facette permet de faire fonctionner le système dans un univers de connaissances incomplètes.

Chaque classe d'incident est catégorisée par conception d'une hiérarchie d'héritage.

### 3.2.2 Catégorisation des classes d'incident

Les classes d'incident recensées sont organisées en une hiérarchie de généralité représentant les liens hiérarchiques entre classes. Une telle catégorisation bénéficie du principe de partage dynamique de descripteurs. Une classe fille hérite des descripteurs de sa classe mère. Elle est spécialisée par la modification, l'ajout ou la suppression de descripteurs.

La figure 5.11 montre la catégorisation des classes d'incident telle qu'elle est représentée dans le système SACRÉ. La classe Incident a comme sous-classes Incident commutateur et Incident faisceau. La classe Incident faisceau hérite des caractéristiques de sa classe mère Incident. Par exemple, le descripteur Code

SGTQS est hérité de la classe mère Incident, alors que le descripteur Nombre de circuits en service spécialise la description de la classe Incident faisceau et n'est pas pertinent pour la classe Incident commutateur.

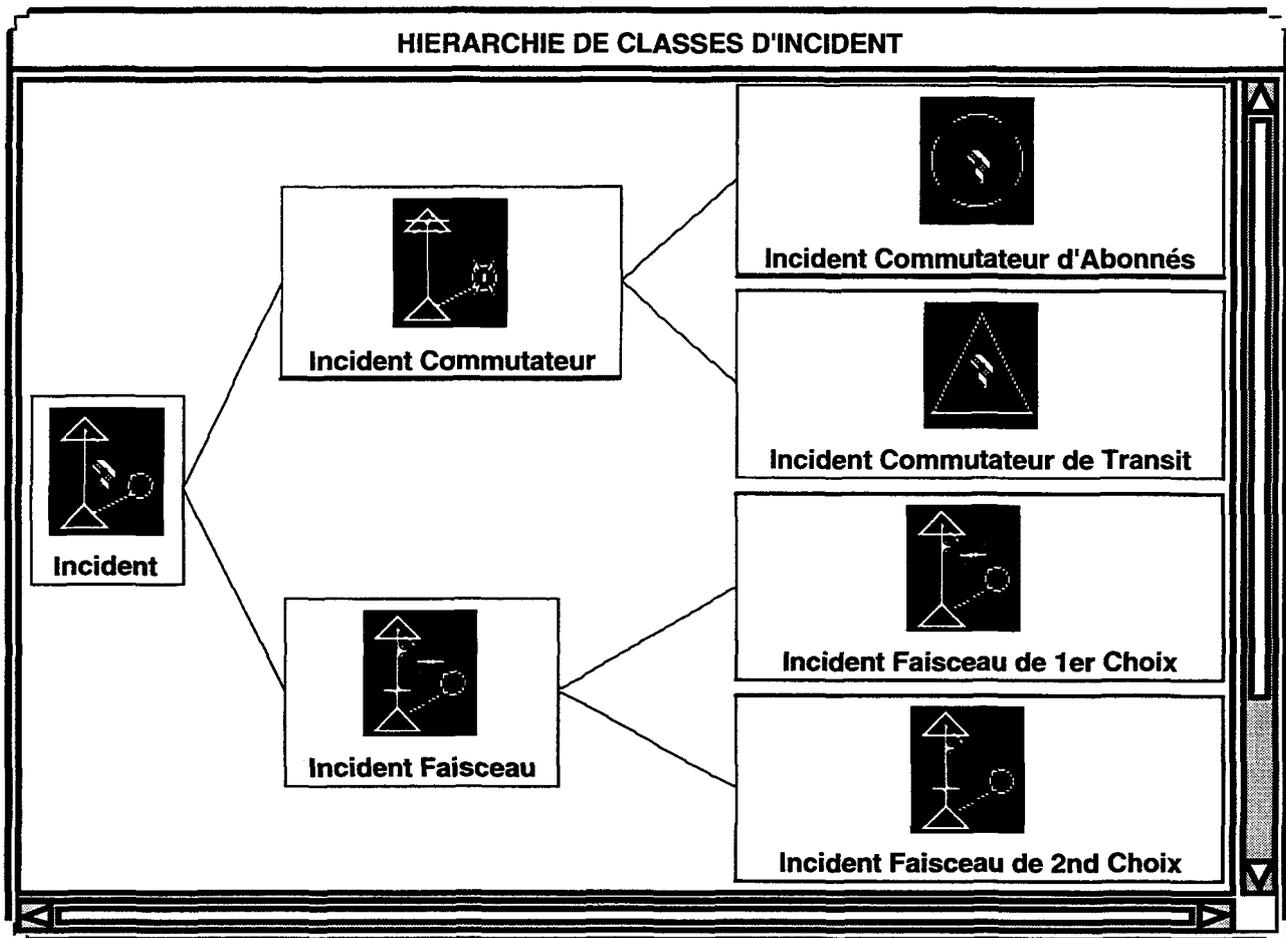


Figure 5.11 — Hiérarchie de généralité des classes d'incident de la base de cas.

L'utilisation du mode de représentation des connaissances orienté objets et des principes inhérents à l'héritage vont permettre d'éviter l'explosion combinatoire durant les processus de construction d'index et d'évaluation de similarité.

### 3.2.3 Description des cas d'incident

Une fois la structure des cas et de la base définie, l'expert est amené à décrire les différents types de cas d'incident recensés. La description d'un cas d'incident est conforme aux spécifications de son modèle. Les descripteurs peuvent être rassemblés suivant quatre facettes : la description symptomatique et contextuelle de l'incident, son diagnostic, les procédures d'action indispensables à son traitement et certaines données nécessaires à l'analyse de son impact sur la qualité des services.

L'initialisation de la base de cas d'incident de SACRÉ s'est faite à partir des fiches d'incident existantes. Elle a constitué un travail conséquent et rigoureux, même si la convivialité de l'interface, la souplesse d'utilisation du système et, surtout, la perspective d'une aide efficace en retour ont stimulé le travail.

Une attention particulière a été apportée à la saisie des connaissances associées à chaque cas d'incident de façon à garantir leur cohérence et leur pertinence et, par la même, l'efficacité et la fiabilité des résultats procurés par SACRÉ. L'efficacité de SACRÉ à traiter un nouvel incident de trafic dépend également de la qualité de la

distribution des cas dans la base. Cette dernière doit donc couvrir l'ensemble des situations typiques d'écoulement anormal du trafic téléphonique connues lors de la spécification du système [O'Leary 93]. Nous nous sommes aidés pour cela des capacités de tri statistique offertes par l'application Journal de Bord et de la connaissance acquise sur le domaine d'application. Nous avons constitué un échantillon qui se veut le plus représentatif des cas déjà traités, de telle sorte que tous les types d'incident prévisibles soient représentés au moins une fois dans la base. L'échantillon porte sur les types de problème et non sur les types de solution. L'objectif étant d'obtenir ce qui différencie des problèmes (du point de vue des difficultés de diagnostic et de traitement pour l'opérateur) et non ce qui différencie des solutions. Les opérations de maintenance de SACRÉ sur le site de supervision devront, à chaque fois que nécessaire, enrichir la base de cas pour étendre la couverture du domaine d'application. Le constat d'une incomplétude de la base de cas se traduit pour SACRÉ par une moindre performance qui doit alerter l'utilisateur et l'expert.

Actuellement, la base comporte 106 cas d'incident déclarés et résolus par le passé. Elle constitue une population d'apprentissage regroupant les types de fonctionnement défaillant du RTC de l'Île de France recensés à ce jour. L'organisation hiérarchique de la base de cas va permettre d'en optimiser l'exploitation.

### 3.2.4 Organisation hiérarchique de la base de cas

L'organisation hiérarchique de la base de cas permet à SACRÉ d'en extraire, le plus rapidement et le plus fiablement possible, un sous-ensemble pertinent de cas, à partir d'une description même partielle et/ou imprécise de l'incident cible. Elle repose sur la construction automatique d'un arbre d'indexation. Nous décrivons successivement, dans ce paragraphe, les deux étapes de l'organisation hiérarchique de la base de cas de SACRÉ : le choix des paramètres d'organisation et la construction de l'arbre d'indexation.

#### 3.2.4.1 Choix des paramètres d'organisation

Pour être efficace, l'organisation hiérarchique de la base de cas doit tenir compte du point de vue de l'opérateur et de l'objectif de la remémoration. Pour cela, l'opérateur décide des paramètres de contrôle de la structure de l'arbre d'indexation pour chacun des descripteurs. Les rubriques permettant de valuer ces paramètres sont les suivantes :

- *Inclure* autorise SACRÉ à considérer le descripteur correspondant lors de la construction de l'arbre d'indexation ;
- *Exclure* stipule que le descripteur attaché ne sera pas pris en compte lors de la construction de l'arbre d'indexation ;
- *Poids* attribue au descripteur associé une valeur entière dont l'accroissement avance sa prise en compte par l'arbre d'indexation.

La configuration des paramètres permet à l'expert de guider la construction automatique de l'arbre d'indexation par SACRÉ, en distinguant les descripteurs purement informatifs des descripteurs discriminants. Le choix des descripteurs apparaissant dans l'arbre d'indexation et l'assignation de poids à ces descripteurs exige une forte expertise du domaine d'application. Sur le plan de la méthode, nous avons commencé la construction de l'arbre à partir de valeurs de poids identiques pour tous les descripteurs. Les valeurs ont ensuite été affinées en fonction des performances de l'index. L'ajustement des paramètres d'organisation est possible depuis l'interface de la figure 5.12, obtenue à partir de la rubrique *Organisation*. La souplesse de configuration des paramètres d'organisation permet à SACRÉ de prendre en compte l'évolution de l'activité des opérateurs.

PARAMETRES D'ORGANISATION	
INDEX Numéro : 2	
[0] Outils de détection : <inclu> (1)	
[1] Alarme Superviseur de trafic : <inclu> (1)	
[2] Alarme Setter : <inclu> (1)	
[3] Alarme Experviseur : <inclu> (1)	
[4] Alarme Tcs cra-cerm : <inclu> (1)	
[5] Alarme Cévennes : <inclu> (1)	
[6] Catégorie de l'alarme : <inclu> (1)	
[7] Catégorie de trafic touchée : <inclu> (1)	
[8] Type de l'incident : <inclu> (1)	
[9] Code statistique de l'incident : <inclu> (1)	
<b>CONCEPT</b> < Cause de l'incident >	
INCLURE	EXCLURE
CONCEPT	POIDS
FERMER	

Figure 5.12 — Interface de configuration des paramètres d'organisation.

Enfin, la rubrique `Concept` permet à l'opérateur de sélectionner, parmi les descripteurs du cas d'incident, celui sur lequel portera l'organisation dynamique de la base, c'est-à-dire celui qui représente le problème que l'opérateur doit résoudre. En effet, la construction de l'index doit être finalisée par le but que l'utilisateur s'est assigné pour effectuer sa tâche de résolution de problèmes. Dans le cadre de SACRÉ, l'opérateur cherche à déterminer la cause de l'incident qui détermine la planification des procédures palliatives des conséquences de l'incident sur le trafic téléphonique. Ceci justifie que le concept retenu pour organiser la base de cas soit la Cause de l'incident.

SACRÉ offre la possibilité de construire plusieurs index sur la même base de cas, c'est-à-dire de pouvoir considérer des points de vue différents sur la résolution de problèmes. La sélection d'un point de vue consiste alors à choisir le bon arbre d'indexation dans la base d'index.

#### 3.2.4.2 Construction d'un index

L'organisation de la base de cas doit refléter le point de vue de l'opérateur et il appartient à l'index de contraindre l'espace de recherche aux seuls cas proches de façon à augmenter la rapidité et l'efficacité de la remémoration. L'organisation de l'ensemble de cas repose sur une approche de généralisation descendante [Caulier et Houriez 96b]. Pour chaque descripteur des cas de la population de référence, SACRÉ détermine une dichotomie en fonction d'un critère d'information puis teste successivement chaque descripteur et choisit le plus discriminant pour répartir les cas de la population en différentes classes. La décomposition de la population est répétée jusqu'à ce que tous les individus soient classés. L'index ainsi élaboré est un arbre de décision. Chaque nœud de l'arbre représente un test sur un descripteur considéré comme le plus discriminant par rapport à la population et au but recherché. Les branches caractérisent les valeurs alternatives des descripteurs testés et les feuilles constituent les ensembles de cas appartenant à une même classe.

Le test sur les descripteurs symboliques consiste à ne tester que la présence de la valeur de ce descripteur dans l'ensemble de cas (noté  $E$ ) associé au nœud. À la différence, le traitement d'un descripteur de type numérique nécessite une méthode de discrimination particulière qui consiste à déterminer une discrétisation de l'ensemble  $E$ . La discrétisation est choisie de telle sorte que les partitions de  $E$  correspondent au meilleur pouvoir discriminant du descripteur courant. La méthode de partition utilisée examine tous les seuils à même de borner un intervalle et ne retient que les meilleurs. Elle débute par le parcours du domaine de valeurs  $[d_{\min}..d_{\max}]$ , du descripteur courant  $D$ , dans l'ordre croissant des valeurs. À chaque pas, SACRÉ calcule un seuil candidat comme la moyenne de deux valeurs consécutives distinctes. Une partition de l'ensemble de cas courant  $E$  est réalisée sur la base de ce seuil et du calcul du pouvoir discriminant. Lorsque tout le domaine de valeurs du descripteur a été parcouru, le seuil retenu est celui auquel correspond le meilleur pouvoir discriminant. L'annexe A décrit les méthodes de calcul du pouvoir discriminant utilisées par SACRÉ dans les cas d'un concept de type symbolique et de type numérique.

Après élaboration, l'arbre d'indexation est enregistré dans la base d'index et peut être utilisé pour accéder aux cas.

### 3.3 Exploitation de la base de cas d'incident

La base de cas contient l'historique de l'ensemble des incidents déclarés et traités en supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Une fois organisé, ce capital d'expériences est exploité par SACRÉ. Dans ce dernier paragraphe, nous décrivons, les étapes de l'exploitation de la base de cas d'incident, telles qu'elles sont implantées dans le système SACRÉ. La démarche débute par la description symptomatique et contextuelle de l'incident cible à partir de laquelle se fera la remémoration de l'ensemble de cas d'incident qui lui sont similaires, selon l'évaluation qu'en ferait l'opérateur. Ce raisonnement s'effectue en deux phases successives. La première phase est une recherche, à l'aide de l'index, de cas relativement proches de la description de l'incident cible. La seconde phase est l'évaluation de similarité destinée à classer les cas remémorés. Enfin, la dernière étape propose à l'opérateur les procédures d'action destinées à pallier les effets de l'incident sur l'écoulement du trafic. Les connaissances nécessaires à l'implantation de ces mécanismes de raisonnement proviennent du modèle de l'expertise.

#### 3.3.1 Description d'un incident à traiter

L'exploitation de la base de cas débute par la description de la situation anormale. L'utilisateur commence par sélectionner une classe d'incident parmi les sept présentées précédemment. Il décrit ensuite, de façon la plus complète possible, le contexte de l'incident courant en renseignant les descripteurs de la classe. L'interface de SACRÉ contrôle la cohérence des valeurs saisies en termes de quantité et de respect des plages de valeurs autorisées. Parmi les descripteurs renseignés de façon systématique citons : l'outil de détection utilisé, le message de l'alarme qualifiée, son degré d'urgence, le type et la catégorie de trafic touchés, le code SGTQS et les caractéristiques de l'équipement du réseau affecté. Ces descripteurs, dits "analogiques", constituent l'ensemble des descripteurs à partir duquel seront remémorés les cas d'incident voisins de l'incident cible considéré. Une fois décrit l'incident courant est mémorisé dans la base de cas cibles.

#### 3.3.2 Recherche des cas proches

Plutôt que de rechercher les cas similaires dans toute la base de cas, SACRÉ effectue une sélection à l'aide d'un arbre d'indexation. Cette sélection est rapide et permet de

focaliser l'évaluation de similarité uniquement sur des cas en rapport avec la situation courante. La récupération des cas candidats est réalisée par comparaison des valeurs associées aux descripteurs analogiques, selon le point de vue sous-tendu par l'index. L'opérateur charge ou compose un index en mémoire de SACRÉ et déclenche la procédure de remémoration des cas similaires à l'aide de la rubrique Recherche de l'interface d'exploitation de la base de cas. Il a la possibilité de limiter le nombre de cas récupérés.

### 3.3.3 Évaluation de similarité

L'évaluation de similarité réalisée par SACRÉ est fondée sur la méthode dite des "plus proches voisins" [Caulier et Houriez 96b]. Elle débute par une comparaison descripteur par descripteur. Chaque comparaison élémentaire utilise une mesure de similarité à valeur numérique. La quantification des ressemblances entre les valeurs des descripteurs est représentée sous la forme d'un nombre réel compris dans l'intervalle [0..1]. La valeur 0 signifie une totale différence entre les descripteurs étudiés et la valeur 1 une parfaite identité. Les mesures de similarité utilisées par SACRÉ, pour chacun des types numérique et symbolique de descripteurs, sont détaillées dans l'annexe B.

La valeur de similarité entre chacun des  $n$  descripteurs d'un cas source et ceux de l'incident cible est mesurée. Pour tenir compte du contexte de l'incident cible, chacune des valeurs de similarité est pondérée à l'aide d'un poids. L'interface de dialogue de la figure 5.13 permet à l'opérateur de fixer les  $n$  valeurs  $w_i$  du vecteur de poids.

PARAMETRES DE SIMILARITE	
[0] Outils de détection :	<> (1)
[1] Alarme Superviseur de trafic :	<> (3)
[2] Alarme Setter :	<> (1)
[3] Alarme Experviseur :	<> (1)
[4] Alarme Tcs cra-cerm :	<> (1)
[5] Alarme Cévennes :	<> (1)
[6] Catégorie de l'alarme :	<> (1)
[7] Catégorie de trafic touchée :	<> (3)
[8] Type de l'incident :	<> (1)
[9] Code statistique de l'incident :	<> (1)

IGNORER	EXACT
POIDS	FERMER

Figure 5.13 — Interface de configuration des paramètres de similarité.

Les valeurs possibles sont, soit un entier positif, soit la valeur Ignore, soit la valeur Exact. Un entier indique l'importance relative d'un descripteur par rapport aux autres. Ainsi, dans le cas de la figure 5.13, la Catégorie de trafic touchée est trois fois plus importante que les autres descripteurs du cas d'incident. L'option Ignore rend inopérant le descripteur correspondant et le choix Exact impose l'identité de valeur pour le descripteur considéré. Dans ce dernier cas, le résultat de la comparaison doit être égal à 1 pour être considéré par SACRÉ. L'élaboration de cette pondération s'appuie sur une expertise issue de la phase de spécification. Une telle organisation permettra, notamment, de prendre en compte des valeurs plus fines révélées par une analyse plus approfondie de l'activité des opérateurs.

Le calcul du score d'appariement se fait par sommation des comparaisons élémentaires pondérées. L'appariement final est une moyenne pondérée des scores d'appariement entre les descripteurs du cas cible  $C_c$  et ceux du cas source  $C_s$  considéré :

$$\text{Sim}(C_c, C_s) = \frac{\sum_{i=1}^n \{w_i \times \text{Sim}(D_{c_i}, D_{s_i})\}}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

La méthode est appliquée à chaque cas source récupéré. Le tri des scores finaux permet d'ordonner les candidats par ordre décroissant de leur ressemblance sémantique avec la nouvelle situation. L'utilisation de la notion de similarité permet une résolution de problèmes par comparaison et offre au système une certaine robustesse face à l'information nouvelle ou incomplète.

### 3.3.4 Proposition de procédures d'action

Lorsque les cas les plus similaires au problème de l'utilisateur ont été remémorés et ordonnés, l'ultime étape du raisonnement consiste à adapter la solution, du ou des cas de référence, au contexte défini par la situation à traiter, afin de proposer à l'opérateur une solution correcte. D'une façon générale, nous pensons que, dans le cas de procédés complexes, le mot assistance prend son plein sens et qu'il revient à l'utilisateur de rendre opérationnels les éléments de solution proposés par le système d'aide. Ces éléments de solution peuvent être plus ou moins raffinés selon les moyens mis en œuvre.

Dans une première approche, SACRÉ présente à l'utilisateur la liste ordonnée et le contenu des cas remémorés, vis-à-vis de l'incident cible. Ces résultats fournissent à l'utilisateur les causes potentielles de l'incident cible auxquelles sont associés les traitements palliatifs de ses conséquences sur le trafic téléphonique. L'interprétation des solutions permet à l'opérateur de construire son plan d'action pour traiter l'incident. Cette première approche permet de s'affranchir de la complexité de l'expertise d'adaptation inhérente à la complexité des règles d'acheminement du trafic en Île de France.

Dans une seconde approche, l'utilisateur peut demander à SACRÉ de lui proposer une solution. Le mécanisme d'adaptation évoqué est fondé sur une méthode de "vote pondéré". La méthode porte sur le concept d'organisation, c'est-à-dire sur la cause de l'incident de trafic, dont la valeur est considérée comme la principale solution à apporter au problème de l'utilisateur. Elle repose sur un appariement linéaire des valeurs de concept d'organisation de tous les cas proches de l'incident courant. Cet appariement dépend du type du concept. Lorsque ce dernier est symbolique, la valeur retenue est celle qui apparaît le plus souvent. Si le concept est de type numérique, la valeur prise en compte est la moyenne des valeurs du concept dans les cas remémorés. L'appariement est ensuite pondéré, pour chaque cas, par la valeur de similarité de chaque cas source avec l'incident cible. La valeur finale retournée par la méthode d'adaptation est proposée à l'utilisateur pour diagnostiquer puis traiter l'incident courant. En l'absence de connaissances d'adaptation propres au domaine, la méthode du vote pondéré est appréciable. En effet, les connaissances relèvent d'une expertise particulière, difficile à acquérir et à formaliser. Dans l'état actuel de nos travaux, cet aspect de la réutilisation de connaissances n'a pas été développé.

### 3.3.5 Apprentissage

Le contenu de la base de cas d'incident n'est pas figé. Pour augmenter la couverture du domaine par la base de cas, et donc l'efficacité de l'aide à la résolution de problèmes,

l'utilisateur doit continuellement penser à enrichir la mémoire de SACRÉ. Cette tâche, qui en soi est une forme d'apprentissage, est déclenchée à partir de la rubrique Cas de l'interface de gestion et nécessite l'intervention d'un expert du domaine pour garantir la pertinence du nouveau cas. L'ajout de cas d'incident supplémentaires dans la base doit s'accompagner d'un nouveau calcul de l'index de façon à répercuter l'apprentissage sur l'organisation hiérarchique de la base de cas. Cette mise à jour de l'arbre d'indexation est à rapprocher des processus fondamentaux de l'apprentissage humain : l'amélioration de la mémoire s'opère, non seulement par une simple augmentation correspondant à un apprentissage par cœur, mais aussi par une modification de ses structures mêmes, c'est-à-dire par une modification de son système de catégorisation.

L'étape d'apprentissage termine le cycle d'exploitation du système d'assistance à la capitalisation et à la réutilisation de cas d'incident.

## 4 Conclusion

Ce chapitre s'est attaché à exposer l'application des phases principales de spécification et de conception de la méthodologie au domaine de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Elle débouche sur le système SACRÉ, un système d'assistance à la supervision fondé sur la capitalisation et la réutilisation de la notion de "cas d'incident".

La mise en œuvre de la phase de spécification a été exposée dans une première partie. Elle s'inscrit dans un cycle itératif et pluridisciplinaire de recueil, de modélisation et de validation de l'expertise du domaine. Les objectifs, les sources de connaissances consultées, les méthodes suivies et les résultats obtenus au cours des séances de recueil des données de l'expertise ont été présentés selon trois niveaux : collecte des connaissances descriptives, analyse de la tâche avant d'aborder l'analyse de l'activité et des traces de l'activité. Les savoirs et savoir-faire recueillis ont été formalisés selon l'organisation et les formalismes définis par le modèle de l'expertise *CommonKADS*. Le modèle des connaissances de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France constitue le principal résultat de la phase de spécification. Les spécifications significatives de ce modèle, pour la conception d'un système d'aide à la maîtrise du retour d'expérience, concernent :

- les connaissances liées à l'activité de réutilisation de l'expérience ;
- les modalités de prise en compte des notions de point de vue et de contexte ;
- la description du cas d'incident ;
- la catégorisation des incidents.

Ce travail nous a permis de tirer des conclusions, tant sur la flexibilité et le niveau d'abstraction du modèle de l'expertise *CommonKADS*, que sur les apports et les limites de l'outil *KADS-Tool* à l'activité de modélisation.

Sur la base des spécifications contenues dans le modèle de l'expertise, la seconde partie du chapitre a détaillé la conception du système SACRÉ. SACRÉ repose sur deux modes d'utilisation distincts. Le premier mode se rapporte à la capitalisation des cas d'incident. Il intègre les fonctionnalités de description des incidents traités et résolus par le passé et d'organisation dynamique de la base de cas d'incident ainsi constituée. La représentation des cas d'incident au sein de SACRÉ est orientée objet. Les cas d'incident sont catégorisés en sept classes selon les spécifications du modèle de l'expertise au niveau domaine. L'organisation dynamique de la base de cas repose sur la construction automatique d'un arbre d'indexation prenant en compte le point de vue de l'opérateur sur la résolution de problèmes. Le second mode d'utilisation de SACRÉ concerne

---

l'exploitation de la base de cas. À partir de la description symptomatique et contextuelle d'un incident à traiter, SACRÉ recherche et apparie un ensemble de cas issus de sa base. La recherche exploite les résultats de l'arbre d'indexation. L'appariement de chaque cas récupéré avec l'incident cible applique la méthode des "plus proches voisins" et considère le contexte de l'incident. Le tri des scores d'appariement permet d'ordonner les cas candidats selon leur degré de ressemblance avec l'incident courant. Enfin, l'adaptation des solutions associées aux cas ordonnés permet à SACRÉ de proposer à l'opérateur un diagnostic à l'incident déclaré sur le réseau et des procédures de traitement correspondantes.

SACRÉ a fait l'objet d'une évaluation expérimentale et d'une étude de son intégration dans l'environnement de supervision du trafic téléphonique. Les résultats de ce travail sont développés et analysés dans le dernier chapitre.



---

## Chapitre 6

# Évaluation expérimentale et perspectives d'intégration et d'extensions de SACRÉ

### 1 Introduction

Le chapitre précédent a décrit les phases de spécification et de conception de SACRÉ. Élaborée selon une méthodologie dédiée à la capitalisation et à la réutilisation de l'expérience, la maquette SACRÉ a servi deux objectifs, d'une part, proposer une réponse efficace aux attentes des opérateurs du Centre de Supervision du Réseau (CSR) de Paris-Montsouris et, d'autre part, confronter la dite méthodologie à une expérimentation en "grandeur réelle". Ce chapitre expose et critique les résultats obtenus et offre, en finale, des perspectives quant au prolongement du travail. Il est structuré en trois parties.

Plusieurs exemples d'incidents réels d'écoulement du trafic téléphonique ont permis de montrer les capacités et les performances de SACRÉ. Deux d'entre eux sont détaillés dans la première partie du chapitre. Le premier exemple concerne un incident de commutation dû à l'arrêt DUPLEX d'un commutateur de transit. La seconde perturbation est relative à un incident de transmission révélé par l'inefficacité d'un faisceau de premier choix. Nous présentons le traitement de ces deux incidents par SACRÉ et donnons un compte rendu des résultats obtenus.

La deuxième partie traite de l'intégration du principe de réutilisation d'incidents résolus par le passé dans l'organisation de la supervision du trafic téléphonique au CSR de Paris-Montsouris et analyse les interactions homme-machine introduites par SACRÉ.

Enfin, la dernière partie du chapitre dresse un bilan des aspects méthodologiques et techniques du travail accompli. Parmi les perspectives envisagées, nous proposons d'améliorer les performances de SACRÉ et, en finale, d'étendre l'application de la méthodologie à d'autres domaines.

## 2 Évaluation expérimentale de SACRÉ

La validation d'un système informatique est une notion complexe. L'Association Française pour le Contrôle Industriel de la Qualité (AFCIQ) propose la définition suivante : *“La validation des programmes et des données d'un système logiciel, par des moyens automatiques ou manuels, consiste à vérifier que le système répond à ses spécifications et à évaluer les différences entre les résultats attendus et les résultats obtenus”*. Cette définition recouvre trois aspects complémentaires : la validation, la vérification et l'évaluation du système.

La **validation** s'intéresse aux capacités du système. Elle a pour but de contribuer à garantir, jusqu'à un certain degré, la qualité et la fiabilité du système. Le système est jugé valide par rapport à certaines exigences formulées sous la forme de **spécifications** [Laurent 92]. Les spécifications définissent de façon précise, complète et non ambiguë ce dont l'utilisateur du système a besoin. Certaines de ces spécifications sont formalisables : les spécifications formelles, d'autres ne le sont pas, elles font l'objet de spécifications pseudo-formelles. Dans le cadre du domaine d'application étudié, la validation consiste à montrer que SACRÉ apporte effectivement une aide à la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.

La **vérification** détermine si le système satisfait, ou non, ses **spécifications formelles**. Elle vérifie que chaque étape de conception conserve bien les propriétés énoncées dans la spécification de départ. La vérification se décompose en vérification unitaire et en vérification d'intégration. La vérification unitaire consiste à répondre à la question : *“Est-ce que les modules implantés, pris individuellement, sont conformes aux spécifications formelles ?”*. La vérification d'intégration consiste à répondre à la question : *“Est-ce que ces modules s'interconnectent correctement ?”*.

Enfin, l'**évaluation** est le processus qui détermine si le système est, ou non, conforme à ses **spécifications pseudo-formelles**. Elle consiste à s'assurer, d'une part, de la pertinence des résultats proposés par le système et, d'autre part, que les connaissances représentées au sein du système sont correctes. Pour SACRÉ, ces dernières sont contenues dans les cas d'incident et dans les mécanismes de gestion et d'exploitation de la base de cas. Le processus d'évaluation des performances d'un système recouvre deux aspects : l'évaluation externe et l'évaluation interne.

L'**évaluation externe** se fait par comparaison avec un critère externe éprouvé et actuel. Par exemple, en comparant le système avec d'autres systèmes réalisant la même tâche, ou bien, en comparant ses performances avec celles d'experts humains. Cette évaluation est dite concourante ou convergente. L'**évaluation interne** se pratique, soit par une étude de la qualité apparente de la tâche réalisée, par un regard critique d'expert (**évaluation apparente**), soit par une étude du contenu du système en examinant s'il recouvre bien les dimensions du domaine (**évaluation de contenu**).

Dans le cadre de la validation complète d'un système, ces différents aspects sont complémentaires. À chaque étape de la conception de SACRÉ, une vérification statique et dynamique du code de représentation des connaissances et des mécanismes du Raisonnement à Partir de Cas (RàPC) a été effectuée. Dans les paragraphes suivants,

nous ne traitons que de l'évaluation externe de SACRÉ au sens de la définition précédente. Nous n'évoquons pas l'évaluation ergonomique *a posteriori* des interfaces graphiques du système qui est prématurée au stade de développement actuel de la maquette. Enfin, l'aspect validation globale est laissé à l'initiative du chef de projet, des experts et des différents utilisateurs du système.

SACRÉ a été évalué expérimentalement à l'aide de plusieurs exemples correspondant tous à des incidents réels survenus sur le Réseau Téléphonique Commuté (RTC) de l'Île de France. Parmi l'ensemble des exemples traités, deux ont été choisis pour leur relative facilité de compréhension, leur caractère typique et leur côté démonstratif des capacités et des performances de SACRÉ. Le premier exemple met en cause le fonctionnement d'un commutateur de transit dont les faisceaux sont fortement dégradés. Le deuxième porte sur un problème de transmission. Tout en étant satisfaisantes dans le contexte de l'application, les performances relatives aux temps de réponse ne sont pas analysées, au bénéfice des aspects liés à la faisabilité et à l'exactitude des résultats. Les mécanismes de raisonnement du système ne sont pas redétaillés mais uniquement les résultats qu'ils procurent. Ceux-ci ont été obtenus sans souci d'optimisation particulier [Caulier et Houriez 95f ; 96b].

## 2.1 Exemple 1 : Arrêt DUPLEX d'un commutateur de transit

Ce premier exemple d'incident est caractéristique des problèmes de commutation. Il est révélé à l'opérateur de supervision par la dégradation, ou la coupure, de plusieurs faisceaux avec le Commutateur de Transit de Zone Périphérique (CTZP) : Saint Germain en Laye CTZP 1, dont le code SGTQS est RP31. Les faisceaux affectés assurent l'acheminement de transit du trafic téléphonique non spécialisé de la Direction Régionale des Yvelines (DR 78) à laquelle appartient le commutateur. Le tableau 6.1 présente les seuils de déclenchement des données brutes et des indicateurs définis par la fonction d'état associée à l'alarme qualifiée "Faisceau très dégradé ou coupé". La persistance, durant 4 minutes, du nombre de circuits équipés (FCE) et du taux de circuits hors service (CHS) dans les états indiqués, déclenche l'apparition du message d'alarme sur les postes de travail locaux et l'écran mural du superviseur de trafic.

FONCTION D'ÉTAT				
Numéro d'alarme	Numéro d'état	Conditions sur les indicateurs		Sens de lecture
		FCE	CHS	
1022	16	≥30	≥70%	→ ET
ALARME QUALIFIÉE				
Numéro d'alarme	Libellé	Degré d'urgence	Couleur	
1022	Très dégradé ou coupé	AIM	Jaune	

Tableau 6.1 — Fonction d'état et alarme qualifiée "Faisceau très dégradé ou coupé".

Le commutateur de transit Saint Germain en Laye CTZP 1 joue, selon le type de trafic qu'il achemine, deux rôles de commutation : CTZP de type I ou CTZP du groupe A. En tant que CTZP de type I, il achemine :

- en **premier choix** : les communications de transit intra-DR 78 et les échanges de transit inter-zone de numérotage. Il existe deux zones de numérotage en Zone Périphérique (ZP). La première correspond aux départements des Yvelines et du Val d'Oise (95), dont l'indicatif A du numéro de téléphone est égal à 3. La seconde concerne les départements de l'Essonne (91) et de la Seine et Marne (77), et a pour indicatif A la valeur 6 ;

- en **dernier choix** : les communications inter-zone de numérotage si un faisceau transversal est utilisé en premier choix.

En tant que CTZP du groupe A, il sert :

- en **premier choix** : au transit, depuis la DR 78, vers les Commutateurs Urbains du groupe A (CUA) de la Zone Urbaine (ZU) ;
- en **dernier choix** : au transit, depuis la DR 78, vers les Commutateurs Urbains du groupe B (CUB) de la ZU.

La figure 6.1 présente les acheminements de transit de la téléphonie classique relatifs à la DR 78. Pour des raisons de simplification, seuls les deux commutateurs d'abonnés  $CAA_i$  et  $CAA_j$ , sur les 28 que compte la DR 78, ont été représentés. D'autre part, les faisceaux directs inter-commutateurs d'abonnés et les faisceaux transversaux ne sont pas reproduits. D'après la méthode d'acheminement utilisée en ZP, le chemin emprunté par l'acheminement de premier choix est distinct, sur toute sa longueur, du chemin de dernier choix. L'acheminement de premier choix, au départ de chaque CTZP rencontré sur le chemin de premier choix, déborde sur un faisceau vers un CTZP, ou un commutateur de transit urbain (CTU), appartenant au chemin de dernier choix.

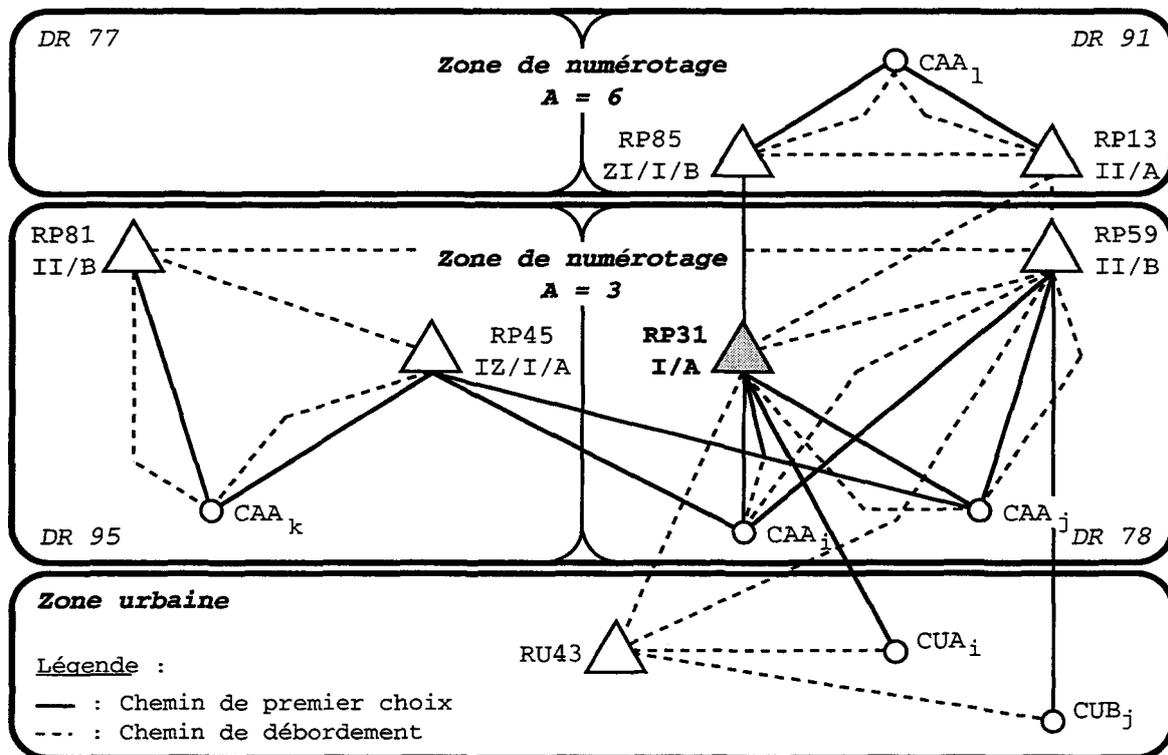


Figure 6.1 — Acheminements de transit non spécialisés de la DR 78.

Bien que simplifiée, la figure 6.1 montre la densité importante de faisceaux entrant et sortant du CTZP RP31. Ce sont ces faisceaux dont l'opérateur constate la dégradation de l'efficacité, voire l'interruption, dans l'exemple 1. Plusieurs causes peuvent être à l'origine d'une telle défaillance, par exemple :

- problème ou panne de commutation, de transmission ou de signalisation ;
- travaux sur les faisceaux ;
- faisceaux basculés sur un autre commutateur ;
- création ou extension de faisceaux non encore mis en service.

Le traitement de l'incident à l'aide de SACRÉ débute par sa description, figure 6.2. Le choix de la classe Incident Commutateur de Transit est celui effectué par l'opérateur de supervision. Il se justifie par le fait que les faisceaux impliqués dans l'incident sont tous en relation avec le commutateur de transit Saint Germain en Laye CTZP 1. Les descripteurs cibles renseignés par l'opérateur correspondent aux symptômes et aux informations contextuelles de l'incident. Par exemple, l'opérateur précise le message d'alarme affiché par le superviseur de trafic et la catégorie de trafic touchée. Toutes les données apportées sont connues de l'opérateur ou fournies par le superviseur de trafic. La sélection d'un descripteur permet d'ouvrir un dialogue spécifique. Lorsque le domaine de valeurs possibles est fini, SACRÉ invite l'opérateur à sélectionner sa (ou ses) réponse(s) dans ce domaine.

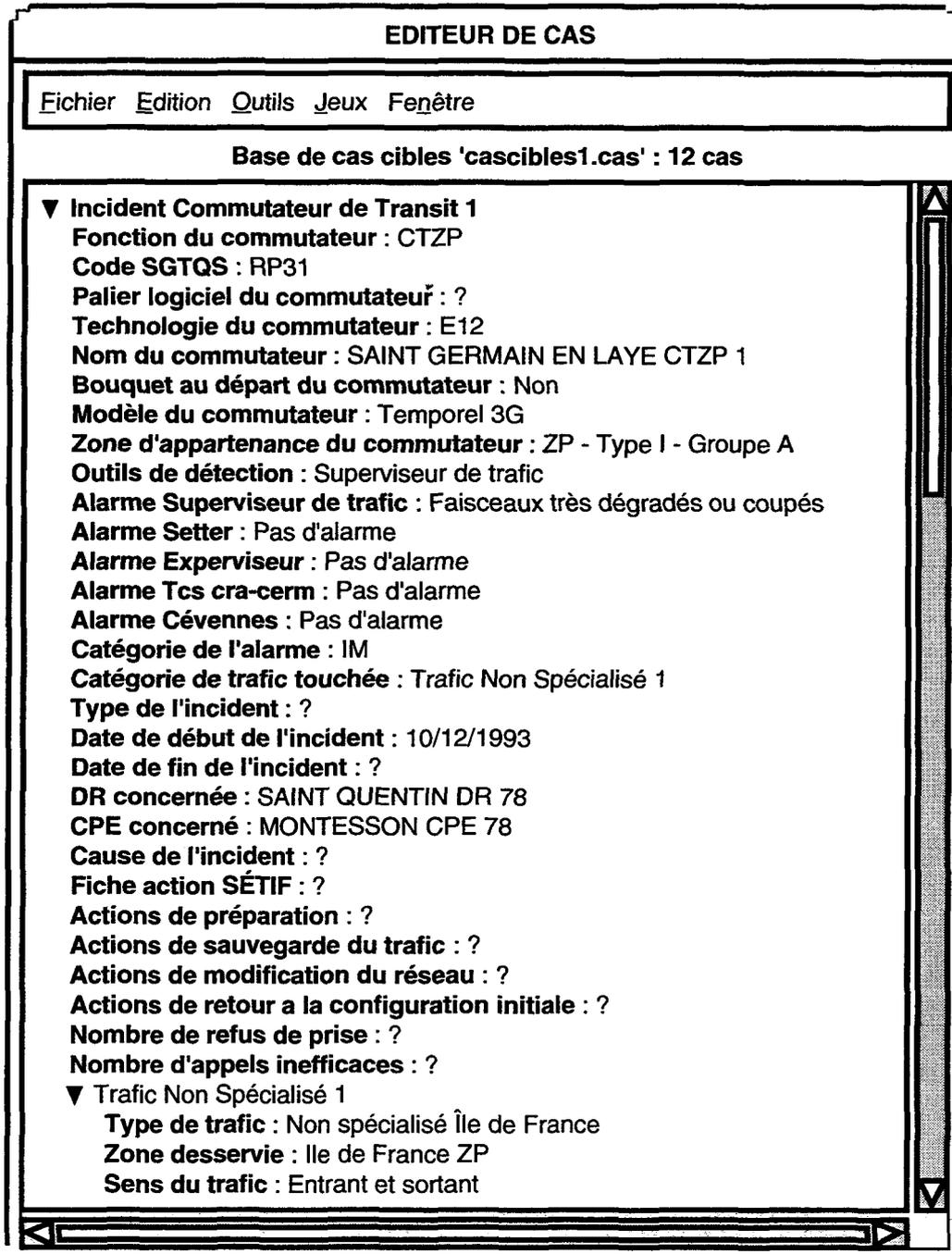


Figure 6.2 — Description de l'incident.

La sélection de l'option Rechercher les cas proches déclenche la procédure de remémoration des cas proches de l'incident courant. Le résultat ordonné s'affiche dans la fenêtre de dialogue de la figure 6.3. Il est l'aboutissement de deux étapes successives. La première est une recherche des cas pertinents vis-à-vis de la description de l'incident courant. La recherche utilise un arbre d'indexation de la base d'index. Celui-ci est construit en fonction du point de vue de l'opérateur et du but de la remémoration qui, pour l'exemple, est la détermination de la cause de l'incident. L'étape suivante concerne l'évaluation de similarité des cas retrouvés. Un score de ressemblance est calculé de façon à ordonner chaque cas récupéré en fonction de la description de l'incident courant. Cette seconde étape prend en compte le contexte de l'incident à traiter.

L'écran de la figure 6.3 comporte trois listes. La liste de gauche regroupe les noms des situations proches de l'incident cible retrouvées par SACRÉ. La longueur de cette liste est limitée à une valeur fixée par l'utilisateur. La liste centrale est l'expansion du cas sélectionné dans la liste de gauche. Enfin, la liste de droite présente la description de l'incident cible. Le degré de similarité entre l'incident cible et un cas proche sélectionné s'affiche en haut et à droite de la fenêtre. Si l'utilisateur sélectionne un descripteur du cas décrit dans la liste centrale, la valeur de la similarité entre les cas, calculée pour ce descripteur, est indiquée en haut et au milieu de la fenêtre.

SIMILARITE		
Similarite du descripteur : 100		Similarite du cas : 92.8
Cas similaires	Cas proche	Cas cible
ur de Transit 4	<b>Incident Commutateur de Transit 4</b>	<b>Incident Commutateur de Transit 1</b>
r de Transit 23	<b>Fonction du commutateur : CTZP</b>	<b>Fonction du commutateur : CTZP</b>
ur de Transit 9	<b>Code SGTQS : RP31</b>	<b>Code SGTQS : RP31</b>
r de Transit 24	<b>Palier logiciel du commutateur : TN</b>	<b>Palier logiciel du commutateur : ?</b>
r de Transit 12	<b>Technologie du commutateur : E12</b>	<b>Technologie du commutateur : E12</b>
r de Transit 18	<b>Nom du commutateur : SAINT GER</b>	<b>Nom du commutateur : SAINT GER</b>
r de Transit 88	<b>Bouquet au départ du commutateur</b>	<b>Bouquet au départ du commutateur</b>
r de Transit 91	<b>Modele du commutateur : Temporel</b>	<b>Modele du commutateur : Temporel</b>
r de Transit 32	<b>Zone d'appartenance du commutateur</b>	<b>Zone d'appartenance du commutateur</b>
r de Transit 22	<b>Outils de détection : Superviseur de</b>	<b>Outils de détection : Superviseur de</b>
	<b>Alarme Superviseur de trafic : Faisc</b>	<b>Alarme Superviseur de trafic : Faisc</b>
	<b>Alarme Setter : Pas d'alarme</b>	<b>Alarme Setter : Pas d'alarme</b>
	<b>Alarme Experviseur : Pas d'alarme</b>	<b>Alarme Experviseur : Pas d'alarme</b>
	<b>Alarme Tcs cra-cerm : Pas d'alarme</b>	<b>Alarme Tcs cra-cerm : Pas d'alarme</b>
	<b>Alarme Cévennes : Pas d'alarme</b>	<b>Alarme Cévennes : Pas d'alarme</b>
	<b>Catégorie de l'alarme : IM</b>	<b>Catégorie de l'alarme : IM</b>
	<b>Catégorie de trafic touchée : Trafic</b>	<b>Catégorie de trafic touchée : Trafic</b>
	<b>Type de l'incident : Grave</b>	<b>Type de l'incident : ?</b>
	<b>Date de début de l'incident : 05/10/1</b>	<b>Date de debut de l'incident : 10/12/1</b>
	<b>Date de fin de l'incident : 05/10/199</b>	<b>Date de fin de l'incident : ?</b>
	<b>DR concernée : SAINT QUENTIN D</b>	<b>DR concernée : SAINT QUENTIN D</b>
	<b>CPE concerné : MONTESSON CPE</b>	<b>CPE concerne : MONTESSON CPE</b>
	<b>Cause de l'incident : Arrêt DUPLEX</b>	<b>Cause de l'incident : ?</b>
<b>VOTE</b>		<b>FERMER</b>

Figure 6.3 — Résultats de la procédure de remémoration.

À partir de l'ensemble des cas les plus similaires proposés par SACRÉ, l'utilisateur peut demander une adaptation des cas remémorés aux caractéristiques de l'incident courant par l'appui sur le bouton *Vote*. La procédure d'adaptation porte sur le concept d'organisation de la base de cas et prend en compte les solutions de tous les cas similaires à l'incident en cours d'étude, conformément aux modalités évoquées au chapitre 5.

La figure 6.4 présente le résultat du vote pondéré. La liste suggère quatre causes potentielles à l'incident courant. En tête de celle-ci, avec une similarité de 95,8%, figure l'arrêt DUPLEX du commutateur de transit RP31. Ce premier diagnostic est suivi de l'éventualité d'une panne d'un organe du commutateur. La relative proximité entre ces deux suggestions du même ordre s'explique par le fait que l'arrêt DUPLEX d'un commutateur est le plus souvent dû au dysfonctionnement ou à la panne de l'un de ses organes. Enfin, deux autres propositions sont présentées à l'opérateur avec une valeur de leur similarité de 17,5%, qui laisse présager leur faible probabilité d'être à l'origine de l'incident. Avec cette échelle de similarité, SACRÉ contribue à accroître l'efficacité de l'activité de diagnostic en la focalisant sur l'évaluation des hypothèses fortes sans, toutefois, ignorer les hypothèses faibles.

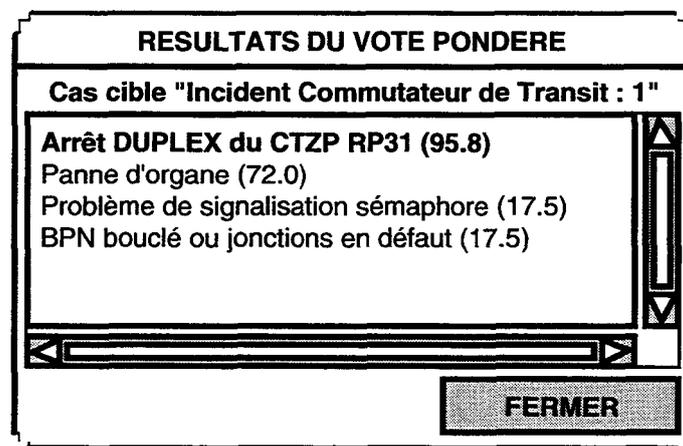


Figure 6.4 — Résultats de la procédure d'adaptation.

Le diagnostic de l'incident courant par l'opérateur a confirmé l'arrêt des unités de contrôle et de commande A et B du commutateur de transit RP31 suite au changement de palier de son logiciel. Cette confirmation de la solution proposée par SACRÉ atteste de l'efficacité et de la précision de la procédure de remémoration. Toutefois, pour des raisons de sûreté de fonctionnement du RTC et de qualité des services, l'opérateur doit, en pratique, toujours confirmer le diagnostic avant de planifier les procédures de traitement conséquentes du diagnostic. À cette fin, il doit utiliser au mieux les moyens mis à sa disposition pour évaluer les hypothèses émises et/ou rechercher les indices qui confirmeront le diagnostic.

La connaissance de la cause permet à l'opérateur d'élaborer un plan d'action destiné à pallier ses conséquences sur le bon écoulement du trafic. L'objectif prioritaire de l'opérateur dans cette activité est de sauvegarder l'acheminement des communications par l'exécution de procédures de conservation du trafic qui consistent essentiellement en des actions de reconfiguration du réseau. SACRÉ permet à l'opérateur de consulter le plan d'action associé à l'incident dont la cause correspond à celle de l'incident courant. Le plan d'action proposé par SACRÉ pour traiter l'incident de l'exemple, en heures ouvrables, est donné à la figure 6.5. Il planifie quatre types d'action :

1. Des actions d'amélioration de l'information des opérateurs et de préparation des réacheminements.
2. Des actions de sauvegarde du trafic.
3. Des actions de modification du réseau d'une ampleur plus importante, selon l'évolution des conséquences de l'incident.
4. Des actions indispensables de retour à la configuration initiale du réseau, dès que le service téléphonique est rétabli.

<b>PROCEDURES D'ACTION</b>	
<b>Cas cible "Incident Commutateur de Transit : 1"</b>	
<p><b>Actions d'amélioration de l'information et de préparation :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lister dans la base BDIR les faisceaux de la zone arrière du CTZP</li> <li>• Lister dans la base BDIR les CU du groupe correspondant au CTZP</li> <li>• Mettre en supervision les faisceaux listés ci-dessus et les faisceaux codifiés V vers</li> <li>• Identifier les CAA de priorité 1 et ceux dont les faisceaux touchés n'ont pas de dé</li> <li>• Alerter la cellule SÉTIF du Groupement Trafic</li> <li>• Demander au CSR de Blagnac l'autorisation d'utiliser les CTS</li> <li>• Mettre à jour le serveur vocal</li> <li>• Préparer l'envoi des télex d'information aux services concernés</li> </ul>	<div style="text-align: right; padding-right: 5px;">▲</div> <div style="text-align: right; padding-right: 5px;">▼</div>
<p><b>Actions de sauvegarde du trafic :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Émettre les télex d'information préparés</li> <li>• Activer les acheminements de secours selon le plan CRISTEL du CTZP sinistré</li> <li>• Modifier le débordement au départ des CAA listés vers le CTZP complémentaire</li> <li>• Modifier le débordement au départ des CU listés sur la direction de secours</li> <li>• Surveiller l'évolution de la situation</li> </ul>	
<p><b>Actions de modification du réseau :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prévenir le responsable du Groupement Trafic</li> <li>• Réacheminer le trafic au départ de certains CU vers le CTU complémentaire de z</li> <li>• Filtrer (ratio évolutif) au départ des CAA électroniques et du CTZP complémentair</li> <li>• Étendre (ou créer) des faisceaux par création de BPN au départ du CTZP complé</li> <li>• Suivre l'évolution de la situation</li> </ul>	
<p><b>Actions de retour à la configuration initiale :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Envoyer aux services concernés les télex d'information de retour à la situation no</li> <li>• Demander aux CPE concernés de revenir à la situation initiale</li> <li>• Surveiller le retour à la situation initiale</li> <li>• Remettre à jour le serveur vocal</li> </ul>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px 10px; display: inline-block;"><b>FERMER</b></div>	

Figure 6.5 — Planification des procédures d'action.

Les actions sur le réseau sont exécutées, très progressivement, par les opérateurs des Centres Principaux d'Exploitation (CPE) concernés par l'incident, et leur effet sur le trafic rigoureusement contrôlé par les opérateurs du CSR de Paris-Montsouris.

## 2.2 Exemple 2 : Inefficacité d'un faisceau de premier choix

Ce deuxième exemple vise à montrer les capacités et les performances de SACRÉ à traiter un incident de transmission. L'incident concerne une efficacité nulle constatée sur le faisceau direct AB93-AC93 0, entre les commutateurs d'abonnés de la Direction Régionale de Paris Nord (DR 75N) Diderot 3 vers Montmartre 3. D'après le code SGTQS du faisceau, les communications affectées se rapportent à la téléphonie classique et relèvent du trafic intra-ZU.

L'inefficacité d'un faisceau est une conséquence qui se manifeste par une importante quantité d'appels inefficaces, sans toutefois entraîner l'occupation totale de certains faisceaux. Elle est déclarée à l'opérateur de supervision par le message d'alarme : "Faisceau à efficacité nulle". Le tableau 6.2 définit les fonctions d'état attachées à l'alarme qualifiée. La première fonction d'état correspond aux faisceaux supervisés entrants. La suivante s'applique aux faisceaux supervisés sortants. Pour ces derniers, la condition  $F1T \geq 5$  est ajoutée pour éliminer les alarmes provoquées à tort par le test du réseau de connexion des commutateurs d'abonnés de technologie 11F qui, de façon autonome, incrémente le nombre de prises (FP). Le maintien, pendant 8 minutes, des données brutes et des indicateurs calculés dans les états précisés, provoque l'affichage de l'alarme qualifiée.

FONCTION D'ÉTAT						
Numéro d'alarme	Numéro d'état	Conditions sur les indicateurs				Sens de lecture
		FP	F1T	TPR	TPPR	
1024	19	$\geq 20$	-	=0%	-	→ ET
1024	19	$\geq 20$	$\geq 5$	=0%	=0%	↓ OU
ALARME QUALIFIÉE						
Numéro d'alarme	Libellé		Degré d'urgence		Couleur	
1024	Efficacité nulle		AIM		Bleue vive	

Tableau 6.2 — Fonction d'état et alarme qualifiée "Faisceau à efficacité nulle".

Avant d'entrer en contact avec le correspondant trafic du CPE concerné par l'incident, l'opérateur de supervision s'attache à recueillir le plus grand nombre d'informations possibles sur l'incident et tente d'établir un diagnostic en local. En plus de signaler que le faisceau est inefficace, l'opérateur observe, à l'aide du superviseur de trafic, la brusque croissance du nombre de prises (FP), sans décroissance du nombre d'appels efficaces (FAE). Dans ce cas, l'inefficacité du faisceau peut résulter :

- du bouclage, ou de la défection, d'un Bloc Primaire Numérique (BPN), si le faisceau est supervisé en sortie ;
- du numéro de l'abonné demandé perturbateur ;
- du test du réseau de connexion d'un commutateur d'abonnés de technologie 11F ;
- de paramètres d'acheminement et/ou de débordement associés au faisceau, erronés. Ce phénomène se produit, soit lors de basculements d'indicatifs d'un commutateur d'un groupe de la ZU sur un commutateur de l'autre groupe de la ZU, soit lors d'un débordement du trafic interurbain, en cas d'incident sur le commutateur de transit principal Montsouris CTP 2. Le code d'accès et le rang du dernier chiffre à recevoir avant réémission sont les paramètres d'acheminement les plus souvent incorrects ;
- du "bagottement" de jonctions entrantes.

Lorsque l'inefficacité affecte plusieurs faisceaux, l'incident peut être dû à :

- un indicatif bouclé ;
- un afflux d'appels vers un numéro pollueur ;
- un traducteur de commutateur erroné ;
- un arrêt DUPLEX du commutateur.

À ces principales causes s'ajoutent une multitude de dysfonctionnements potentiels des organes de commutation. Le nombre d'hypothèses de cause à l'inefficacité du trafic sur le faisceau AB93-AC93 0 est donc conséquent et à l'image de la complexité de la tâche de l'opérateur. Cet exemple concret illustre le rôle important que peut jouer SACRÉ dans de telles situations. Dans la description de l'incident, figure 6.6, l'opérateur

fournit à SACRÉ les informations relatives à la déclaration de l'incident, telles que l'identification du faisceau inefficace, le message d'alarme observé, le type et la catégorie de trafic touchés.

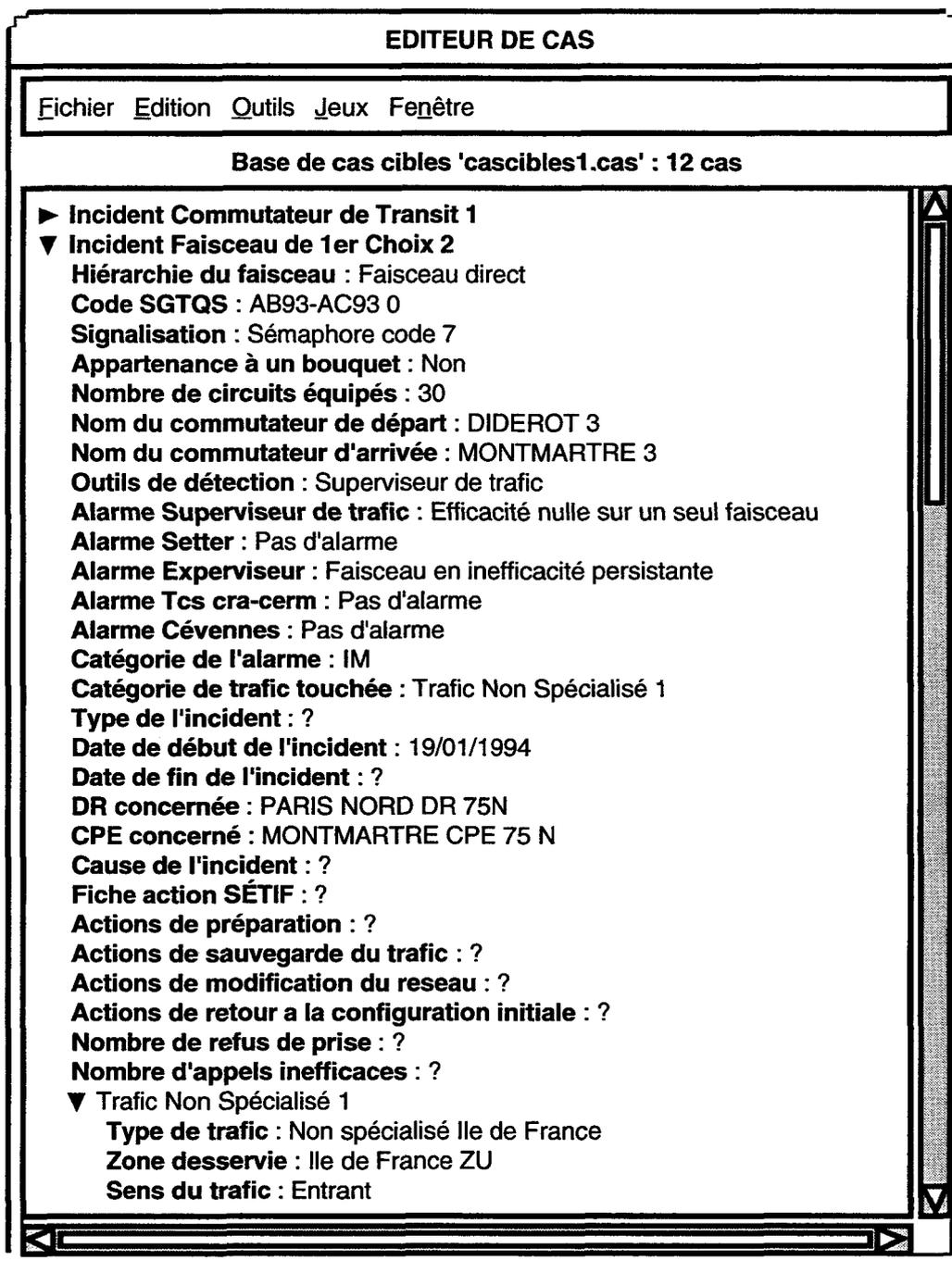


Figure 6.6 — Description de l'incident.

La description de l'incident permet d'exécuter la procédure de remémoration. La figure 6.7 présente le résultat de la procédure. Celle-ci se limite aux dix cas les plus proches de l'incident cible. Le premier d'entre eux, avec une similarité de 89,7%, est présenté, par défaut, à l'utilisateur. L'incident date du 15 octobre 1993 et avait été causé par le bagottement de jonctions entrantes.

SIMILARITE		
Similarite du descripteur : 100		Similarite du cas : 89.7
Cas similaires	Cas proche	Cas cible
e 1er Choix 48 1er Choix 100 e 1er Choix 42 e 1er Choix 90 e 1er Choix 40 e 1er Choix 37 e 1er Choix 43 e 1er Choix 45 e 1er Choix 82 e 1er Choix 11	<b>Incident Faisceau de 1er Choix 48</b> <b>Hiérarchie du faisceau :</b> Faisceau di <b>Code SGTQS :</b> AB93-AC93 0 <b>Signalisation :</b> Sémaphore code 7 <b>Appartenance à un bouquet :</b> Non <b>Nombre de circuits équipés :</b> 30 <b>Nom du commutateur de départ :</b> D <b>Nom du commutateur d'arrivée :</b> M <b>Outils de détection :</b> Superviseur de <b>Alarme Superviseur de trafic :</b> Effic <b>Alarme Setter :</b> Pas d'alarme <b>Alarme Experviseur :</b> Pas d'alarme <b>Alarme Tcs cra-cerm :</b> Pas d'alarme <b>Alarme Cévennes :</b> Pas d'alarme <b>Catégorie de l'alarme :</b> IM <b>Catégorie de trafic touchée :</b> Trafic <b>Type de l'incident :</b> Mineur <b>Date de début de l'incident :</b> 15/10/1 <b>Date de fin de l'incident :</b> 05/10/199 <b>DR concernée :</b> PARIS NORD DR 75 <b>CPE concerné :</b> MONTESSON CPE <b>Cause de l'incident :</b> Bagot de joncti <b>Fiche action SÉTIF :</b> 16 - Faisceau à	<b>Incident Faisceau de 1er Choix 2</b> <b>Hiérarchie du faisceau :</b> Faisceau di <b>Code SGTQS :</b> AB93-AC93 0 <b>Signalisation :</b> Sémaphore code 7 <b>Appartenance à un bouquet :</b> Non <b>Nombre de circuits équipés :</b> 30 <b>Nom du commutateur de départ :</b> D <b>Nom du commutateur d'arrivée :</b> M <b>Outils de détection :</b> Superviseur de <b>Alarme Superviseur de trafic :</b> Effic <b>Alarme Setter :</b> Pas d'alarme <b>Alarme Experviseur :</b> Faisceau en in <b>Alarme Tcs cra-cerm :</b> Pas d'alarme <b>Alarme Cévennes :</b> Pas d'alarme <b>Catégorie de l'alarme :</b> IM <b>Catégorie de trafic touchée :</b> Trafic <b>Type de l'incident :</b> Mineur <b>Date de début de l'incident :</b> 19/01/1 <b>Date de fin de l'incident :</b> ? <b>DR concernée :</b> PARIS NORD DR 75 <b>CPE concerné :</b> MONTESSON CPE <b>Cause de l'incident :</b> ? <b>Fiche action SÉTIF :</b> ?
<b>VOTE</b>		<b>FERMER</b>

Figure 6.7 — Résultats de la procédure de remémoration.

La demande par l'opérateur d'une adaptation de la solution à l'incident courant par la sélection du bouton Vote conduit au classement de la figure 6.8.

RESULTATS DU VOTE PONDERE
<b>Cas cible "Incident Faisceau de 1er Choix : 2"</b>
<b>Bagot de jonctions entrantes (98.5)</b> BPN bouclé ou jonctions en défaut (37.2) Test du réseau de connexion d'un CA 11F (22) Erreur d'acheminement ou de traduction (14.3)
<b>FERMER</b>

Figure 6.8 — Résultats de la procédure d'adaptation.

La procédure d'adaptation classe, par ordre de probabilité décroissante, les causes vraisemblables de l'incident en cours de traitement. La principale cause suspectée d'être

à l'origine des nombreuses prises inefficaces est, de loin, le bagottement de jonctions entrantes. Dans l'étape de confirmation du diagnostic, l'opérateur de supervision contacte le correspondant trafic du CPE de Montmartre, dont dépend l'exploitation du commutateur d'abonnés Montmartre 3. Après une analyse du commutateur, le correspondant trafic informe l'opérateur du CSR qu'il vient de bloquer manuellement une jonction du commutateur, confirmant ainsi le diagnostic dressé par SACRÉ.

Pour prolonger son assistance, SACRÉ associe à la cause de l'incident une planification de procédures d'action. La figure 6.9 précise les actions à mener, en heure ouvrable, de façon à stopper le bagottement de la jonction défectueuse. En heure non ouvrable, les actions de l'opérateur se limitent à :

- détecter la jonction fautive à l'aide des outils de péri-supervision ;
- signaler la jonction défectueuse au correspondant trafic d'astreinte du CPE concerné ;
- dans la mesure du possible, déplacer un agent d'exploitation pour confirmer le diagnostic et, le cas échéant, faire bloquer manuellement la (ou les) jonction(s) défectueuse(s).

<b>PROCEDURES D'ACTION</b>	
<b>Cas cible "Incident Faisceau de 1er Choix : 2"</b>	
<p><b>Actions d'amélioration de l'information et de préparation :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tenter de localiser la (ou les) jonction(s) en défaut à l'aide des outils de péri-supe</li> <li>• Contacter le correspondant trafic du commutateur d'arrivée pour confirmer le diag</li> <li>• Vérifier que d'autres faisceaux ne soient pas inefficaces</li> <li>• Alerter la cellule SÉTIF du Groupement Trafic</li> <li>• Mettre à jour le serveur vocal</li> <li>• Préparer l'envoi des télex d'information aux services concernés</li> </ul>	<div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; height: 100px; position: relative;"> <div style="position: absolute; top: 0; right: 0; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background: white;"></div> <div style="position: absolute; bottom: 0; right: 0; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; background: white;"></div> </div>
<p><b>Actions de sauvegarde du trafic :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Émettre les télex d'information préparés</li> <li>• Demander aux correspondants trafic des commutateurs arrivée et départ de faire bloquer manuellement la (ou les) jonction(s) défectueuse(s)</li> <li>• Surveiller la disparition de l'inefficacité</li> </ul>	
<p><b>Actions de retour à la configuration initiale :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Envoyer aux services concernés les télex d'information de retour à la situation nor</li> <li>• Demander aux CPE concernés de corriger la (ou les) jonction(s) défectueuse(s)</li> <li>• Remettre à jour le serveur vocal</li> </ul>	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px 10px; display: inline-block;"><b>FERMER</b></div>	

Figure 6.9 — Planification des procédures d'action.

Les indications fournies relèvent de la tâche prescrite et il appartient à l'opérateur, unique décideur responsable, de valider les propositions de SACRÉ et de les mettre, ou non, en œuvre. Néanmoins, les indications procurées par SACRÉ constituent une aide précieuse à l'activité de l'opérateur et ce, pour deux raisons essentielles, d'une part, le climat de tension dans lequel s'opère l'activité de traitement d'incident n'est pas toujours propice à une planification réfléchie des procédures d'action et, d'autre part, les informations présentées par SACRÉ émergent d'une expertise basée sur des faits réels bruts.

## 2.3 Discussion

L'évaluation expérimentale de SACRÉ sur les deux exemples précédents a montré une bonne adéquation de SACRÉ aux besoins de l'opérateur. Si l'on élargit le constat à l'ensemble des incidents testés, SACRÉ a toujours été capable d'élaborer, très rapidement, une solution en accord avec les objectifs visés. L'ordre des similarités a toujours été confirmé par le traitement effectif des incidents. Les causes présentées à l'opérateur comme les plus prévisibles se sont toujours avérées exactes. Nous vérifions en cela l'objectivité et la cohérence des mécanismes de RàPC mis en œuvre par SACRÉ. Outre un diagnostic, SACRÉ précise, et justifie par l'exemple, les actions à engager et les moyens à mettre en œuvre pour, d'une part, pallier les conséquences de l'incident sur le trafic et, d'autre part, assurer le retour à la configuration initiale du réseau. Cette efficacité de SACRÉ est directement liée à la prise en compte, d'une part, du **point de vue** de l'opérateur lors de la construction de l'arbre d'indexation de la base de cas et, d'autre part, du **contexte** de l'incident à traiter lors de l'évaluation de similarité.

Les cas de la base couvrent correctement la gamme des incidents envisageables. Cependant, l'apparition de situations nouvelles imprévisibles diminuerait inévitablement les performances du système. De telles situations doivent donc faire l'objet d'une attention toute particulière, afin de minimiser ce risque. La base de cas est "vivante". Elle doit être enrichie continuellement de façon à élargir le champ de compétence de SACRÉ. L'objectif de cette activité d'apprentissage, qui ne doit pas être négligée, est de tendre vers une couverture, la plus exhaustive possible, des modes de fonctionnement anormaux du réseau. Par exemple, une meilleure précision de la base de cas permettra d'affiner les causes à l'origine du dysfonctionnement ou de la panne d'un commutateur regroupées actuellement sous l'appellation : "panne d'organe". La représentation déclarative en une entité unique des incidents favorise l'enrichissement incrémental de la base de cas. En effet, il est beaucoup plus facile pour un opérateur de décrire et de valider des exemples d'incident, que de formaliser des processus de prise de décision. Nous confirmons à ce stade l'intérêt d'une modélisation contextualisée selon le point de vue des connaissances.

L'évaluation expérimentale a également permis de contrôler la consistance des connaissances représentées dans la base de cas. Elles permettent à SACRÉ, dans un premier temps, de trouver rapidement la cause de la perturbation décrite et, dans un second temps, de proposer à l'opérateur une solution compatible.

La précision et la qualité des résultats obtenus à l'issue des tests d'évaluation sont donc tout à fait satisfaisantes. Le suivi d'une méthodologie rigoureuse, fondée sur la modélisation et la validation préalable de l'expertise du domaine, ne peut qu'abonder dans le bon sens lors de l'évaluation du système final. L'existence d'un modèle conceptuel de l'expertise constitue un avantage indéniable pour les opérations de maintenance ultérieures tant au niveau du coût que de la qualité de ces opérations. En conclusion, SACRÉ illustre la faisabilité et l'efficacité d'une assistance à la supervision de procédés automatisés complexes fondée sur la capitalisation et la réutilisation d'incidents similaires traités par le passé.

## 3 Intégration de SACRÉ à l'environnement de supervision

À la validation hors exploitation de SACRÉ doit succéder son intégration au site de supervision. Dans cette seconde partie du chapitre, nous nous intéressons aux aspects liés à cette intégration afin de mieux situer la place, le rôle et l'impact de SACRÉ dans

l'environnement de supervision. En premier lieu, nous présentons la nouvelle organisation homme-machine de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France engendrée par l'introduction de SACRÉ. Ensuite, nous décrivons les interactions possibles, à chaque étape du traitement d'un incident de trafic, entre les deux décideurs que sont l'opérateur humain et SACRÉ. Cette démarche n'a pas encore été faite sur le terrain et sa description est faite à titre prospectif.

### 3.1 Organisation de la supervision du trafic téléphonique

Avant d'effectuer une étude approfondie des interactions entre l'opérateur et SACRÉ, il est nécessaire de resituer le contexte de la supervision du trafic téléphonique eu égard à l'introduction du système SACRÉ. La description de la nouvelle organisation de l'environnement humain et matériel de supervision s'appuie sur les spécifications du **modèle d'organisation CommonKADS** [De Hoog *et al.* 93].

Le principal objectif du modèle d'organisation *CommonKADS* est d'identifier et d'agencer les composants de l'organisation de façon pertinente pour la résolution de problèmes. De Hoog *et al.* dénombrent cinq fonctions au modèle d'organisation :

1. Décrire l'organisation du domaine après l'introduction du système d'assistance.
2. Fournir des informations sur les capacités organisationnelles de chaque acteur.
3. Identifier les domaines de compétence du système d'assistance.
4. Évaluer l'impact du système d'aide sur l'organisation.
5. Valider la répartition des tâches entre les agents.

L'organisation du domaine est décrite en termes de problèmes et de descripteurs organisationnels. La figure 6.10 illustre ces composants organisationnels et les relations qui les unissent. Elle décrit le premier niveau de l'organisation relative à la mise en place du principe de réutilisation de l'expérience pour le traitement des incidents de trafic. Le modèle demande à être détaillé par des niveaux inférieurs. Néanmoins, il permet de prédire ce que sera l'organisation de l'activité de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France après l'installation de SACRÉ. Une analyse des couplages entre les constituants du modèle fournit des réponses à de nombreuses questions matérielles et fonctionnelles, relatives à l'organisation du travail, telles que :

- "quelles sont les tâches réalisées par le système d'assistance ?" ;
- "quelles sont les personnes impliquées dans l'organisation ?" ;
- "quel est le flux des informations nécessaires au traitement d'un incident de trafic ?".

Nous donnons dans la suite du paragraphe une définition des composants organisationnels accompagnée de leur spécialisation au domaine de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.

Le **contexte organisationnel** se réfère aux facteurs de l'environnement dans lequel l'organisation s'opère. Il peut influencer l'impact du système d'assistance sur l'organisation. Dans le contexte de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France, les principaux facteurs sont le maintien de la qualité des services et la maîtrise des coûts d'exploitation.

Les **problèmes et besoins** concernent ceux que le système d'assistance est susceptible de résoudre ou de satisfaire.

Un problème ou un besoin peut être sélectionné dans la liste des problèmes ou des besoins organisationnels pour constituer le **problème courant**, à partir duquel le but

du modèle d'organisation sera dérivé. Pour atteindre ce but organisationnel, un ou plusieurs scénarios seront développés par le modèle. Parmi les problèmes et les besoins détectés pour satisfaire aux objectifs d'organisation, nous pouvons citer : assurer le bon écoulement du trafic, améliorer les procédures de traitement des incidents, augmenter la performance des circuits de communication internes ou encore parfaire l'information et sa diffusion à la clientèle. Dans notre cas, le problème courant retenu concerne la garantie d'un bon écoulement du trafic.

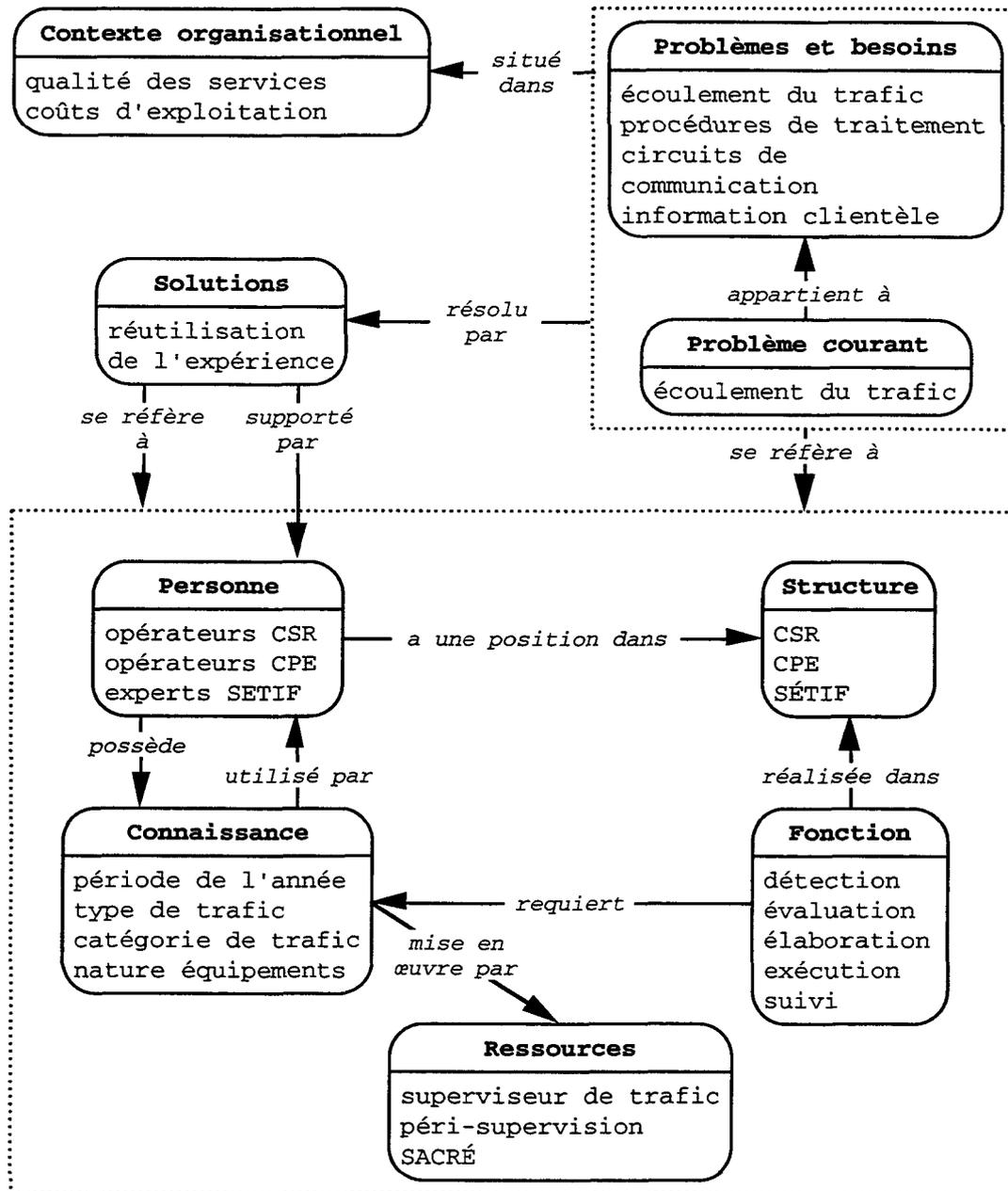


Figure 6.10 — *Modèle d'organisation de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.*

Les **solutions** correspondent aux scénarios possibles pour résoudre le problème courant ou satisfaire le besoin courant. Les cinq derniers composants organisationnels du modèle explicitent le scénario de la réutilisation de l'expérience. Nous les présentons maintenant.

Le descripteur organisationnel **fonction** adresse les fonctions caractéristiques dans l'organisation particulière associée au problème courant. Ces fonctions sont la détection

d'un incident, l'évaluation de la situation anormale, l'élaboration (par réutilisation de l'expérience) du diagnostic et d'un plan procédural, l'exécution des procédures palliatives et le suivi du retour au mode de fonctionnement normal et à la configuration nominale du réseau.

Le composant **structure** est relatif à la "topologie" de l'organisation. Il exprime la division de l'organisation en unités fonctionnelles ou opérationnelles prenant part à la résolution du problème courant. Plusieurs unités participent au traitement d'un incident de trafic en Île de France : le CSR de Paris-Montsouris, les CPE, la cellule Supervision de l'Écoulement du Trafic en Île de France (SÉTIF) et, le cas échéant, d'autres sites de supervision comme le CSR de Blagnac.

Le descripteur **personne** réfère les opérateurs et leurs rôles dans l'organisation. Deux principaux types de personnes interviennent dans le traitement d'un incident : les opérateurs du CSR de Paris-Montsouris chargés de prendre les décisions, d'en assurer la planification et le suivi, d'une part, et les opérateurs des CPE responsables de l'exécution des actions de maintenance préventive, palliative et corrective, d'autre part.

Le descripteur **connaissance** concerne les connaissances générales susceptibles d'influencer la définition du problème courant ou la faisabilité de ses solutions. Parmi ces connaissances, nous trouvons : la période de l'année, le type et la catégorie de trafic touchés et la nature des équipements affectés.

Enfin, les **ressources** renvoient aux moyens, matériels ou logiciels, nécessaires à la résolution du problème courant. Les outils, essentiellement informatiques, utilisés par le personnel sont nombreux, citons, par exemple : le superviseur de trafic, les outils de péri-supervision et, donc, SACRÉ pour la réutilisation de l'expérience.

### 3.2 Étude des interactions entre l'opérateur et SACRÉ

L'introduction d'un système d'assistance à la résolution de problèmes dans la fonction de supervision risque de perturber l'opérateur humain. Une étude préalable des interactions homme-machine possibles s'avère nécessaire pour anticiper ce problème et faire en sorte que les opérateurs intègrent correctement le système. L'étude doit permettre d'analyser les échanges possibles d'informations, à chaque étape du traitement d'un incident de trafic, entre les deux décideurs que sont l'opérateur humain et le système d'assistance. Elle doit, de plus, évaluer les possibilités d'intervention de l'opérateur dans le raisonnement du système et, cela, à chacune de ses étapes. L'étude de la cohabitation des deux acteurs permet d'évaluer leurs ressources et leurs limites respectives [Caulier et Houriez 96a].

À chacune des principales étapes de la démarche de résolution de problèmes de l'opérateur et du système SACRÉ, les informations pouvant être présentées à l'opérateur et les requêtes éventuelles effectuées par l'opérateur ont été identifiées et sont présentées dans la figure 6.11. En pratique, l'activité n'est pas aussi séquentielle que ce que semble suggérer la figure, qui exprime plus une relation de dépendance fonctionnelle entre les principales composantes de l'activité plutôt que temporelle.

L'étape de détection d'un incident de trafic ne nécessite aucune interaction entre l'opérateur et SACRÉ puisqu'elle correspond à une étape d'acquisition de données sur le réseau par le biais du superviseur du trafic.

À l'étape d'évaluation de la situation, le système d'assistance est informé par l'opérateur des caractéristiques symptomatiques et du contexte de l'incident. SACRÉ propose à l'utilisateur les caractéristiques possibles en fonction des équipements

d'acheminement impliqués dans l'incident. À l'issue de cette étape, l'opérateur est conscient de l'ampleur de la situation initiale du problème.

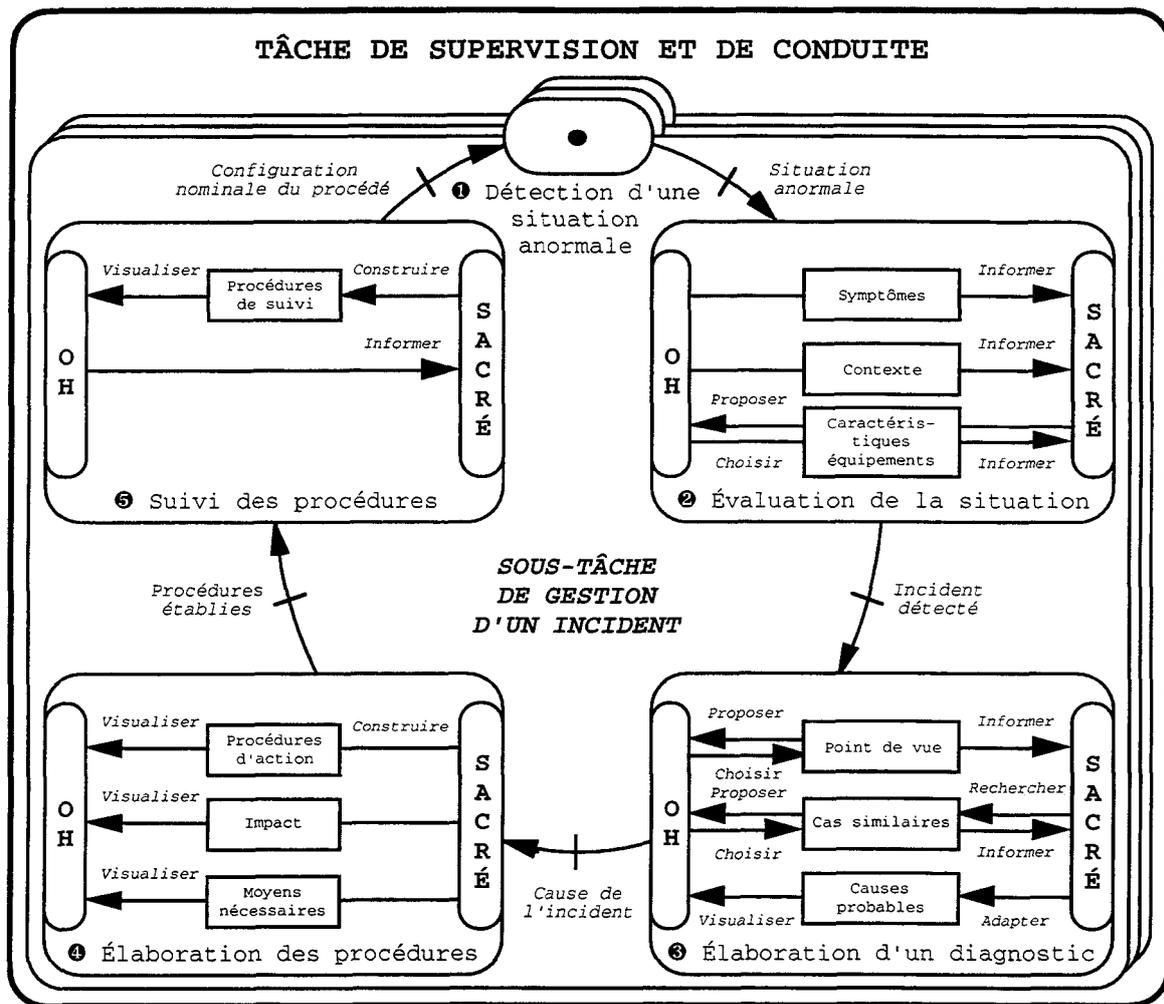


Figure 6.11 — Résolution de problèmes interactive opérateur humain-SACRÉ.

Lors de l'étape d'élaboration d'un diagnostic, l'opérateur, par son choix de l'arbre d'indexation dans la base d'index, impose à SACRÉ son point de vue sur le traitement de l'incident. À partir de la description de l'incident courant, SACRÉ présente à l'opérateur la liste des cas d'incident les plus similaires. L'opérateur peut alors demander au système d'adapter les cas remémorés aux caractéristiques de l'incident cible. En réponse, SACRÉ affiche la liste des causes potentielles dans l'ordre décroissant de leur probabilité.

Au terme de ces premières étapes, l'opérateur, assisté de SACRÉ, a de fortes présomptions sur la cause à l'origine de l'incident qu'il se doit d'évaluer. Il en déduit les contraintes de la compensation de ses effets sur le trafic.

Dans l'étape d'élaboration des procédures, SACRÉ propose à l'opérateur les procédures d'action à mettre en œuvre selon l'incident à traiter. Le système informe également l'opérateur de l'impact de ces procédures sur la qualité des services. Ces informations permettent à l'opérateur de renseigner la clientèle sur la portée de l'incident et le délai prévisible de rétablissement des services. L'opérateur peut également s'assurer, pour la durée estimée de l'incident, de la disponibilité des moyens indispensables à l'application de ses décisions.

Les procédures d'action sont exclusivement planifiées et contrôlées par l'opérateur de supervision alors que leur exécution proprement dite, en termes d'actions conservatrices et correctrices, est réalisée par d'autres opérateurs dans les CPE. En effet, l'organisation socio-technique actuelle du CSR de Paris-Montsouris n'autorise pas les téléactions sur les équipements de télécommunications. En final, et pour enrichir son assistance, SACRÉ propose à l'utilisateur des procédures d'action de retour à la configuration initiale du réseau, dès que le service téléphonique est restauré.

Nous venons de voir les interactions possibles entre l'opérateur et SACRÉ à chacune des étapes du traitement d'un incident de trafic. Cette étude tend à inscrire le système SACRÉ dans le cadre de la coopération homme-machine verticale active défini par Gandibleux [95]. Un tel cadre favorise une compréhension réciproque entre le modèle décisionnel interne de l'opérateur et le système d'assistance. En ce sens, SACRÉ permet à l'utilisateur de décrire la situation initiale selon son point de vue et le contexte de l'incident qui seront ensuite pris en compte pour l'élaboration d'une solution. La nature même du raisonnement mis en œuvre par SACRÉ, fondé sur la réutilisation de cas historiques, accroît la confiance de l'utilisateur dans les décisions du système et favorise le consensus. En conséquence, ce principe d'explication par l'exemple ajoute à la sérénité dans l'exécution des actions. SACRÉ joue pleinement son rôle de véritable partenaire de l'opérateur humain lors des situations de fonctionnement anormal du réseau. En contre partie d'une augmentation mineure de sa charge de travail mentale, l'opérateur gagne en efficacité et en auto-confiance.

De cette étude des interactions, il ressort, en finale, une spécification des modalités de communication dans l'environnement d'accueil du système d'assistance. Toutefois, cette étude prospective sur la définition des interactions doit être concrétisée par une analyse de l'activité des opérateurs, sur site ou en simulation, afin de vérifier l'adéquation des informations présentées par SACRÉ avec les informations attendues par les opérateurs et nécessaires à l'exécution de leur tâche de supervision. La finalité de ce travail est, d'une part, de préciser les interfaces homme-machine de SACRÉ et, d'autre part, de contrôler les capacités des opérateurs à utiliser le système comme attendu et, le cas échéant, à définir les programmes de formation qui s'imposent.

## **4 Apports, limites et perspectives**

En guise de synthèse, nous dressons maintenant un bilan des apports et des limites, tant méthodologiques que techniques, du travail effectué. Tout d'abord, nous considérons les principaux apports de la méthodologie de développement de systèmes d'assistance à la supervision fondés sur la capitalisation et la réutilisation de cas d'incident. Cette analyse est faite en regard des résultats de son application au domaine de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Nous exposons ensuite les limites que nous avons rencontrées avant d'envisager quelques perspectives de prolongement du travail [Caulier et Houriez 96b].

### **4.1 Apports méthodologiques et techniques**

Bien que conscients des limites actuelles du travail, nous avons néanmoins montré que la maîtrise du cycle de retour d'expérience constitue un moyen efficace pour apporter une aide aux activités de résolution de problèmes, en particulier dans le domaine de la supervision des procédés automatisés complexes. La réutilisation de solutions éprouvées lors de situations antérieures analogues participe à la régulation de l'activité et soulage la charge de travail des opérateurs. Ce paragraphe fait le point sur les principales contributions de la méthodologie dans ce domaine.

### 4.1.1 Apports méthodologiques

La principale originalité de la méthodologie présentée est de combiner l'Acquisition Structurée des Connaissances (ASC), en termes de spécifications cognitives, et le RàPC, en termes de représentation et de traitement des connaissances de résolution de problèmes. La démarche, par son caractère ascendant depuis l'analyse du domaine d'application jusqu'à la conception du système final, place résolument le futur utilisateur du système au centre des préoccupations. En effet, la prise en compte de l'utilisateur ne semble pas, encore aujourd'hui, une préoccupation dominante des concepteurs. Visser et Trousse [93] remarquent, à ce sujet, qu'il est rarement fait allusion à un utilisateur potentiel : *“Si les systèmes de RàPC s'offrent comme une réelle opportunité pour une théorie de la cognition plus humaine en intelligence artificielle, il est nécessaire de les développer en fonction des besoins réels de la tâche mais aussi de l'opérateur”*. L'expression : “le(s) bon(s) cas au bon moment” ne prend de sens que s'il existe une véritable interdisciplinarité au sein des sciences cognitives.

La phase d'ASC débute par le recueil des données de l'expertise auprès des opérateurs. Celle-ci met à contribution des méthodes de recueil et d'analyse issues de travaux en psychologie cognitive. Le cycle d'ASC est finalisé par le modèle conceptuel de l'expertise. Il repose sur deux principes de base, d'une part, la distinction entre les connaissances propres à l'application et les raisonnements de résolution de problèmes et, d'autre part, la modélisation au “niveau connaissance”. Ces principes améliorent la compréhension et la maîtrise de l'expertise du domaine d'application.

Le modèle conceptuel de l'expertise permet une validation intermédiaire, par l'expert du domaine d'application, des connaissances qui seront représentées au sein du système de résolution de problèmes à partir de cas. Il constitue un guide pour sa conception en répondant aux questions : “qu'est-ce qu'un cas ?”, “quels sont ses descripteurs ?” et “comment sont-ils exploités ?”. Enfin, le modèle conceptuel de l'expertise forme un riche capital de connaissances dont l'intérêt dépasse les spécifications cognitives du futur système.

Pour sa part, le RàPC apporte une réponse concrète et efficace au problème de la maîtrise du cycle de retour d'expérience, si crucial pour les entreprises.

En conclusion, l'approche va dans le sens de l'évolution actuelle des travaux en ingénierie des connaissances. On acquiert, certes pour construire des systèmes de résolution de problèmes, mais avant tout, et de plus en plus, pour capitaliser et valoriser les connaissances d'une entreprise.

### 4.1.2 Apports de l'acquisition structurée des connaissances au raisonnement à partir de cas

Les apports de la phase préliminaire d'ASC à la mise en œuvre du RàPC par le système final portent sur deux aspects principaux [Caulier et Houriez 95b].

Le premier apport concerne la définition du modèle du cas. Le recueil des connaissances du domaine, l'analyse de l'activité des opérateurs et la modélisation de cette expertise permettent d'identifier les descripteurs pertinents pour l'efficacité de l'activité de résolution de problèmes des opérateurs. Dans le domaine de la supervision des procédés, plusieurs facettes du cas d'incident peuvent être recensées. Elles portent essentiellement sur :

- la déclaration de l'incident et de son contexte ;
- le diagnostic, ses hypothèses et sa justification ;

- la planification des actions palliatives et correctives ;
- les impacts de l'incident et les enseignements tirés *a posteriori*.

Le deuxième apport relève de la modélisation cognitive du raisonnement de réutilisation de connaissances mis en œuvre par l'opérateur. Les niveaux tâche et inférence du modèle conceptuel de l'expertise décrivent les aspects statiques et dynamiques du RàPC. La structure d'inférence correspondante précise les connaissances utiles à chacune des étapes de description de la situation courante, de remémoration des cas proches et d'adaptation d'une solution. Les connaissances contenues dans le modèle du RàPC permettent au concepteur du système d'assistance de tenir compte du point de vue de l'opérateur sur la résolution de problèmes et du contexte du problème.

D'un autre côté, la capitalisation des connaissances sous la forme de l'entité unique et structurée qu'est le cas, permet et facilite le recueil et la représentation de l'expertise. Cette forme de représentation des connaissances tend à limiter le phénomène de "goulot d'étranglement" inhérent au travail d'ASC.

#### 4.1.3 Apports de SACRÉ à la supervision

Les principes mis en œuvre par SACRÉ pour l'amélioration de la supervision des procédés automatisés complexes porte sur plusieurs points dont les principaux sont l'efficacité et la sérénité de l'activité, la sûreté de fonctionnement du procédé et, dans le cas d'un procédé prestataire de services comme l'est un réseau, la continuité et la qualité des services offerts aux clients.

Tout d'abord, la réutilisation de l'expérience permet d'anticiper et de prévenir les erreurs par la reconduction des bons choix passés. En effet, les cas d'incident utilisés par le système d'assistance correspondent à des situations réelles et résolues. Cet atout participe à une plus grande fiabilité des décisions entraînant une qualité de service ou de produit accrue. SACRÉ concourt à diminuer la durée et l'ampleur des situations perturbées. Un autre avantage induit par la réutilisation de situations passées concerne la capacité d'explication par l'exemple. Elle entraîne un haut niveau de confiance de l'opérateur dans les solutions proposées par le système et, donc, contribue à sa sérénité dans la prise de décision.

SACRÉ favorise également une certaine "économie cognitive" inhérente au mode de raisonnement qu'il utilise. Les solutions ne sont pas inférées à chaque nouvelle utilisation de SACRÉ, comme c'est le cas pour les Systèmes à Base de Connaissances (SBC) classiques. L'économie cognitive améliore la rapidité de réaction dans des circonstances identiques. Le principe de similarité, même partielle, rend également le système plus robuste face à l'information incomplète ou nouvelle. Une telle information ne conduit pas inévitablement l'utilisation du système à un échec.

Sous un autre angle, ces propriétés contribuent à atténuer les biais de la prise de décision [Amalberti *et al.* 94] :

- **biais de confirmation** : l'opérateur recherche d'abord les résultats qui confirment le bien-fondé de sa décision, plutôt que des informations qui seraient contraire à cette décision ;
- **biais de sélection des informations** : les préférences orientent fortement la sélection d'un noyau restreint de faits ;
- **biais de conformité au groupe** : recherche d'une décision consensuelle.

D'une façon générale, la capitalisation et la réutilisation de connaissances établies par SACRÉ tend vers la maîtrise du cycle de retour d'expérience. L'expérience acquise par la collectivité est pérennisée au sein d'une source commune, pour être ensuite mise à disposition, afin d'aider chacun dans ses activités de résolution de problèmes. L'expérience capitalisée est ainsi valorisée. La mise à disposition de l'expérience collective développe le savoir et le savoir-faire des opérateurs et, par conséquent, améliore leur performance.

L'aide apportée par SACRÉ aux opérateurs de supervision intéresse essentiellement les tâches de diagnostic et de planification. Cependant, d'autres formes d'assistance peuvent apparaître à l'usage. Elles concernent, par exemple [Caulier et Perron-Bouvier 94b] :

- la description des incidents ;
- la classification des incidents ;
- la diffusion des informations ;
- l'analyse statistique des incidents et de leurs impacts ;
- la formation initiale et continue des opérateurs.

Dans le contexte de la supervision du trafic téléphonique, ces aides complémentaires visent à accroître la qualité des services et les niveaux de disponibilité et de crédibilité du réseau, dans un monde où les télécommunications jouent un rôle de plus en plus stratégique.

En conclusion, la contribution des technologies de l'Intelligence Artificielle (IA) à la résolution de problèmes relevant d'une expertise, d'un raisonnement et, plus généralement, d'une modélisation des connaissances est significative. Il nous semble que ce travail concret et d'envergure démontre l'intérêt des méthodes et des techniques de l'IA pour la supervision des procédés automatisés complexes, en particulier pour la conception de systèmes d'assistance performants indispensables aux opérateurs humains.

Dans les domaines où elle est applicable, nous pensons qu'une méthode de résolution de problèmes fondée sur la réutilisation de connaissances épisodiques permet de déboucher sur des systèmes offrant une véritable assistance à leurs utilisateurs. Une telle approche participe à la valorisation de l'expérience, composante majeure de la compétitivité de l'entreprise, et contribue à accroître l'efficacité et la régulation de l'activité collective que constitue la supervision d'un procédé [Vanderhaegen 93]. La forme novatrice d'assistance à la supervision initiée par SACRÉ vient s'ajouter aux recherches sur la reconnaissance de chroniques dans le suivi d'évolutions pour la détection des dysfonctionnements [Dousson 94].

## 4.2 Limites de SACRÉ

L'analyse des limitations de SACRÉ peut s'effectuer à deux niveaux, d'une part, au niveau des connaissances représentées au sein de la base de cas et, d'autre part, au niveau du mode de raisonnement privilégié par SACRÉ.

La question qui se pose au niveau des connaissances concerne le degré de couverture du domaine d'application par les cas archivés. Au-delà des tests d'évaluation, il est difficile de garantir avec certitude l'entière représentativité des connaissances présentes en mémoire, surtout dans un domaine d'application aussi évolutif. Il en résulte que la maintenance et l'enrichissement de la base de cas sont vitaux pour assurer la meilleure adéquation de l'expertise. Toutefois, à la différence d'un système à base de règles de

production, un manque de suivi dans cette maintenance ne se traduirait pas par un risque de fonctionnement aberrant mais par une moindre performance visible lors de l'évaluation de similarité. La maintenance des connaissances demeure une réalité commune à tous les types de SBC. Nous pouvons simplement mentionner, à ce sujet, qu'une connaissance structurée sous la forme de cas sera plus facilement maintenue qu'une connaissance diluée, sous la forme de règles de production, par exemple. Il paraît plus facile pour un expert de statuer sur le caractère obsolète d'un ancien cas ou, à l'opposé, sur la pertinence d'un nouveau cas.

De part les principes utilisés, SACRÉ met à contribution principalement des connaissances que l'on peut qualifier de surface pour ce qui concerne le domaine technique de l'application. Enrichir le mécanisme de raisonnement par l'inférence de connaissances profondes ne pourrait qu'améliorer les performances de SACRÉ. Toutefois, une telle approche mérite à elle seule une solide réflexion sur ses fondements, surtout pour le cas très complexe que constitue le RTC.

Comme pour tout système de type RàPC, SACRÉ se heurte à la difficulté de prendre en compte le temps dans la représentation et la gestion des informations et dans la formalisation du raisonnement. Actuellement, le temps est représenté explicitement par un instant décrivant une date (jj/mm/aa) et une heure (hh:mm). L'instant associé à un événement correspond au moment où il s'est déclenché. Cet aspect temporel constitue l'une de nos principales préoccupations pour l'évolution future de SACRÉ. Nous l'abordons plus longuement par la suite en termes de perspectives.

Au niveau du mode de raisonnement privilégié par SACRÉ, les modalités d'organisation et les procédures de remémoration, qui prennent en compte le point de vue de l'opérateur sur le traitement d'un incident et le contexte de ce dernier, donnent satisfaction. Le fait de proposer à l'opérateur plusieurs diagnostics potentiels, parmi lesquels il a de grandes chances de trouver le bon, atteste d'un souci de ne pas être trop sélectif et de risquer de laisser en marge le bon diagnostic. En effet, la complexité structurelle et fonctionnelle du domaine d'application ne permet pas, actuellement, d'établir, de façon automatique et avec certitude, la cause d'un incident de trafic. L'ambition de SACRÉ est de restreindre le champ d'investigation de la tâche de construction d'un diagnostic, au départ très large, à une liste, la plus fiable et la plus précise possible, de causes probables. De l'aveu même des opérateurs, ce principe constitue une aide très appréciable. La procédure d'adaptation d'une solution remémorée aux caractéristiques de l'incident cible par la méthode du vote pondéré peut, quant à elle, être améliorée. En effet, une telle méthode présente l'inconvénient de s'appuyer exclusivement sur une théorie indépendante de l'expertise du domaine. Elle gagnerait en efficacité à prendre en compte des connaissances d'adaptation issues du domaine, telles que les règles de réacheminement du trafic. Cette amélioration augmenterait la personnalisation de l'aide fournie à l'opérateur. Le développement d'une telle méthode d'adaptation suppose, au préalable, d'acquérir et de formaliser une expertise complexe par nature et induirait des temps d'exécution accrus.

### 4.3 Perspectives

Nous abordons dans cette dernière section les perspectives de recherche et de développement qui s'ouvrent à la lumière des premiers résultats de SACRÉ. Celles-ci s'inscrivent dans trois directions. La première perspective concerne les améliorations techniques à apporter à SACRÉ de façon à en accroître les performances. La seconde aborde le problème d'un fonctionnement en temps réel de SACRÉ. Enfin, la dernière perspective s'intéresse à l'extension de la méthodologie à d'autres domaines d'application.

### 4.3.1 Quelques améliorations de SACRÉ

Plusieurs améliorations peuvent contribuer à accroître les performances de SACRÉ. Elles n'ont pas toutes la même portée et les mêmes coûts. Certaines demandent encore des efforts de recherche. Nous les détaillons dans ce paragraphe.

La première amélioration à apporter au système, qui tient plus de l'organisation que du développement, est l'enrichissement de la base de cas. La base comporte actuellement 106 cas d'incident couvrant les principaux types d'incident présentés au chapitre 3. Bien que certains types d'incident puissent être étoffés par de nouveaux exemples, l'enrichissement doit plutôt porter sur l'élargissement de la représentativité de la base à des classes d'incidents exceptionnels, particulièrement graves, qui n'ont pas été explorées dans le cadre de ce travail.

Dans le même souci d'amélioration de la maquette, une étude plus approfondie des interfaces doit être menée pour, notamment, intégrer des fonctionnalités d'aide à l'utilisation et veiller à une meilleure adéquation avec les connaissances du domaine que possède l'utilisateur.

Concernant l'organisation dynamique de la base de cas, le concept utilisé pour la construction de l'arbre d'indexation est la cause de l'incident. Il correspond au but poursuivi par la stratégie de résolution de problèmes de l'opérateur. Les points de vue d'autres acteurs de la supervision du trafic téléphonique peuvent être envisagés, tels que :

- la durée de l'incident ou son impact sur l'écoulement du trafic, pour l'opérateur chargé de la gestion du trafic en temps différé ;
- le coût économique et social de la perturbation, pour la direction du trafic ;
- la qualité de service ou le délai de rétablissement, pour l'abonné.

Ces différents points de vue, auxquels seront associés des index différents, peuvent ensuite être combinés par des opérations d'intersection ou d'union des sous-ensembles retournés par chaque index.

Comme nous l'avons souligné précédemment, la représentation du temps dans un processus de résolution de problèmes demeure une difficulté mal résolue pour les systèmes, du type de SACRÉ, destinés à gérer des situations dynamiques. Deux niveaux de prise en compte du temps se distinguent. Ils s'adressent, l'un au niveau du modèle des connaissances du domaine pour la représentation du cas, et l'autre au niveau du modèle du raisonnement pour un fonctionnement temps réel. Une meilleure prise en compte de la dimension temporelle par SACRÉ permettrait d'envisager une évolution de son principe vers "l'analyse de tendance". En effet, jusqu'à présent, il s'agissait d'identifier une situation anormale "connue", à partir des informations sur l'incident, et d'exécuter les actions palliatives et correctives appropriées à cette situation. Les cas d'incident sources jouent alors le rôle de modèles d'écoulement anormal des communications. Dans une évolution vers l'analyse de tendance, il s'agirait de rechercher une évolution de situation similaire à une situation connue, pour prédire l'évolution future à partir des évolutions constatées dans les cas semblables. Cette perspective est à rapprocher des travaux de Rougegrez [94] sur l'appariement de séquences d'événements, dans le cadre du système RÉBÉCAS.

### 4.3.2 Vers un comportement temps réel de SACRÉ

Dans l'état actuel du procédé et de l'organisation socio-technique de supervision, les choix méthodologiques et techniques qui ont présidé à la réalisation de SACRÉ se sont

avérés tout à fait justifiés. Cependant, certaines évolutions, à plus ou moins long terme, des données du domaine d'application sont à envisager dès à présent :

- la croissance du nombre d'abonnés au RTC ;
- la modernisation des équipements de commutation et de transmission ;
- la multiplication des services offerts ;
- la possibilité d'actions à distance de reconfiguration du RTC.

Ces évolutions vont dans le sens, d'une part, d'un accroissement de la fréquence, de la diversité et de la complexité des incidents de trafic et, d'autre part, d'une diminution sensible de la constante de temps de la boucle "décision-effet sur le trafic". De telles perspectives, nous ont amenés à nous intéresser à l'introduction de contraintes de temps réel dans le fonctionnement de SACRÉ. Comme en informatique classique, nous définissons un fonctionnement temps réel en référence au temps de réponse du procédé supervisé. L'introduction de contraintes de temps réel dans un SBC opérationnel suppose d'emblée de disposer de fonctionnalités que peu d'outils classiques de développement prennent en compte :

- datation des faits et des données ;
- raisonnement dans le temps et interruption ;
- garantie de temps de réponse ;
- fonctionnement multi tâches.

Ces fonctionnalités se heurtent encore, pour la plupart d'entre elles, à des problèmes difficiles à résoudre. Aussi, la réalisation de SBC temps réel demeure un problème ouvert pour lequel l'évolution des recherches et l'augmentation de la puissance intrinsèque des ordinateurs offrent des perspectives intéressantes. En ce sens, les environnements de développement spécifiques que constituent CHRONOS et G2 [Haton *et al.* 91] nous semble de bonnes références pour creuser dans la voie d'un fonctionnement temps réel de SACRÉ.

### 4.3.3 Extension de la méthodologie à d'autres domaines d'application

La méthodologie présentée dans ce mémoire repose sur la construction d'un modèle conceptuel de l'expertise et sur l'utilisation du RàPC afin de réaliser un système d'assistance à la capitalisation et à la réutilisation de connaissances de supervision.

Le modèle conceptuel de l'expertise, construit au cours de ce travail, dépasse le cadre des spécifications nécessaires à la conception de SACRÉ. Par exemple, le modèle au niveau inférence regroupe l'ensemble des raisonnements relatifs à la supervision du trafic téléphonique. Chaque raisonnement est référencé par une tâche de la hiérarchie de décomposition élaborée au niveau tâche du modèle de l'expertise. Compte tenu des principes adoptés par le modèle de l'expertise *CommonKADS*, selon le degré de profondeur de la tâche dans la hiérarchie, le niveau de généralité de la structure d'inférence qu'elle référence varie. En effet, au plus une structure d'inférence apparaît tardivement dans la hiérarchie de décomposition de tâche qui la contrôle, au plus elle a un caractère spécialisé et au plus ses chances de réutilisation se limitent à un domaine d'application particulier et inversement. En conséquence, et dans les limites de leur niveau de généralité, chaque structure d'inférence construite nous semble pouvoir être réutilisable par divers types d'application à l'intérieur du domaine de tâches que constitue la supervision des procédés automatisés complexes.

Dans un premier temps, nous pouvons envisager une extension de la méthodologie à d'autres sites de supervision en relation avec le RTC, tels que la supervision du trafic téléphonique en temps différé, la supervision des trafics téléphoniques interurbains et

internationaux, la supervision du réseau de signalisation sémaphore ou la supervision des équipements de commutation et de transmission. De tels sites peuvent bénéficier directement des modèles de raisonnement issus de ce travail. Toutefois, une phase d'ASC reste nécessaire pour l'identification de nouvelles structures du cas. Par exemple, le modèle du cas lié à la supervision du trafic téléphonique en temps différé contiendrait, non seulement les descripteurs indispensables aux analyses statistiques des comportements du réseau et des perturbations, mais également des descripteurs relatifs à leurs impacts et aux coûts qu'ils engendrent.

Dans un second temps, la robustesse de la méthodologie peut être testée auprès d'autres familles de "grands réseaux" pour lesquels un besoin d'assistance est indispensable pour des raisons de sûreté de fonctionnement du procédé et de qualité des services rendus. Parmi ces familles de grands réseaux, citons :

- les réseaux de transport ;
- les réseaux de distribution de fluides ou d'énergies [Duribreux et Caulier 93 ; Duribreux *et al.* 93] ;
- les réseaux de communications informatiques.

Dans un cadre plus général, une confrontation de la méthodologie à d'autres domaines de tâches ne peut être qu'enrichissante.

## 5 Conclusion

La première partie du chapitre a exposé les principaux résultats de l'évaluation expérimentale de SACRÉ. Pour montrer et évaluer les performances de SACRÉ, deux exemples de traitement d'incident ont été présentés. Ils sont représentatifs de situations réelles de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Le premier exemple a permis de montrer la capacité de SACRÉ à diagnostiquer la panne d'un équipement de commutation suite à la dégradation de plusieurs faisceaux. Le second exemple a illustré le dysfonctionnement d'un faisceau direct de transmission. La confrontation des résultats procurés par SACRÉ à ceux établis par l'opérateur de supervision montre une grande cohérence. Ces bons résultats traduisent la précision des deux étapes du processus de remémoration : l'organisation hiérarchique de la base de cas et l'évaluation de similarité. Les modalités de ces deux étapes ont été affinées avec l'aide de l'opérateur, dont elles partagent le point de vue sur l'élaboration d'un diagnostic.

À la cause de l'incident, SACRÉ associe une planification de procédures de traitement palliatives à exécuter de façon à garantir l'acheminement correct des communications, en dépit de l'état dégradé du réseau. Ces procédures ont été modélisées lors de la phase de spécification de SACRÉ. Outre l'exactitude des réponses apportées par SACRÉ, l'évaluation expérimentale a permis de montrer la complétude et la consistance des connaissances représentées dans la base de cas du système. De façon générale, les solutions proposées par SACRÉ ont toujours été données dans un délai compatible avec l'organisation du travail et la constante de temps du réseau.

En résumé, le système SACRÉ témoigne de l'efficacité d'une approche fondée sur la réutilisation de solutions éprouvées lors du traitement de situations anormales de fonctionnement analogues, pour l'aide à la supervision des procédés automatisés complexes, peu ou pas structurés. Ce type d'approche constitue une alternative aux limites des démarches plus classiques de modélisation des procédés. Ces résultats encourageants permettent d'envisager l'exploitation du système dans l'environnement réel de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.

Dans cette perspective, la seconde partie du chapitre a analysé la place, le rôle et l'impact d'un système du type de SACRÉ sur l'organisation socio-technique de la supervision. Elle a décrit, d'une part, un modèle de l'organisation et, d'autre part, les résultats d'une étude prospective sur les interactions entre l'opérateur de supervision et le système SACRÉ. Ces deux points sont destinés à favoriser le succès de l'intégration du système au CSR de Paris-Montsouris et conduisent à classer SACRÉ dans un mode de coopération homme-machine verticale active apportant en cela des ouvertures sur le problème de l'explication du raisonnement et de ses conclusions.

La dernière partie du chapitre a dressé un bilan, tant sur les aspects méthodologiques que techniques, du travail effectué. Les principaux apports de la méthodologie et de SACRÉ pour l'aide à la supervision des procédés automatisés complexes ont d'abord été présentés. Les tests d'évaluation ont débouché sur une première validation de SACRÉ. La validation a montré la bonne adéquation de SACRÉ aux attentes des opérateurs et a nourri quelques réflexions sur les aspects méthodologiques et techniques du travail. À partir des résultats de l'évaluation, plusieurs pistes d'évolution ont été avancées. Elles s'inscrivent selon trois directions. Les deux premières sont techniques et tentent de lever les limites constatées, la dernière est plus fondamentale. La première perspective relate plusieurs points destinés à améliorer les performances de SACRÉ. Outre l'amélioration de la représentativité de la base de cas et l'évaluation ergonomique des interfaces, la possibilité d'une utilisation multi points de vue de SACRÉ a été abordée. À plus long terme, le développement prévisible du contexte de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France, nous a amenés à soulever le problème d'une évolution de SACRÉ vers un comportement temps réel. Enfin, la dernière perspective envisage la réutilisation des modèles de raisonnement à d'autres contextes de supervision et l'application de la méthodologie à d'autres domaines de tâches.

Finalement, notre contribution au domaine de l'assistance à la supervision des procédés automatisés complexes se solde par des apports théoriques et pratiques significatifs et ouvre des voies de réflexion à partir desquelles des prolongements peuvent être envisagés.

---

# Conclusion générale

## Bilan et apports du travail

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire concerne l'assistance à l'opérateur de supervision des procédés automatisés complexes. L'objectif de ce travail est de contribuer à améliorer la spécification de la tâche de supervision pour en dégager les modalités d'une aide originale et efficace à l'opérateur chargé de la reprise des modes de fonctionnement anormaux. Cette contribution a porté sur la définition et l'application d'une méthodologie interdisciplinaire de développement de systèmes d'assistance fondée sur la capitalisation et la réutilisation de l'expérience. Le volet applicatif du travail s'appuie sur l'analyse de l'expertise de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France menée au Centre de Supervision du Réseau (CSR) de Paris-Montsouris. Il se concrétise par la conception et la réalisation de la maquette SACRÉ, un Système d'Assistance à la Capitalisation et à la Réutilisation de cas d'incident résolu par le passé mettant en œuvre les mécanismes du Raisonnement à Partir de Cas (RàPC). Ce travail se veut prospectif et, en ce sens, les solutions avancées s'étendent au-delà du domaine d'application particulier.

Dans un premier temps, nous avons caractérisé le problème de la gestion des procédés automatisés complexes et, plus spécifiquement, celui de la conception du système de supervision. Au niveau hiérarchique le plus élevé de la structure de contrôle/commande, l'existence de dysfonctionnements imprévisibles ou imprévus et l'éventualité de pannes d'équipement nécessitent le recours aux savoirs et savoir-faire de l'opérateur humain. Ces situations anormales sont le siège de méthodes d'évaluation, de diagnostic, d'élaboration et d'exécution de procédures d'action. Toutefois, les exigences cognitives, psychologiques et physiologiques de ces tâches de résolution de problèmes variées et complexes font ressortir la nécessité d'une assistance informatique auprès des opérateurs de supervision. Une telle assistance doit répondre efficacement aux besoins informationnels de l'opérateur pour améliorer la qualité, la rapidité, la fiabilité et la sérénité de sa prise de décision. Le développement d'un tel système d'assistance relève clairement d'une méthodologie interdisciplinaire et centrée sur le futur utilisateur.

Une étude approfondie des stratégies de résolution de problèmes, sous l'angle de la psychologie cognitive, a été réalisée. Cette étude s'est plus particulièrement penchée sur la réutilisation de connaissances épisodiques. Elle a ensuite été menée dans le domaine de l'intelligence artificielle notamment pour canaliser les choix relatifs aux formalismes de représentation des connaissances et de description des modes de raisonnement. Ce travail a débouché sur la mise en œuvre d'un formalisme à base d'objets structurés, pour la représentation des unités d'expérience que constituent les cas d'incident, et des mécanismes du RàPC, pour transposer le raisonnement de résolution de problèmes

privilegié par les opérateurs de supervision. Cette double approche de la résolution de problèmes était motivée par le souci de faire collaborer au mieux les représentations et les traitements cognitifs utilisés par l'opérateur humain avec les formalismes "artificiels" destinés à les implémenter.

Les enseignements tirés de ces deux premiers chapitres ont servi de fondements à la méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances. Avant d'en exposer les modalités, le troisième chapitre a présenté le domaine d'application relatif à la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Une première partie décrit les principaux aspects du procédé automatisé complexe que constitue le réseau téléphonique commuté et les niveaux de sa gestion. La seconde partie du chapitre présente l'environnement humain et matériel du CSR de Paris-Montsouris et caractérise les composantes de l'activité de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Parmi celles-ci, émerge une activité efficace et privilégiée par les opérateurs d'évocation de solutions antérieures. Toutefois, le désir de généraliser son utilisation se heurte à plusieurs limites intra et extra-individuelles que tente de repousser la méthodologie objet de ce mémoire.

Cette méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances est détaillée dans le chapitre 4. Elle articule deux aspects : un aspect acquisition structurée des connaissances de supervision et un aspect représentation de ces connaissances au sein d'un système d'assistance.

L'acquisition structurée des connaissances s'inscrit dans un cycle itératif dont la principale activité est la modélisation des connaissances. Celle-ci s'appuie sur les propriétés d'une modélisation "à la *CommonKADS*" facilitée par l'utilisation de l'outil *KADS-Tool*. Elle repose sur la caractérisation de trois types de connaissance que nous considérons nécessaires pour la résolution de problèmes : les tâches, les méthodes et les entités du domaine d'application.

Les spécifications procurées par le modèle conceptuel de l'expertise guident les choix effectués lors de la conception et de la réalisation du système d'assistance à la supervision fondé, en l'occurrence, sur la réutilisation de cas d'incident résolus par le passé. Cette orientation du système d'aide vise la maîtrise du retour d'expérience ou, en d'autres termes, la préservation et la valorisation rationnelles de l'expérience générée par l'activité des opérateurs de supervision. La méthodologie proposée, qui pour ses aspects innovants couple l'acquisition structurée des connaissances et le RàPC, constitue un cadre efficace pour le développement de systèmes de résolution de problèmes à partir de cas offrant une véritable assistance à leurs utilisateurs. Elle comble en cela une carence importante constatée lors de l'étude bibliographique sur les méthodologies de conception de systèmes de RàPC.

Le cinquième chapitre est consacré à l'application de la méthodologie. Le modèle conceptuel de l'expertise de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France révèle, qu'en cas d'incident, la recherche d'informations est décisive dans l'activité de résolution des opérateurs. Les informations recueillies sont à l'origine du diagnostic et contribuent à l'élaboration des procédures d'action palliatives des effets de l'incident sur le trafic. L'activité de recherche d'informations repose, en premier lieu, sur le raisonnement par analogie. L'opérateur transfère des connaissances épisodiques attachées à un incident similaire connu à la situation courante. Cette méthode de résolution de problèmes est mise en œuvre par le système *SACRÉ* à l'aide des mécanismes du RàPC. *SACRÉ* est composé de procédures de description, d'organisation et d'exploitation d'une base de cas d'incident réels et résolus accessibles aux utilisateurs par le biais d'interfaces graphiques de communication. Les modalités de ces procédures sont décrites dans la dernière partie du chapitre. La base de cas d'incident exploitée par *SACRÉ* comporte

actuellement 106 cas d'incident caractéristiques d'un large éventail de situations anormales de supervision du trafic téléphonique de l'Île de France.

Le dernier chapitre s'intéresse à l'évaluation, à l'intégration et à l'extension de SACRÉ. Deux perturbations typiques ont permis de décrire les performances de SACRÉ. La première concerne un problème de commutation à la suite de l'arrêt DUPLEX d'un commutateur de transit. La seconde perturbation est relative à un incident de transmission révélé par l'inefficacité persistante d'un faisceau de premier choix. Les résultats de leur traitement par SACRÉ sont détaillés et commentés. Ils montrent le bien-fondé de la méthodologie suivie pour la spécification et la conception du système d'assistance. La deuxième partie du chapitre s'intéresse à l'intégration de SACRÉ dans l'environnement socio-technique de supervision. Pour cela, elle aborde, d'une part, le problème de l'organisation des agents dans l'environnement et, d'autre part, les différentes interactions qui s'établissent entre l'opérateur de supervision et le système d'assistance lors du traitement d'un incident. Enfin, la dernière partie dresse un bilan des apports et des limites et présente plusieurs perspectives à ce travail, tant sur le plan méthodologique que technique.

Au-delà des prolongements expérimentaux, et pour clore ce mémoire, nous présentons maintenant les perspectives de recherche, plus fondamentales et à plus long terme, qui émergent de ce travail.

## Perspectives de recherche

Au terme de ce travail, trois axes de recherche particulièrement intéressants sont proposés à l'exploration.

Dans une première direction, il semble intéressant d'approfondir la façon dont le RàPC peut être combiné à d'autres formalismes de représentation des connaissances et à d'autres modes de raisonnement pour accroître l'efficacité et les performances du système global. En effet, bien qu'adaptées à des situations différentes les approches à base de modèles et heuristiques sont bien plus complémentaires qu'antagonistes [Féret et Glasgow 93 ; Koton 93]. Leur combinaison permettrait, d'une part, d'enrichir et d'augmenter le domaine de compétence du modèle de résolution de problèmes et, d'autre part, d'intégrer celui-ci au sein d'un système d'assistance hybride. La perspective de conception d'un tel système passe par une étape de modélisation attentive des stratégies d'activation des modes de raisonnement. Cette perspective constitue certainement l'une des voies les plus novatrices en relation avec le développement des sciences cognitives.

Un autre axe de recherche concerne la définition d'une bibliothèque de modèles "génériques" de résolution de problèmes relatifs à la supervision des procédés automatisés complexes. En effet, de par les principes d'organisation des connaissances adoptés par le modèle conceptuel de l'expertise et dans les limites de leur niveau de généralité, les modèles de résolution de problèmes obtenus au cours de ce travail peuvent constituer les premiers éléments de cette bibliothèque. Ils pourraient ensuite être utilement adaptés à d'autres domaines de supervision. Toujours en relation avec l'acquisition structurée des connaissances et de façon à améliorer la méthodologie de développement de systèmes de RàPC, une réflexion sur les méthodes de recueil et les formalismes de modélisation des connaissances nous paraît également devoir être menée pour évoluer dans le sens du "*case-based knowledge acquisition*".

Enfin, une dernière voie dans laquelle nous souhaitons nous engager à l'avenir concerne l'approche collective et coopérative de la résolution de problèmes. En effet,

dans le cadre de la supervision de procédés automatisés complexes et/ou de grande taille, la résolution de problèmes implique, non seulement plusieurs opérateurs de supervision, mais également des acteurs aux profils et intérêts différents, tels que les gestionnaires, les commerciaux, les techniciens de maintenance et les clients. Dans cette gestion sociale des problèmes, un des aspects de la problématique concerne, d'une part, la prise en compte du point de vue de chaque acteur sur le monde réel observable et du contexte de la résolution de problèmes et, d'autre part, la recherche de procédures de transposition explicatives d'un point de vue à un autre. À terme, l'objectif est de définir un système de représentation et de traitement des connaissances compatible avec les sensibilités distinctes de ses utilisateurs et d'abonder ainsi dans le sens d'une résolution personnalisée, coopérative et homogène des problèmes. Cette voie de recherche ambitieuse, prometteuse et fédératrice de plusieurs disciplines des sciences cognitives reste à défricher, néanmoins les principes mis en œuvre par le RàPC semblent faire figure de phares.

## Références bibliographiques

À la fin de chaque référence, figure le(s) numéro(s) de page où cet item est cité dans le mémoire.

- [Aamodt et Plaza 94] A. Aamodt and E. Plaza,  
Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations and system approaches. *AI Communications*, 7 (1), pp. 39-59, March, 1994. (page 117)
- [Albert 93] P. Albert,  
KADS-Tool : un atelier pour la méthode *CommonKADS*. *Génie Logiciel et Systèmes experts*, 31, pp. 42-50, Juin 1993. (pages 111 et 115)
- [Allen 81] J.F. Allen,  
An interval-based representation of temporal knowledge. *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 221-226, Vancouver, British Columbia, Canada, 1981. (page 61)
- [Amalberti et al. 94] R. Amalberti, M.-O. Bès et J.-M. Hoc,  
*Modéliser le diagnostic et la prise de décision en contrôle de processus pour aider l'opérateur*, Séminaire PERCOTEC, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 14 Janvier 1994. (page 176)
- [Arpège 92] J. Couturier, P. Fauvel, S. Ghernaouti, B. Hélie et H. Ségot,  
*Gestion de réseaux : concepts et outils*, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Éditions Masson, Paris, France, Septembre 1992. (pages 21 et 79)
- [Ashley 89] K.D. Ashley,  
Assessing similarities among cases: a position paper. *Proceedings of the Workshop on Case-Based Reasoning* (K.J. Hammond, Ed.), pp. 72-76, DARPA, Pensacola Beach, Florida, USA, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA, May-June, 1989. (page 122)
- [Ashley et Rissland 87] K.D. Ashley and E.L. Rissland,  
Compare and contrast: a test of expertise. *Proceedings of the 6th National Conference on Artificial Intelligence, American Association for Artificial Intelligence*, pp. 273-278, Seattle, Washington, USA, 1987. (pages 120 et 220)
- [Bacelli 93] F. Bacelli,  
La modélisation des systèmes informatiques. *Le Courrier du CNRS*, 80, pp. 23-25, Février 1993. (page 78)
- [Bainbridge 84] L. Bainbridge,  
Diagnostic skill in process operation. *Proceedings of the International Conference on Occupational Ergonomics*, Toronto, Canada, May, 1984. (page 37)
- [Bartlett 32] F.C. Bartlett,  
*Remembering: a study in experimental and social psychology*, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1932. (page 60)

- [**Benkirane 91**] M. Benkirane,  
*Contribution à la méthodologie d'extraction de connaissances dans le domaine du diagnostic technique*, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 18 Mars 1991. (page 109)
- [**Benzoni et Hausman 93**] L. Benzoni et J. Hausman,  
*Innovation, déréglementation et concurrence dans les télécommunications*, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Éditions Eyrolles, Paris, France, 1993. (page 78)
- [**Bichindaritz 94**] I. Bichindaritz,  
*Apprentissage de concepts dans une mémoire dynamique : raisonnement à partir de cas adaptable à la tâche cognitive*, Thèse de Doctorat, Université de Paris V, Paris, France, 8 Septembre 1994. (page 116)
- [**Bisson 92**] G. Bisson,  
Learning in FOL with a similarity measure. *Proceedings of the 10th National Conference on Artificial Intelligence, American Association for Artificial Intelligence*, pp. 82-87, Cambridge, Massachusetts, USA, 1992. (page 213)
- [**Blanquet et Tagredj 90**] J. Blanquet et M. Tagredj,  
*La supervision du réseau téléphonique : les superviseurs de trafic 1G et 2G*, Note Technique, NT/PAA/TPA/UST/2602, CNET, Paris, France, Mai 1990. (page 72)
- [**Boehm 84**] B.W. Boehm,  
A software development environment for improving productivity. *Computer*, pp. 30-44, June, 1984. (page 99)
- [**Bonnet 92**] M. Bonnet,  
Qualité de service et supervision du réseau français. *Commutation et Transmission*, 2, pp. 15-26, 1992. (page 71)
- [**Bonnet et al. 86**] A. Bonnet, J.-P. Haton et J.-M. Truong-Ngoc,  
*Systèmes experts : vers la maîtrise technique*, Éditions InterÉditions, Paris, France, 1986. (page 108)
- [**Bourelly et Savelli 92**] L. Bourelly et J. Savelli,  
À propos des ambiguïtés du raisonnement analogique. *Technique et Science Informatiques*, 11 (6), pp. 39-65, Éditions Hermès, Paris, France, 1992. (page 107)
- [**Boy 88**] G. Boy,  
*Assistance à l'opérateur : une approche de l'intelligence artificielle*, Éditions Teknéa, Toulouse, France, Octobre 1988. (page 109)
- [**Boy 91**] G. Boy,  
Indexing hypertext documents in context. *Proceedings of the 3rd ACM Conference on Hypertext*, pp. 1-11, San Antonio, Texas, USA, December 15-18, 1991. (page 96)
- [**Branting 88**] K.L. Branting,  
The role of explanation in reasoning from legal precedents. *Proceedings of the Workshop on Case-Based Reasoning* (J.L. Kolodner, Ed.), pp. 94-103, DARPA, Clearwater, Florida, USA, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA, May, 1988. (page 220)
- [**Breuker et al. 87**] J. Breuker, B. Wielinga, M. Van Someren, R. De Hoog, G. Schreiber, P. De Greef, B. Bredeweg, J. Wielemaker, J.-P. Billault, M. Davoodi and S. Hayward,  
*Model driven knowledge acquisition: interpretation models*, ESPRIT Project P1098, Deliverable D1, University of Amsterdam, 1987. (page 111)
- [**Brézillon 93**] P. Brézillon,  
*Using knowledge in its context*, Proceedings of the Workshop of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Chambéry, France, August, 1993. (pages 106 et 107)
- [**Brunet 91**] É. Brunet,  
KADS : méthode d'ingénierie de la connaissance. *Génie Logiciel et Systèmes experts*, 23, pp. 24-34, Juin 1991. (page 110)
- [**Carbonell 83**] J.G. Carbonell,  
Learning by analogy: formulating and generalizing plans from past experience. *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach* (R.S. Michalski, J.G. Carbonell and T.M. Mitchell, Eds), 1, pp. 137-161, Tioga, Palo Alto, California, USA, 1983. (pages 65 et 66)
- [**Carbonell 86**] J.G. Carbonell,  
Derivational analogy: a theory of reconstructive problem solving and expertise acquisition. *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach* (R.S. Michalski, J.G. Carbonell and T.M. Mitchell, Eds), 2, pp. 371-392, Morgan Kaufmann, Los Altos, California, USA, 1986. (page 66)

- [Cassar 94] J.-P. Cassar,  
Génération des relations de redondance analytique pour la surveillance. *Actes des Journées d'Étude Sécurité, Surveillance et Supervision*, GDR Automatique du CNRS, Paris, France, 17-18 Novembre 1994. (page 30)
- [Caulier 93] P. Caulier,  
*Assistance à la construction et à la réutilisation de connaissances dans le cadre des activités de supervision de réseaux de télécommunications*, Premier Rapport d'Activité du Projet N°4, Coopération de Recherche CNET/CNRS-PIR Cognisciences, LAMIH, Marché 941B107, Valenciennes, France, Septembre 1993. (page 99)
- [Caulier et Houriez 94a] P. Caulier and B. Houriez,  
Knowledge acquisition and case-based reasoning: an integrated cognitive approach. *Proceedings of the 13th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control* (L. Norros, Ed.), pp. 188-199, Espoo, Finland, June 22-23, 1994. (pages 38, 98 et 99)
- [Caulier et Houriez 94b] P. Caulier and B. Houriez,  
Knowledge acquisition and case-based reasoning for a case-based incident diagnosis and solving system. *Proceedings of the IFAC Conference on Integrated Systems Engineering* (Pergamon, Ed.), pp. 149-154, Baden-Baden, Germany, September 27-29, 1994. (pages 38, 44 et 116)
- [Caulier et Houriez 95a] P. Caulier and B. Houriez,  
A case-based reasoning assistance system in telecommunication networks management. *Proceedings of the 3rd German Case-Based Reasoning Workshop* (B. Bartsch-Spörl, D. Janetzko and S. Weß, Eds), pp. 97-105, Kaiserslautern, Germany, February 28-March 1, 1995. (pages 119, 120, 121 et 133)
- [Caulier et Houriez 95b] P. Caulier et B. Houriez,  
Apports de la modélisation des connaissances et du raisonnement à partir de cas à la capitalisation et à la réutilisation de connaissances. *Actes des Journées Acquisition, Validation et Apprentissage du PRC-GDR-IA du CNRS*, pp. 331-343, Grenoble, France, 5-7 Avril 1995. (pages 119, 120, 122, 135 et 175)
- [Caulier et Houriez 95c] P. Caulier and B. Houriez,  
Incident case reusing in network traffic management activities. *Proceedings of the 5th European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control* (L. Norros, Ed.), pp. 111-125, Espoo, Finland, August 30-September 1, 1995. (pages 138 et 140)
- [Caulier et Houriez 95d] P. Caulier et B. Houriez,  
Capitalisation et réutilisation du savoir-faire pour la supervision de réseaux. *Actes du Séminaire sur la Gestion et la Supervision de Réseaux*, pp. 23-33, FT/CNET/LAA/EIA/AIA, Lannion, France, 19-20 Octobre 1995. (pages 134 et 142)
- [Caulier et Houriez 95e] P. Caulier and B. Houriez,  
A case-based reasoning approach in network traffic control. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1430-1435, Vancouver, British Columbia, Canada, October 22-25, 1995. (page 144)
- [Caulier et Houriez 95f] P. Caulier and B. Houriez,  
A case-based reasoning support system in network traffic control. *Studies in Informatics and Control Journal*, 4 (4), pp. 403-419, December, 1995. (pages 144 et 159)
- [Caulier et Houriez 96a] P. Caulier and B. Houriez,  
Incident case reusing in telephone traffic control. *Proceedings of the IMACS-IEEE/SMC Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications* (P. Borne, M. Staroswiecki, J.-P. Cassar and S. El Khatibi, Eds), Symposium on Control, Optimization and Supervision, pp. 820-825, Lille, France, July 9-12, 1996. (pages 106 et 172)
- [Caulier et Houriez 96b] P. Caulier et B. Houriez,  
*Assistance à la construction et à la réutilisation de connaissances dans le cadre des activités de supervision de réseaux de télécommunications*, Rapport Final du Projet N°4, Coopération de Recherche CNET/CNRS-PIR Cognisciences, LAMIH, Marché 941B107, Valenciennes, France, Septembre 1996. (pages 131, 150, 152, 159, 174 et 209)
- [Caulier et Perron-Bouvier 94a] P. Caulier et L. Perron-Bouvier,  
Réutilisation d'incidents en supervision de réseaux de télécommunications. *Actes du Troisième Séminaire Français sur le Raisonnement à Partir de Cas*, CRIN/CNRS-INRIA Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France, 25-26 Mai 1994. (pages 90 et 104)

- [Caulier et Perron-Bouvier 94b]** P. Caulier et L. Perron-Bouvier,  
*Assistance à la construction et à la réutilisation de connaissances dans le cadre des activités de supervision de réseaux de télécommunications*, Deuxième Rapport d'Activité du Projet N°4, Coopération de Recherche CNET/CNRS-PIR Cognis sciences, LAMIH, Marché 941B107, Valenciennes, France, Septembre 1994. (pages 88, 127, 131 et 177)
- [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*, 2, pp. 1183-1192, Milan, Italy, August, 1987. (page 109)
- [Charlet et al. 94]** J. Charlet, B. Bachimont, J. Bouaud et P. Zweigenbaum,  
Ontologie et réutilisabilité : expérience et discussion. *Actes des Journées Acquisition, Validation et Apprentissage du PRC-GDR-IA du CNRS*, pp. C1-C14, Strasbourg, France, 21-25 Mars 1994. (page 135)
- [Chemouil et al. 87]** P. Chemouil, P. Gauthier, J. Bernussou, J.-M. Garcia, F. Le Gall, G. Bel et C. Castel,  
Acheminement adaptatif dans les réseaux téléphoniques : méthodes et évaluation de performances. *Annales des Télécommunications*, 42 (1-2), pp. 53-75, 1987. (pages 76, 79 et 81)
- [Chouraqui 86]** E. Chouraqui,  
Le raisonnement analogique : sa problématique, ses applications. *Actes des Journées Nationales sur l'Intelligence Artificielle*, PRC-GRECO IA du CNRS (Cépaduès, Ed.), Aix-Les-Bains, France, 20-21 Novembre 1986. (pages 61 et 63)
- [Chouraqui 92]** E. Chouraqui,  
Raisonnement et intelligence artificielle. *Psychisme et Intelligence Artificielle*, Collection Processus Discursifs - Langage et Cognition, pp. 23-28, Presses Universitaires de Nancy, Nancy, France, Juin 1992. (page 62)
- [Clancey 85]** W.J. Clancey,  
Heuristic classification. *Artificial Intelligence*, 27 (3), pp. 289-350, December, 1985. (pages 111 et 117)
- [Collins 89]** G. Collins,  
Plan adaptation: a transformational approach. *Proceedings of the Workshop on Case-Based Reasoning* (K.J. Hammond, Ed.), pp. 88-89, DARPA, Pensacola Beach, Florida, USA, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA, May-June, 1989. (page 122)
- [Coulon et al. 90]** D. Coulon, J.-F. Boisvieux, L. Bourelly, L. Bruneau, E. Chouraqui, J.-M. David, C.R. Lu, M. Py, J. Savelli, B. Séroussi et C. Vrain,  
Le raisonnement par analogie en intelligence artificielle : formalisation, applications. *Actes des Troisièmes Journées Nationales du PRC-GDR-IA du CNRS*, Chapitre 2, pp. 45-88, Éditions Hermès, Paris, France, Mars 1990. (pages 63, 64, 65 et 106)
- [Crévits 96]** I. Crévits,  
*Répartition dynamique de tâches dans les procédés complexes. Modélisation de la répartition anticipée : application au contrôle du trafic aérien*, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 19 Janvier 1996. (page 42)
- [Curien et Gensollen 89]** N. Curien et M. Gensollen,  
*Prévision de la demande de télécommunications*, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Éditions Eyrolles, Paris, France, 1989. (page 71)
- [DARPA 88]**  
*Proceedings of the Workshop on Case-Based Reasoning* (J.L. Kolodner, Ed.), DARPA, Clearwater, Florida, USA, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA, May, 1988. (page 116)
- [DARPA 89]**  
*Proceedings of the Workshop on Case-Based Reasoning* (K.J. Hammond, Ed.), DARPA, Pensacola Beach, Florida, USA, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA, May-June, 1989. (page 116)
- [DARPA 91]**  
*Proceedings of the Workshop on Case-Based Reasoning* (R. Bareiss, Ed.), DARPA, Washington D.C., USA, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA, May, 1991. (page 116)
- [Dandelot 93]** M. Dandelot,  
*Le secteur des télécommunications en France*, Rapport du Ministère de l'Industrie, des Postes et Télécommunications et du Commerce Extérieur, Paris, France, 15 Juillet 1993. (page 71)
- [De Carfort et al. 87]** F. De Carfort, C. Foulard et J. Calvet,  
*Asservissements linéaires continus*, Éditions Dunod Université, Paris, France, Février 1987. (page 20)

- [De Hoog *et al.* 93] R. De Hoog, B. Benus, C. Metselaar and M. Vogler,  
*The CommonKADS organisation model*, KADS-II Report, KADS-II/TM6/DM6.2b/UVa/041/2.0,  
December, 1993. (page 170)
- [De Keyser 88] V. De Keyser,  
De la contingence à la complexité : l'évolution des idées dans l'étude des processus continus. *Le Travail Humain*, 55 (1), pp. 1-18, Presses Universitaires de France, Paris, France, 1988. (page 130)
- [De Kleer 87] J. De Kleer,  
Qualitative physics. *Encyclopedia of Artificial Intelligence* (D. Stuart and E.Y. Shapiro, Eds), 2, pp. 807-814, J. Wiley and Sons Press, New-York, USA, 1987. (page 61)
- [Delange et Vogin 94] L. Delange et R. Vogin,  
La croissance de sûreté de fonctionnement par le retour d'expérience dans le domaine technique et industriel. *Performances Humaines et Techniques*, 69, pp. 14-20, Mars-Avril 1994. (page 96)
- [Diday *et al.* 82] E. Diday, J. Lemaire, J. Pouget et F. Testu,  
*Éléments d'analyse de données*, Éditions Dunod, Paris, France, 1982. (pages 213, 215, 216 et 217)
- [Dieng 90] R. Dieng,  
*Méthodes et techniques d'acquisition des connaissances*. Actes du Congrès ERGO-IA, pp. 245-271,  
Biarritz, France, 19-21 Septembre 1990. (page 109)
- [Donahue 89] D. Donahue,  
OGRE: generic reasoning from experience. *Proceedings of the Workshop on Case-Based Reasoning*  
(K.J. Hammond, Ed.), pp. 248-252, DARPA, Pensacola Beach, Florida, USA, Morgan Kaufmann,  
San Mateo, California, USA, May-June, 1989. (page 89)
- [Dorolle 69] M. Dorolle,  
*Le raisonnement par analogie*, Presses Universitaires de France, Paris, France, 1969. (page 63)
- [Dousson 94] C. Dousson,  
*Suivi d'évolutions et reconnaissance de chroniques*, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier,  
Toulouse, France, Septembre 1994. (page 177)
- [Dubuisson 90] B. Dubuisson,  
*Diagnostic et reconnaissance des formes*, Éditions Hermès, Paris, France, Septembre 1990. (pages 28,  
30 et 213)
- [Duribreux 95] M. Duribreux,  
*MODESTI : vers une méthodologie interactive de développement de systèmes à base de connaissances*,  
Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 11  
Décembre 1995. (page 100)
- [Duribreux et Caulier 93] M. Duribreux et P. Caulier,  
*Étude de faisabilité d'un système à base de connaissances pour la capitalisation des connaissances  
d'aide à la conduite de réseaux de gaz*, Rapport Final de Contrat GDF/LAMIH, Marché 92C079,  
Valenciennes, France, Septembre 1993. (page 181)
- [Duribreux *et al.* 93] M. Duribreux, P. Caulier, B. Houriez and D. Waroux,  
Elicitation and analysis of expert knowledge on the operation of gas distribution networks.  
*Proceedings of the 12th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual  
Control*, pp. 1.1-1.10, Kassel, Germany, June 22-24, 1993. (page 181)
- [Elstein *et al.* 78] A.S. Elstein, L.S. Shulman and S.A. Sprafka,  
*Medical problem solving*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1978. (pages  
53 et 55)
- [Ermine 93] J.-L. Ermine,  
*Génie logiciel et génie cognitif pour les systèmes à base de connaissances*, Volume 1, Aspects  
Méthodologiques, Éditions Lavoisier, Paris, France, 1993. (page 109)
- [Evans 68] T.G. Evans,  
A program for the solution of a class of geometric analogy intelligence. *Semantic Information  
Processing* (M. Minsky, Ed.), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1968. (page 63)
- [EWCBR 93]  
*Proceedings of the 1st European Workshop on Case-Based Reasoning* (M.M. Richter, S. Weiß, K.-D.  
Althoff and F. Maurer, Eds), Kaiserslautern, Germany, Springer Verlag, Berlin, Germany,  
November, 1993. (page 116)
- [EWCBR 94]  
*Proceedings of the 2nd European Workshop on Case-Based Reasoning*, Chantilly, France, November 7-  
10, 1994. (page 116)

**[EWCBR 96]**

*Proceedings of the 3rd European Workshop on Case-Based Reasoning*, Lausanne, Suisse, November 14-16, 1994. (page 116)

**[Fadier et al. 94]** E. Fadier, F. Keravel, M. Landois et A. Lannoy,

Valorisation du retour d'expérience. *Performances Humaines et Techniques*, 69, pp. 34-37, Mars-Avril 1994. (page 98)

**[Féret et Glasgow 93]** M.P. Féret and J.I. Glasgow,

Hybrid case-based reasoning for the diagnosis of complex devices. *Proceedings of the 11th National Conference on Artificial Intelligence, American Association for Artificial Intelligence*, pp. 168-175, Washington D.C., USA, July 11-15, 1993. (page 185)

**[Findler 79]** N.V. Findler,

Associative Networks. *Representation and Use of Knowledge by Computers* (N.V. Findler, Ed.), Academic Press, New-York, USA, 1979. (page 60)

**[Finin et Klein 87]** T. Finin and D. Klein,

On the requirements of active expert systems. *Actes des 7èmes Journées Internationales sur les Systèmes Experts et leurs Applications*, pp. 1199-1207, Avignon, France, 13-15 Mai 1987. (pages 39 et 40)

**[Fortin et Rousseau 93]** C. Fortin et R. Rousseau,

*Psychologie cognitive : une approche de traitement de l'information*, Éditions Télé-Université, Sainte-Foy, Québec, Canada, Septembre 1993. (page 116)

**[Galloüin 88]** J.-F. Galloüin,

*Transfert de connaissances, systèmes experts : techniques et méthodes*, Éditions Eyrolles, Paris, France, Mai 1988. (pages 109 et 128)

**[Gandibleux 95]** X. Gandibleux,

*Système d'aide à la décision pour la conduite de processus perturbés ; une approche hybride fondée sur l'intelligence artificielle, la programmation linéaire et l'aide multicritère à la décision : application à la mobilisation de réserve tertiaire d'Électricité de France*, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 18 Janvier 1995. (page 174)

**[Gardner 85]** H. Gardner,

*The mind's new science: a history of the cognitive revolution*, Basic Books, New-York, USA, 1985. (pages 14 et 15)

**[Gentner 83]** D. Gentner,

Structure mapping: a theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, pp. 155-170, 1983. (page 214)

**[Gentner et Landers 85]** D. Gentner and R. Landers,

Analogical reminding: a good match is hard to find. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 607-613, Tucson, Arizona, USA, 1985. (page 58)

**[Gheraouti-Hélie et Dufour 95]** S. Gheraouti-Hélie et A. Dufour,

*Réseaux locaux et téléphonie*, Collection Systèmes Distribués, Éditions Masson, Paris, France, Juin 1995. (pages 78 et 81)

**[Gick et Holyoak 83]** M.L. Gick and K.J. Holyoak,

Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, 15, pp. 1-38, 1983. (page 59)

**[Greenstein et Lam 85]** J.S. Greenstein and S.T. Lam,

An experimental study of dialogue-based communication for dynamic human-computer task allocation. *International Journal of Man-Machine Studies*, 23, pp. 605-621, 1985. (page 41)

**[Gruber 93]** T.R. Gruber,

A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5 (2), pp. 199-220, June, 1993. (page 135)

**[Guibert 91]** B. Guibert,

*Cognition et modernisation*, Rapport du Ministère de la Recherche et de la Technologie, Paris, France, Décembre 1991. (page 14)

**[Guida et Mauri 93]** G. Guida and G. Mauri,

Evaluating performance and quality of knowledge-based systems: foundation and methodology. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 5 (2), pp. 204-224, April, 1993. (page 105)

**[Gustafsson et Menezes 94]** M. Gustafsson and W. Menezes,

*An overview of CommonKADS*, KADS-II Report, KADS-II/P3/WP/CP/005/1.0, March, 1994. (page 110)

- [Hart 88] A. Hart,  
*Acquisition du savoir pour les systèmes experts*, Collection Sciences Cognitives, Éditions Masson, Paris, France, Juin 1988. (page 109)
- [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*, Collection Sciences et Technologies de la Connaissance, Éditions InterÉditions, Paris, France, Octobre 1987. (pages 62, 104 et 180)
- [Herrmann-Tellouck *et al.* 89] F. Herrmann-Tellouck, D. Stern et P. Chemouil,  
SUPERMAC : un outil d'évaluation de performances pour la gestion en temps réel des réseaux. *Annales des Télécommunications*, 44 (11-12), pp. 618-626, 1989. (page 87)
- [Hoc 87] J.-M. Hoc,  
*Psychologie cognitive de la planification*, Collection Sciences et Technologies de la Connaissance, Presses Universitaires de Grenoble, Grenoble, France, Septembre 1987. (pages 47, 49, 56 et 128)
- [Hoc 90a] J.-M. Hoc,  
Les activités de diagnostic. *Traité de Psychologie Cognitive* (J.-F. Richard, C. Bonnet et R. Ghiglione, Eds), 2, pp. 158-165, Éditions Dunod, Paris, France, Novembre 1990. (page 53)
- [Hoc 90b] J.-M. Hoc,  
La planification de l'activité. *Traité de Psychologie Cognitive* (J.-F. Richard, C. Bonnet et R. Ghiglione, Eds), 2, pp. 223-230, Éditions Dunod, Paris, France, Novembre 1990. (page 56)
- [Hoc 93] J.-M. Hoc,  
Main features of the human supervision of a long response latency process. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 114-119, Le Touquet, France, October 17-20, 1993. (page 21)
- [Holley 92] A. Holley,  
Le programme Cognosciences du CNRS. *Le Courrier du CNRS*, 79, p. 5, Octobre 1992. (page 14)
- [Hollnagel 95] E. Hollnagel,  
Interface evaluation and cognitive ergonomics. *Proceedings of the 5th European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control* (L. Norros, Ed.), pp. 301-314, Espoo, Finland, August 30-September 1, 1995. (page 145)
- [Hollocou 91] É. Hollocou,  
*Techniques et réseaux de télécommunications*, Éditions Armand Colin, Paris, France, Juin 1991. (page 70)
- [Holyoak 85] K.J. Holyoak,  
The pragmatic of analogy and transfer. *The Psychology of Learning and Motivation* (G.H. Bower, Eds), 19, pp. 59-87, Academic Press, New-York, USA, 1985. (pages 58 et 59)
- [Houriez 94]. B. Houriez,  
*Acquisition de connaissances pour l'aide à la conduite et à la supervision de procédés industriels*, Rapport d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 17 Février 1994. (page 108)
- [ICCBR 95]  
Case-based reasoning research and development. *Proceedings of the 1st International Conference on Case-Based Reasoning* (M. Veloso and A. Aamodt, Eds), Sesimbra, Portugal, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer Verlag, New-York, USA, October 23-26, 1995. (page 116)
- [Johannsen 91] G. Johannsen,  
Integrated automation in complex man-machine systems. *Proceedings of the European Control Conference*, pp. 1013-1021, Grenoble, France, July 1-5, 1991. (page 39)
- [Karbach *et al.* 90] W. Karbach, M. Linster and A. Voß,  
Models, methods, roles and tasks: many labels, one idea?. *Knowledge Acquisition*, 2, pp. 279-299, March, 1990. (page 143)
- [Kaufman 87] A. Kaufman,  
*Nouvelles logiques pour l'intelligence artificielle*, Éditions Hermès, Paris, France, Mai 1987. (page 60)
- [Keane 88] M.T. Keane,  
*Analogical problem-solving*, J. Wiley and Sons Press, New-York, USA, 1988. (page 59)
- [Kelly 55] G.A. Kelly,  
*The psychology of personal constructs*, Norton, New-York, USA, 1955. (page 128)
- [Kolodner 85] J.L. Kolodner,  
*Using experience in clinical problem solving*, Technical Report, GIT-ICS-85/21, School of Information and Computer Science, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, 1985. (page 219)

- [Kolodner 87] J.L. Kolodner,  
Extending problem solver capabilities through case-based reasoning. *Proceedings of the 4th International Workshop on Machine Learning*, pp. 167-178, Irvine, California, USA, June 22-25, 1987. (page 122)
- [Kolodner 88] J.L. Kolodner,  
Extending problem solver capabilities through case-based inference. *Proceedings of the Workshop on Case-Based Reasoning* (J.L. Kolodner, Ed.), pp. 21-31, DARPA, Clearwater, Florida, USA, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA, May, 1988. (page 219)
- [Kolodner 91] J.L. Kolodner,  
Improving human decision making through case-based decision aiding. *AI Magazine*, 12 (2), pp. 52-68, 1991. (page 104)
- [Kolodner 92] J.L. Kolodner,  
An introduction to case-based reasoning. *Artificial Intelligence Review*, 6 (1), pp. 3-34, 1992. (page 116)
- [Kolodner 93] J.L. Kolodner,  
*Case-based reasoning*, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA, 1993. (pages 119 et 123)
- [Kolodner et al. 85] J.L. Kolodner, R.L. Simpson and K. Sycara-Cyranski,  
A process model of case-based reasoning in problem solving. *Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 284-290, Los Angeles, California, USA, 1985. (page 219)
- [Kolski 93] C. Kolski,  
*Ingénierie des interfaces homme-machine*, Éditions Hermès, Paris, France, Août 1993. (page 145)
- [Koton 93] P.A. Koton,  
Combining causal models and case-based reasoning. *Second Generation Expert Systems* (J.-M., David, J.-P. Krivine and R. Simmons, Eds), pp. 69-78, Springer Verlag, New-York, USA, 1993. (page 185)
- [Krivine 92] J.-P. Krivine,  
*L'acquisition des connaissances*, Le Courrier du CNRS, Octobre 1992. (page 105)
- [Krivine et David 91] J.-P. Krivine et J.-M. David,  
*L'acquisition des connaissances vue comme un processus de modélisation : méthodes et outils*. *Intellectica*, 12, pp. 101-137, Novembre 1991. (page 102)
- [Laublet 94] P. Laublet,  
Objets et intelligence artificielle : des langages aux méthodes. *Actes de la Journée Méthodes Objets et Intelligence Artificielle*, 14èmes Journées Internationales d'Avignon, pp. 9-13, Paris, France, Juin 1994. (pages 107 et 110)
- [Laurent 92] J.-P. Laurent,  
Vers une terminologie valide pour le domaine de la validation. *Actes des Journées Francophones de Validation et de Vérification du PRC-GDR-IA du CNRS*, pp. 1-15, Dourdan, France, 15-17 Avril 1992. (page 158)
- [Laurière 82] J.-L. Laurière,  
Représentation et utilisation des connaissances. *Technique et Science Informatiques*, 1 (1), pp. 25-42, 1 (2), pp. 115-144, Éditions Hermès, Paris, France, 1982. (page 60)
- [Lebowitz 82] M. Lebowitz,  
IPP. *Dynamic memory: a theory of reminding and learning in computers and people*, pp. 197-207, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1982. (page 120)
- [Le Roux 94] B. Le Roux,  
*Éléments d'une approche constructive de la modélisation et de la réutilisation en acquisition des connaissances*, Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, Paris, France, 6 Décembre 1994. (pages 61 et 137)
- [Le Roux et Laublet 93] B. Le Roux et P. Laublet,  
Modèles de résolution de problèmes at acquisition des connaissances. *Actes des Journées Acquisition, Validation et Apprentissage du PRC-GDR-IA du CNRS*, Saint Raphaël, France, 29 Mars-2 Avril 1993. (page 103)
- [Libois 94] L.-J. Libois,  
*Les télécommunications : technologies, réseaux et services*, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Éditions Eyrolles, Paris, France, Mars 1994. (pages 75 et 81)

- [Maiman 94] M. Maiman,  
*Télécoms et réseaux*, Collection Manuels Informatiques Masson, Éditions Masson, Paris, France, Février 1994. (page 73)
- [Malvache et al. 94] P. Malvache, C. Eichenbaum et P. Prieur,  
La maîtrise du retour d'expérience avec la méthode REX. *Performances Humaines et Techniques*, 69, pp. 6-13, Mars-Avril 1994. (pages 97 et 98)
- [Manago et al. 93] M. Manago, K. Althoff, É. Auriol, R. Traphöner, S. Weß, N. Conruyt and F. Maurer,  
Induction and reasoning from cases. *Proceedings of the 1st European Workshop on Case-Based Reasoning* (M.M. Richter, S. Weß, K.-D. Althoff and F. Maurer, Eds), pp. 313-318, Kaiserslautern, Germany, Springer Verlag, Berlin, Germany, November, 1993. (page 116)
- [Masini et al. 89] G. Masini, A. Napoli, D. Colnet, D. Léonard et K. Tombre,  
*Les langages à objets*, Éditions InterÉditions, Paris, France, 1989. (page 60)
- [Maurice-Demourieux et al. 93] M. Maurice-Demourieux, B. Lâasri, C. Levallet et S. Pinson,  
Le raisonnement à partir de cas : panorama et modélisation dynamique. *Actes du Congrès INFORSID*, pp. 145-159, Lille, France, 11-14 Mai 1993. (pages 116 et 119)
- [McDermott 82a] D. McDermott,  
Non-monotonic logic II: non-monotonic model theories. *Journal of the ACM*, 29 (1), pp. 34-57, 1982. (page 61)
- [McDermott 82b] J. McDermott,  
R1: a rule-based configurer of computer systems. *Artificial Intelligence*, 19 (1), pp. 39-88, 1982. (page 52)
- [McDermott 88] J. McDermott,  
Preliminary steps toward a taxonomy of problem-solving methods. *Automating Knowledge Acquisition for Expert Systems* (S. Marcus Ed.), pp. 225-255, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 1988. (page 109)
- [McGraw et Herbison-Briggs 89] K.L. McGraw and K. Herbison-Briggs,  
*Knowledge acquisition: principles and guidelines*, Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, New-Jersey, USA, 1989. (page 102)
- [Michalski 83] R.S. Michalski,  
A theory and methodology of inductive learning. *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach* (R.S. Michalski, J.G. Carbonell and T.M. Mitchell, Eds), pp. 83-133, Tioga Publishing Company, Palo Alto, California, USA, 1983. (page 61)
- [Mignot 93] H. Mignot,  
An overview of case-based reasoning. *Proceedings of the 4th International Conference on Human-Machine Interaction and Artificial Intelligence in Aerospace*, pp. 1-10, Toulouse, France, September 28-30, 1993. (page 116)
- [Millot 88] P. Millot,  
*Supervision des procédés automatisés et ergonomie*, Éditions Hermès, Paris, France, Décembre 1988. (pages 19, 34, 35, 40, 41 et 42)
- [Minsky 75] M. Minsky,  
A framework for representing knowledge. *The Psychology of Computer Vision* (P.H. Winston, Ed.), pp. 211-281, McGraw-Hill, New-York, USA, 1975. (page 60)
- [Moore et Newell 74] J. Moore and A. Newell,  
How can MERLIN understand. *Knowledge and Cognition* (L.W. Gregg, Ed.), Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New-Jersey, USA, 1974. (page 57)
- [Musen 89] M.A. Musen,  
Conceptual models of interactive knowledge acquisition tools. *Knowledge Acquisition*, 1 (1), pp. 73-88, March, 1989. (page 110)
- [Napoli 94] A. Napoli,  
Catégorisations, raisonnement par classification et raisonnement à partir de cas. *Actes des Journées Acquisition, Validation et Apprentissage du PRC-GDR-IA du CNRS*, pp. E1-E14, Strasbourg, France, 21-25 Mars 1994. (page 61)
- [Newell 82] A. Newell,  
The knowledge level. *Artificial Intelligence*, 18 (1), pp. 87-127, 1982. (pages 109 et 143)
- [Newell et Simon 72] A. Newell and H.A. Simon,  
*Human problem solving*, Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, New-Jersey, USA, 1972. (page 51)

- [**Nguyen-Xuan 90**] A. Nguyen-Xuan,  
Le raisonnement par analogie. *Traité de Psychologie Cognitive* (J.-F. Richard, C. Bonnet et R. Ghiglione, Eds), 2, pp. 145-157, Éditions Dunod, Paris, France, Novembre 1990. (pages 51 et 57)
- [**Nikiforov 94**] Y. Nikiforov,  
Sequential optimal detection and isolation of faults in systems with random disturbances. *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 1853-1857, Baltimore, Maryland, USA, June 29-July 1, 1994. (page 26)
- [**Nussbaumer 87**] H. Nussbaumer,  
*Informatique industrielle IV : commande numérique, téléinformatique, sécurité, sûreté, fiabilité*, Collection Informatique, Éditions Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse, 1987. (page 22)
- [**O'Leary 93**] D.E. O'Leary,  
Verification and validation of case-based systems. *Expert Systems with Applications*, 6, pp. 57-66, 1993. (page 149)
- [**Perron-Bouvier 93**] L. Perron-Bouvier,  
Une approche en psychologie cognitive de la réutilisation de connaissances. *Actes du Deuxième Séminaire Français sur le Raisonnement à Partir de Cas*, pp. 69-91, LAFORIA, Université de Paris VI, Paris, France, Octobre 1993. (pages 57 et 58)
- [**Pinson 87**] S. Pinson,  
*Méta-modèle et heuristiques de jugement : le système CREDEX, application à l'évaluation du risque crédit entreprise*, Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, Paris, France, 1987. (page 217)
- [**Porter 92**] D. Porter,  
*Overview of the differences between KADS and CommonKADS*, KADS-II Report, KADS-II/T5.1.2/PP/TRMC/002/1.0, November, 1992. (page 110)
- [**Py 94**] M. Py,  
Un modèle conceptuel de raisonnement par analogie. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 8 (1), pp. 63-99, Éditions Hermès, Paris, France, 1994. (pages 63 et 106)
- [**Quillian 68**] M.R. Quillian,  
Semantic memory. *Semantic Information Processing* (M. Minsky, Ed.), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1968. (page 116)
- [**Quinlan 83**] J.R. Quinlan,  
Learning efficient classification procedures and their application to chess end games. *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach* (R.S. Michalski, J.G. Carbonell and T.M. Mitchell, Eds), pp. 463-482, Tioga Publishing Company, Palo Alto, California, USA, 1983. (page 210)
- [**Quinlan 86**] J.R. Quinlan,  
Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1 (1), pp. 81-106, 1986. (page 210)
- [**Rasmussen 80**] J. Rasmussen,  
The human as a system component. *Human Interaction with Computer* (H.T. Smith and T.R.G. Green, Eds), pp. 67-96, London Academic Press, 1980. (page 36)
- [**Rasmussen 83**] J. Rasmussen,  
Skills, rules and knowledge; signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 13 (3), pp. 257-266, May-June, 1983. (page 48)
- [**Rasmussen 86**] J. Rasmussen,  
*Information processing and human-machine interaction, an approach to cognitive engineering*, North-Holland, Amsterdam, Netherlands, 1986. (pages 54 et 55)
- [**Richard 90**] J.-F. Richard,  
*Les activités mentales : comprendre, raisonner, trouver des solutions*, Éditions Armand Colin, Paris, France, 1990. (page 47)
- [**Rieger et Greenstein 82**] C.A. Rieger and J.S. Greenstein,  
The allocation of tasks between the human and computer in automated system. *Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Society*, pp. 204-208, New-York, USA, 1982. (page 41)
- [**Riesbeck et Schank 89**] C. Riesbeck and R. Schank,  
*Inside case-based reasoning*, Lawrence Erlbaum Associates, Evanston, Illinois, USA, 1989. (page 219)

- [**Rougegrez 94**] S. Rougegrez,  
*Prédiction de processus à partir de comportements observés : le système RÉBÉCAS*, Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, Paris, France, 12 Juillet 1994. (page 179)
- [**Rouse 83**] W.B. Rouse,  
Models of human problem solving: detection, diagnosis and compensation for system failures. *Automatica*, pp. 613-625, November, 1983. (page 33)
- [**Sacerdoti 77**] E.D. Sacerdoti,  
*A structure for plans and behavior*, Elsevier, New-York, USA, 1977. (page 50)
- [**Schank 82**] R.C. Schank,  
*Dynamic memory, a theory of reminding and learning in computers and people*, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1982. (pages 59 et 116)
- [**Schank 83**] R.C. Schank,  
The current state of AI: one man's opinion. *AI Magazine*, 4 (1), pp. 1-8, 1983. (page 67)
- [**Schank et Abelson 77**] R.C. Schank and R.P. Abelson,  
*Scripts, plans, goals and understanding*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New-Jersey, USA, 1977. (pages 60 et 116)
- [**Seppala 95**] A. Seppala,  
Human errors as an integrated part of the safety analysis in process control. *Proceedings of the 5th European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control* (L. Norros, Ed.), pp. 29-34, Espoo, Finland, August 30-September 1, 1995. (page 36)
- [**Servin 96**] C. Servin,  
*Télécoms : de la transmission à l'architecture de réseaux*, Collection Systèmes Distribués, Éditions Masson, Paris, France, Février 1996. (pages 22 et 23)
- [**Shannon et Weaver 49**] Shannon and Weaver,  
*The mathematical theory of computation*, Illinois University Press, Illinois, Urbana, USA, 1949. (page 210)
- [**Sheridan 85**] T.B. Sheridan,  
Forty-five years of man-machine system: history and trends. *Proceedings of the 2nd IFAC Conference on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems*, pp. 149-154, Varese, Italy, September, 1985. (page 32)
- [**Simon 93**] P. Simon,  
*Contribution de l'analyse des mouvements oculaires à l'évaluation de la charge de travail mental*, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 3 Décembre 1993. (page 49)
- [**Slade 91**] S. Slade,  
Case-based reasoning: a research paradigm. *AI Magazine*, 12 (1), pp. 42-55, 1991. (pages 91 et 118)
- [**Staroswiecki 94**] M. Staroswiecki,  
La problématique et les approches de la surveillance des systèmes technologiques. *Actes des Journées d'Étude Sûreté, Surveillance et Supervision*, GDR Automatique du CNRS, Paris, France, 17-18 Novembre 1994. (pages 22 et 25)
- [**Steels 90**] L. Steels,  
Components of expertise. *AI Magazine*, 11 (2), pp. 28-49, 1990. (pages 110 et 137)
- [**Steels 91**] L. Steels,  
*COMMET: a computational methodology for knowledge engineering*, ESPRIT Project CONSTRUCT, Deliverable WP/2/3/4, University of Brussels, 1991. (page 110)
- [**Steels 93**] L. Steels,  
Corporate knowledge management. *Proceedings of the International Symposium on the Management of Industrial and Corporate Knowledge*, pp. 9-30, Compiègne, France, October 27-28, 1993. (page 97)
- [**Stylianou et al. 92**] A.C. Stylianou, G.R. Madey and R.D. Smith,  
Selection criteria for expert system shells: a socio-technical framework. *Communications of the ACM*, 35 (10), pp. 30-48, October, 1992. (page 104)
- [**Thagard et al. 90**] P. Thagard, K.J. Holyoak, G. Nelson and D. Gochfeld,  
Analog retrieval by constraint satisfaction. *Artificial Intelligence*, 46 (3), pp. 259-310, December, 1990. (page 213)

- [Titli 79] A. Titli,  
*Analyse et commande des systèmes complexes*, Éditions Cépaduès, Toulouse, France, 1979. (page 31)
- [Tulving 72] E. Tulving,  
Episodic and semantic memory. *Organization of Memory* (E. Tulving and W. Donaldson, Eds), Academic Press, New-York, USA, 1972. (page 57)
- [Tulving et Pearlstone 66] E. Tulving and Z. Pearlstone,  
Availability versus accessibility of information in memory of words. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 5, pp. 381-391, 1966. (page 58)
- [Turbatte et al. 94] H.C. Turbatte, D. Maquin, C.T. Huynth and J. Ragot,  
Conception de l'architecture d'un système d'instrumentation : application à un procédé pétrochimique. *Revue Européenne de Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement*, 4 (1), pp. 53-72, Éditions Hermès, Paris, France, 1994. (page 27)
- [Tversky 77] A. Tversky,  
Features of similarity. *Psychological Review*, 84, pp. 327-352, 1977. (page 218)
- [Ungauer 95] C. Ungauer,  
Une expérience en matière de système d'aide à la décision : quelles leçons en tirer pour la supervision de réseau ? *Actes du Séminaire sur la Supervision et la Coopération Homme-Machine*, pp. 1-10, GDR Automatique du CNRS, Paris, France, 12-13 Janvier 1995. (page 83)
- [Vanderhaegen 93] F. Vanderhaegen,  
*Coopération homme-machine mult niveau entre une équipe d'opérateurs humains et des outils d'assistance : application au contrôle du trafic aérien*, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 21 Décembre 1993. (pages 32 et 177)
- [Visser 90] W. Visser,  
Acquisition de connaissances : l'approche de la psychologie cognitive illustrée par le recueil d'expertise en conception. *Actes des Journées Acquisition de Connaissances*, pp. 115-129, Lannion, France, 27 Avril 1990. (page 47)
- [Visser et Morais 88] W. Visser et A. Morais,  
L'utilisation concurrente de différentes méthodes de recueil de données pour l'étude de l'activité de programmation. *Psychologie Française* (J.-P. Caverni, Ed.), 33, pp. 127-132, Juillet 1988. (page 109)
- [Visser et Trousse 93] W. Visser et B. Trousse,  
Reuse of design: desperately seeking an interdisciplinarity cognitive approach. *Proceedings of the Workshop of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence* (W. Visser Ed.), pp. 1-14, Chambéry, France, August 29, 1993. (page 175)
- [Vogel 88] C. Vogel,  
*Génie cognitif*, Collection Sciences Cognitives, Éditions Masson, Paris, France, Juin 1988. (page 55)
- [Voß et Schmidt-Belz 93] A. Voß and B. Schmidt-Belz,  
Case-oriented knowledge acquisition for architectural design. *Proceedings of the Workshop on Reuse of Designs: an Interdisciplinary Cognitive Approach*, 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. C1-C13, Chambéry, France, August 29, 1993. (page 116)
- [Wagner et Fisher 74] R.A. Wagner and M.J. Fisher,  
The string-to-string correction problem. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 21 (1), pp. 168-173, January, 1974. (page 220)
- [Walter et Pronzato 94] E. Walter et L. Pronzato,  
*Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales*, Éditions Masson, Paris, France, Février 1994. (page 28)
- [Wielinga et al. 92] B. Wielinga, A.Th. Schreiber and J. Breuker,  
KADS: a modelling approach to knowledge engineering. *Knowledge Acquisition*, 4 (1), pp. 5-53, March, 1992. (pages 104, 107 et 113)
- [Wielinga et al. 93] B. Wielinga, W. Van De Velde, G. Schreiber and H. Akkermans,  
Towards a unification of knowledge modelling approaches. *Second Generation Expert Systems* (J.-M. David, J.-P. Krivine and R. Simmons, Eds), pp. 299-335, Springer Verlag, New-York, USA, 1993. (pages 110 et 111)

## Index des sigles

*Cet index recense l'ensemble des sigles utilisés dans le mémoire.*

ADD	: Arrêt DUPLEX détecté
AFCIQ	: Association française pour le contrôle industriel de la qualité
AID	: Alarme à intervention différée
AIM	: Alarme à intervention immédiate
AJ	: Nombre de prises efficaces
AL	: Nombre d'appels libérés sur encombrement ou panne interne
ALFA	: Alarme sur les faisceaux
AP	: Nombre d'appels présentés
ASA	: Apprentissage symbolique automatique
ASC	: Acquisition structurée des connaissances
ASD	: Arrêt SIMPLEX détecté
ASI	: Alarme sans intervention
BDIR	: Base de données image réseau
BPN	: Bloc primaire numérique
CA	: Commutateur d'abonnés
CAA	: Commutateur à autonomie d'acheminement
CHS	: Taux de circuits hors service
CL	: Commutateur local
CPE	: Centre principal d'exploitation
CSR	: Centre de supervision du réseau
CT	: Commutateur de transit
CTP	: Commutateur de transit principal
CTS	: Commutateur de transit secondaire
CTU	: Commutateur de transit urbain
CTZP	: Commutateur de transit de zone périphérique
CU	: Commutateur urbain

DBM	: Taux de débordement
DIESE	: Diffusion d'informations aux exploitants sur l'écoulement du trafic
DOMP	: Durée moyenne d'occupation par prise
DR	: Direction régionale
EM	: Écran mural
EN	: Charge des enregistreurs
ESPRIT	: <i>European strategic program for research in information technology</i>
FAE	: Nombre d'appels efficaces
FCE	: Nombre de circuits équipés
FCS	: Nombre de circuits en service
FP	: Nombre de prises
FT	: Nombre de prises efficaces
FTT	: Trafic écoulé
F1T	: Nombre de premières tentatives de prise
IA	: Intelligence artificielle
JdB	: Journal de bord
MIC	: Modulation par impulsions et codage
MTBF	: <i>Mean time between failures</i>
MTTR	: <i>Mean time to repair</i>
OT	: Occupation totale
PCD	: Poste de consultation distant
PCH	: Nombre de prises par circuit et par heure
PTL	: Poste de travail local
RàPC	: Raisonnement à partir de cas
RDT	: Charge par circuit
RHM	: Relation homme-machine
RRA	: Relation de redondance analytique
RTC	: Réseau téléphonique commuté
SACRÉ	: Système d'assistance à la capitalisation et à la réutilisation de connaissances
SBC	: Système à base de connaissances
SCS	: Système central de supervision
SÉTIF	: Supervision de l'écoulement du trafic en Île de France
ST	: Station terminale
TAL	: Taux d'appels libérés ou d'encombrement
TCH	: Nombre de tentatives de prises par circuit et par heure
TI	: Terminal imprimant
TPA	: Taux de perte interne en appels
TPR	: Taux de prises avec réponses

---

TPT	: Taux de perte interne en trafic
TTE	: Trafic total entrant
TTPR	: Taux de tentatives de prises avec réponses
TTS	: Trafic total sortant
TUC	: Taux de charge d'une unité de commande
UCA	: Charge de l'unité de commande A
UCB	: Charge de l'unité de commande B
ZAA	: Zone à autonomie d'acheminement
ZL	: Zone locale
ZP	: Zone périphérique
ZTP	: Zone de transit principal
ZTS	: Zone de transit secondaire
ZU	: Zone urbaine



## Index des figures

### **Introduction générale..... 13**

- Figure IG.1 L'hexagone cognitif de Gardner [85]..... 15  
 Figure IG.2 Vue panoramique du mémoire ..... 16

<b>Chapitre 1 — La supervision des procédés automatisés complexes..... 19</b>
---

- Figure 1.1 Les critères de sûreté de fonctionnement..... 22  
 Figure 1.2 Méthode fondée sur l'estimation des paramètres ..... 29  
 Figure 1.3 Méthode fondée sur l'observateur d'état ..... 29  
 Figure 1.4 Architecture d'un système de supervision [Sheridan 85] ..... 32  
 Figure 1.5 Modèle de l'opérateur humain face à une tâche [Milot 88]..... 35  
 Figure 1.6 Architecture générique de résolution de problèmes [Rasmussen 80]..... 36  
 Figure 1.7 Intégration d'un système d'assistance à l'environnement de supervision [Johannsen 91]..... 39  
 Figure 1.8 Principe de la coopération homme-machine horizontale [Milot 88] ..... 41  
 Figure 1.9 Principe de la coopération homme-machine verticale [Milot 88] ..... 42

<b>Chapitre 2 — La résolution de problèmes : apports de la psychologie cognitive et de l'intelligence artificielle ..... 45</b>
---

- Figure 2.1 Typologie de l'activité ..... 48  
 Figure 2.2 Stratégie de transfert de connaissances..... 50  
 Figure 2.3 Typologie des stratégies de diagnostic selon le modèle du procédé utilisé. . 54  
 Figure 2.4 Stratégie de diagnostic par test d'hypothèses [Vogel 88] ..... 55  
 Figure 2.5 Démarche ascendante et descendante de planification..... 56  
 Figure 2.6 Le paradigme d'analogie ..... 64  
 Figure 2.7 Processus d'analogie par transformation [Carbonell 83] ..... 65  
 Figure 2.8 Processus d'analogie par dérivation [Carbonell 83] ..... 66  
 Figure 2.9 Raisonnement heuristique *vs* raisonnement à partir de cas..... 67

<b>Chapitre 3 — Supervision d'un procédé automatisé complexe : le réseau téléphonique commuté ..... 69</b>
--

- Figure 3.1 Architecture logique de conduite d'un réseau de télécommunications .... 70  
 Figure 3.2 Le réseau téléphonique commuté..... 71  
 Figure 3.3 La numérotation téléphonique ..... 72  
 Figure 3.4 Synoptique d'un commutateur d'abonnés..... 74

Figure 3.5	Organisation hiérarchique des commutateurs .....	75
Figure 3.6	Principe de l'acheminement dynamique .....	77
Figure 3.7	Niveaux de gestion du RTC [Chemouil <i>et al.</i> 87].....	79
Figure 3.8	Architecture répartie du superviseur de trafic .....	85
Figure 3.9	Organisation des composantes de la supervision du trafic téléphonique ..	89
Figure 3.10	Typologie des incidents de trafic.....	93

## **Chapitre 4 — Méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances..... 95**

Figure 4.1	Émergence de savoirs et de savoir-faire partagés dans le cadre d'une activité collective.....	97
Figure 4.2	Cycle pour la maîtrise du retour d'expérience .....	98
Figure 4.3	La spécification : une phase d'acquisition structurée des connaissances	102
Figure 4.4	Cycle incrémental d'acquisition structurée des connaissances.....	103
Figure 4.5	Transformation du modèle de l'expertise en un modèle de conception [Wielinga <i>et al.</i> 92].....	104
Figure 4.6	La phase de conception .....	104
Figure 4.7	Ambiguïté sur le point de vue [Bourelly et Savelli 92].....	107
Figure 4.8	Problème de l'interprétation multiple [Bourelly et Savelli 92].....	107
Figure 4.9	Recueil des données de l'expertise .....	108
Figure 4.10	Démarche de construction du modèle de l'expertise.....	110
Figure 4.11	Organisations du modèle de l'expertise <i>CommonKADS</i> .....	112
Figure 4.12	Structure d'inférence de la tâche Diagnostic systématique de panne.....	113
Figure 4.13	Hierarchie de décomposition de la tâche Diagnostic systématique de panne.....	115
Figure 4.14	Cycle du raisonnement à partir de cas [Slade 91] .....	118
Figure 4.15	Processus de recherche des meilleurs candidats dans la mémoire de cas	121

## **Chapitre 5 — Spécification et conception de SACRÉ : Système d'Assistance à la Capitalisation et à la RÉutilisation de connaissances..... 125**

Figure 5.1	Recueil des connaissances du domaine.....	127
Figure 5.2	Analyse de la tâche.....	129
Figure 5.3	Analyse de l'activité et des traces de l'activité .....	130
Figure 5.4	Typologie des concepts de supervision .....	133
Figure 5.5	Modèle d'interprétation de la Classification heuristique.....	136
Figure 5.6	Structure d'inférence de la Réutilisation de connaissances.....	137
Figure 5.7	Hierarchie de décomposition de la tâche Supervision du trafic téléphonique.....	139
Figure 5.8	Hierarchie de décomposition de la tâche Recherche d'informations en local.....	141
Figure 5.9	Architecture logicielle de SACRÉ.....	144
Figure 5.10	Vue principale de l'interface de gestion de la base de cas d'incident .....	145
Figure 5.11	Hierarchie de généralité des classes d'incident de la base de cas.....	148
Figure 5.12	Interface de configuration des paramètres d'organisation .....	150
Figure 5.13	Interface de configuration des paramètres de similarité.....	152

## **Chapitre 6 — Évaluation expérimentale et perspectives d'intégration et d'extensions de SACRÉ..... 157**

Figure 6.1	Acheminements de transit non spécialisés de la DR 78 .....	160
------------	--	-----

Figure 6.2	Description de l'incident .....	161
Figure 6.3	Résultats de la procédure de remémoration .....	162
Figure 6.4	Résultats de la procédure d'adaptation. ....	163
Figure 6.5	Planification des procédures d'action. ....	164
Figure 6.6	Description de l'incident .....	166
Figure 6.7	Résultats de la procédure de remémoration .....	167
Figure 6.8	Résultats de la procédure d'adaptation. ....	167
Figure 6.9	Planification des procédures d'action. ....	168
Figure 6.10	Modèle d'organisation de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France .....	171
Figure 6.11	Résolution de problèmes interactive opérateur humain-SACRÉ .....	173
<b>Annexe B — Approches de la notion de similarité .....</b>		<b>213</b>
Figure B.1	Représentation des individus en analyse de données .....	216
Figure B.2	Variables pertinentes dans l'évaluation de la similarité [Tversky 77]...	218



## Index des tableaux

<b>Chapitre 1 — La supervision des procédés automatisés complexes</b> .....	<b>19</b>
Tableau 1.1 Classification des systèmes d'assistance selon les modalités de leur intégration à l'environnement de supervision [Finin et Klein 87] ..	40
<b>Chapitre 2 — La résolution de problèmes : apports de la psychologie cognitive et de l'intelligence artificielle</b> .....	<b>45</b>
Tableau 2.1 Raisonnements rigoureux et non rigoureux .....	62
<b>Chapitre 3 — Supervision d'un procédé automatisé complexe : le réseau téléphonique commuté</b> .....	<b>69</b>
Tableau 3.1 Niveaux de gravité d'un incident de trafic .....	87
Tableau 3.2 Fonction d'état et alarme qualifiée "Perte d'appels sur un CT" .....	88
<b>Chapitre 4 — Méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances</b> .....	<b>95</b>
Tableau 4.1 Phases du cycle de développement et degrés d'implication des acteurs [Duribreux 95] .....	100
Tableau 4.2 Formalismes de modélisation du modèle de l'expertise <i>CommonKADS</i> ..	112
<b>Chapitre 5 — Spécification et conception de SACRÉ : Système d'Assistance à la Capitalisation et à la RÉutilisation de connaissances</b> .....	<b>125</b>
Tableau 5.1 Propriétés des concepts Commutateur et Alarme commutateur .....	132
Tableau 5.2 Stratégie associée au but Diagnostic d'un incident .....	140
Tableau 5.3 Contrôle de la méthode Établir un diagnostic en local .....	140
<b>Chapitre 6 — Évaluation expérimentale et perspectives d'intégration et d'extensions de SACRÉ</b> .....	<b>157</b>
Tableau 6.1 Fonction d'état et alarme qualifiée "Faisceau très dégradé ou coupé" ...	159
Tableau 6.2 Fonction d'état et alarme qualifiée "Faisceau à efficacité nulle" .....	165



---

## Annexe A

# Organisation de la base de cas

*Cette annexe décrit la méthode numérique de construction d'un arbre d'indexation utilisée par SACRÉ pour organiser sa base de cas d'incident.*

## 1 Introduction

L'organisation de la base de cas d'incident du système SACRÉ repose sur une approche de généralisation descendante [Caulier et Houriez 96b]. Pour chaque descripteur des cas de la population de référence, SACRÉ détermine une dichotomie en fonction d'un critère d'information préalablement sélectionné. Il teste ensuite et successivement chaque descripteur puis choisit le plus discriminant pour répartir les cas de la population en différentes classes. La décomposition de la population est répétée jusqu'à ce que tous les cas soient classés. L'index ainsi élaboré est un arbre de décision. Chaque nœud de l'arbre représente un test sur un descripteur considéré comme le plus discriminant par rapport à la population et au but recherché. Les branches caractérisent les valeurs alternatives des descripteurs testés et les feuilles constituent les ensembles de cas appartenant à une même classe.

Les deux prochaines parties de cette annexe décrivent les méthodes de calcul du pouvoir discriminant utilisées par SACRÉ dans les cas d'un concept d'organisation de type symbolique et de type numérique.

## 2 Pouvoir discriminant d'un concept symbolique

Pour réaliser la partition de l'ensemble de cas, il faut déterminer, à chaque étape du processus de partitionnement, quel est le descripteur à tester pour créer les sous-ensembles suivants. La méthode de calcul du pouvoir discriminant d'un concept symbolique utilisée par SACRÉ est la mesure du **ratio de gain d'information avec**

**classes.** C'est une évolution de la méthode du gain d'information définie par Quinlan [83, 86]. Cette dernière s'attache à optimiser un critère d'information, appelé gain d'information, fondé sur l'optimisation de la mesure d'entropie de Shannon [Shannon et Weaver 49]. Le calcul du pouvoir discriminant d'un descripteur, par la méthode du gain d'information, consiste à minimiser le "désordre" entre un ensemble de cas  $E$  au niveau  $n$  et son partitionnement au niveau  $n+1$ . Ce désordre est calculé par la formule de l'entropie.

Soit  $n$  le cardinal de  $E$  et  $a$  une valeur du concept sur lequel porte la construction de l'index. Supposons qu'il y ait  $c$  cas dans  $E$  dont la valeur du concept soit  $a$ . Si  $p$  est la probabilité pour un descripteur d'un cas d'avoir la valeur  $a$ , alors  $p = c/n$ . L'information apportée par cette découverte est calculée par la formule de l'entropie :  $-p \log_2(p)$ . Lorsqu'il y a  $k$  valeurs différentes du concept dans l'ensemble  $E$ , l'information obtenue est donnée par la mesure numérique suivante :

$$M(E) = - \sum_{i=1}^k p_i \log_2(p_i)$$

Si  $M(E)$  est l'information associée à un ensemble  $E$ , alors  $M(\emptyset) = 0$ . Pour un descripteur  $D_i$  ayant  $m$  valeurs mutuellement exclusives  $d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_m$ , la nouvelle mesure d'information après avoir testé la valeur de  $D_i$  est :

$$B(E, D_i) = \sum_{i=1}^m p(D_i = d_i) \times M(E)$$

Au plus la connaissance concernant le concept d'un cas s'améliore, au moins l'information associée à la découverte du concept de ce cas est importante. Le choix du descripteur testé, à un niveau de l'arbre de décision, se porte sur celui dont la mesure d'information  $B(E, D_i)$  est minimale, c'est-à-dire sur celui qui maximise l'accroissement en terme d'information ou gain d'information :  $GI(D_i) = M(E) - B(E, D_i)$ . La complexité de l'algorithme est linéaire en fonction du nombre de cas et en  $O(n^2)^{28}$  par rapport au nombre de descripteurs.

Pour tenir compte de la hiérarchie d'héritage de la figure 5.11 et restreindre ainsi l'espace des tests pertinents pour la génération de l'arbre d'indexation, nous introduisons la mesure de gain d'information avec classes. La mesure de gain d'information avec classes considère, non plus le logarithme base 2, mais le logarithme népérien. Cela revient à multiplier la mesure d'information par  $\text{Log}(2)$ . L'intérêt en est que la mesure d'information tend vers celle du  $\chi^2$  décrite en annexe B. Le gain d'information  $GI(D_i)$  d'un descripteur symbolique  $D_i$  devient en final :

$$GI(D_i) = M(E) - B(E, D_i) = \frac{1}{n} \sum_j \sum_a n(i, j, a) \times \text{Log} \left( \frac{n \times n(i, j, a)}{n(i, j) \times n(a)} \right)$$

où :

- $n$  est le nombre de cas de l'ensemble  $E$  ;
- $n(i, j, a)$  est le nombre de cas ayant la valeur  $j$  pour le descripteur  $D_i$  et dont la valeur du concept est  $a$  ;
- $n(i, j)$  est le nombre de cas ayant la valeur  $j$  pour le descripteur  $D_i$  ;
- $n(a)$  est le nombre de cas dont la valeur du concept est  $a$ .

<sup>28</sup> Le symbole  $O$  (prononcer "est grand o de") est utilisé pour préciser la complexité des algorithmes.  $f(x) = O(g(x))$  exprime le fait que  $f(x)$  ne croît certainement pas plus vite que  $g(x)$ .

La méthode du gain d'information fondée sur l'optimisation de la mesure l'entropie de Shannon favorise les descripteurs ayant beaucoup de valeurs dans leur domaine de définition. Pour supprimer ce biais, nous introduisons un ratio empirique de gain d'information :  $RG I(D_i)$ . Soit  $k$  valeurs différentes du concept d'organisation dans  $E$ . Pour un descripteur  $D_i$  ayant  $m$  valeurs mutuellement exclusives  $d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_m$ , la mesure de l'information contenue dans la question : "Quelle est la valeur de  $D_i$  pour une valeur donnée du concept ?", est définie par :

$$RG I(D_i) = - \sum_{i=1}^m \frac{C(d_i)}{n} \log_2 \frac{C(d_i)}{n}$$

avec :

$$C(d_i) = \sum_{j=1}^k \text{nombre d'exemples } \in \text{concept } j, \text{ tel que } D_i = d_i$$

Compte tenu de cette correction, la mesure du ratio de gain d'information avec classes d'un descripteur  $D_i$  devient :

$$RG(D_i) = \frac{GI(D_i)}{RG I(D_i)}$$

Le processus de partitionnement est appliqué récursivement pour former l'arbre d'indexation. Le développement du nœud courant est stoppé et une feuille est construite, dès que l'une des quatre conditions d'arrêt suivantes est vérifiée :

1. Tous les cas d'une partition ont la même valeur du concept. C'est la condition la plus forte valable dans tous les cas.
2. La profondeur du nœud courant est supérieure à une limite donnée.
3. Le nombre de cas associé au nœud courant est inférieur à une limite donnée.
4. Le seuil de signification du test suivant le nœud courant est inférieur à une limite donnée.

En pratique, les limites mentionnées sont modulables.

### 3 Pouvoir discriminant d'un concept numérique

Le but est le même que précédemment et seule la méthode de test d'appartenance à un concept change. En effet, les valeurs d'un concept numérique pouvant être en quantité infinie, il n'est plus possible de faire un test d'égalité. La variance,  $\text{Var}(x)$  ou  $\sigma^2(x)$ , est alors utilisée :

$$\text{Var}(x) = E(x^2) - E(x)^2$$

$E(x)$  représente l'espérance mathématique, encore appelée moyenne pondérée, de la variable aléatoire  $x$ . Sachant que la variance mesure la répartition des valeurs des concepts autour de la valeur moyenne, nous cherchons à favoriser les partitions pour lesquelles les valeurs des concepts sont proches de leur moyenne, donc celles pour lesquelles la variance est la plus faible. Pour chaque descripteur, plus la variance est grande, plus les valeurs des concepts, donc les cas auxquels elles correspondent, sont dispersées. L'écart avec un découpage "idéal" réalisé sur les concepts augmente alors

d'autant. À l'inverse, plus la variance est faible, plus les cas sont regroupés. L'écart entre ce découpage et un découpage "idéal" est donc plus faible, ce qui a comme conséquence que le descripteur est plus discriminant.

Soit  $E$  l'ensemble de cas courant à un nœud  $N$  de l'arbre d'indexation et  $D_i$  un descripteur numérique dont  $d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_m$  est l'ensemble de ses valeurs dans  $E$ . En construisant une partition de  $E$  suivant ces valeurs, on obtient  $m$  sous-ensembles de  $E$ , notés  $e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_m$ . Construisons maintenant  $m$  ensembles  $c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_m$ , tels que chaque  $c_i$  contienne l'ensemble des valeurs des concepts des cas de chaque  $e_i$ .  $c_i$  est donc un ensemble de nombres et peut, éventuellement, contenir des doublons. Le calcul et le cumul de la variance de chaque sous-ensemble  $c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_m$  donne la quantité  $\text{Var}(c)$ . Ces calculs sont effectués pour tous les descripteurs candidats. Le descripteur le plus discriminant, pour le nœud  $N$ , est celui pour lequel la valeur de  $\text{Var}(c)$  est minimale. Le processus est réitéré pour les nœuds suivants jusqu'à vérification de la condition d'arrêt suivante, pour laquelle une feuille est construite :

Soit  $N$  le nœud courant de l'arbre d'indexation et  $n$  l'ensemble de cas de la base de cas. Soit  $k$  (respectivement  $k_n$ ) l'ensemble des valeurs du concept des cas de  $N$  (respectivement de  $n$ ).  $k$  (respectivement  $k_n$ ) est donc un ensemble de nombres et peut, éventuellement, contenir des doublons. La condition d'arrêt est :

$$\sigma(k) \leq \sigma(k_n) \times \alpha, \text{ avec } 0 \leq \alpha \leq 1$$

Le paramètre  $\alpha$  est fixé à 1 par défaut.  $\sigma(k)$  (respectivement  $\sigma(k_n)$ ) représente l'écart type de l'ensemble  $k$  (respectivement de l'ensemble  $k_n$ ). La condition d'arrêt signifie que  $N$  devient une feuille si la dispersion des cas de  $E$  est inférieure à celle des cas de  $n$ . Autrement dit,  $N$  est une feuille si les cas de  $E$  sont suffisamment regroupés autour de la moyenne des valeurs des concepts par rapport à la dispersion des cas de  $n$ .

## Annexe B

# Approches de la notion de similarité

*La notion de similarité, au sens le plus général du terme, est utilisée dans plusieurs domaines de recherche, tels que l'analyse de données, la psychologie cognitive ou l'intelligence artificielle. Cette annexe présente quelques unes des principales mesures de similarité étudiées dans chacune de ces disciplines et décrit celle utilisée par SACRÉ.*

## 1 Introduction

Les systèmes informatiques dont le but est d'identifier ou d'organiser de manière automatique un ensemble de données ou de connaissances, reposent sur l'utilisation d'un opérateur de **similarité** dont l'objet est d'établir les ressemblances ou les relations qui existent entre les structures de données manipulées. Cette notion de similarité a fait l'objet de nombreuses recherches à la fois en **analyse de données**<sup>29</sup> [Diday *et al.* 82], notamment en reconnaissance des formes [Dubuisson 90], en **psychologie cognitive** [Thagard *et al.* 90] ou encore en **Intelligence Artificielle (IA)** où elle est surtout utilisée en Apprentissage Symbolique Automatique (ASA) [Bisson 92]. Cependant, les travaux effectués dans ces différents domaines se distinguent par de très nombreux aspects, tels que : les buts poursuivis (identification, classification ou discrimination), les formalismes de représentation utilisés pour exprimer les données (tableaux de données, représentations logiques, graphes ou objets) et surtout l'approche théorique sous-jacente (géométrique, probabiliste, syntaxique ou psychologique). Les différentes formes de similarité rencontrées dans la littérature peuvent être divisées selon deux grandes familles : les similarités **numériques** et les similarités **symboliques**.

Les similarités numériques sont principalement utilisées en analyse de données. Elles ont pour objet de "quantifier" les ressemblances existantes entre deux ou plusieurs structures de données. Cette quantification est généralement représentée sous la forme

<sup>29</sup> Dans le cadre de l'analyse de données, les termes inverses de dissimilarité et de distance sont le plus souvent utilisés. C'est à dessein que nous employons ici les notions de similarité et de ressemblance qui sont des appellations plus générales et mathématiquement moins connotées que les précédentes.

d'un nombre réel compris dans l'intervalle  $[0..1]$ . La valeur 0 signifie une totale différence entre les objets étudiés et la valeur 1 une parfaite identité. Par exemple, une distance mathématique est une similarité numérique. Elle est définie par les propriétés qu'elle doit vérifier. Les mesures de similarité numériques présentent l'avantage de permettre une quantification très souple des ressemblances qui existent au sein d'un ensemble de données. Par ailleurs, elles sont aptes à travailler simultanément sur des données numériques et "pseudo-symboliques", telles que les valeurs nominales. Les deux principaux problèmes soulevés par cette approche sont, d'une part, la faible explicabilité<sup>30</sup> intrinsèque des mesures numériques et, d'autre part, le fait que ces mesures ne sont généralement définies que pour des informations représentables sous la forme d'un tableau de données, c'est-à-dire sous la forme d'individus décrits par un ensemble de variables, appelées attributs en IA.

Les similarités symboliques concernent plutôt les domaines de l'IA<sup>31</sup> et de la psychologie cognitive par l'intermédiaire du raisonnement par analogie. Dans ces approches, il s'agit de "caractériser" de manière symbolique, c'est-à-dire à l'aide d'une expression formelle du langage de représentation utilisé, les similitudes qui apparaissent au sein d'un ensemble de connaissances. Typiquement, en ASA la mise en évidence des similarités s'effectue à l'aide de l'opération de généralisation<sup>32</sup> qui repose sur la notion de subsomption. Les mesures de similarité symboliques présentent quant à elles l'avantage de fournir à l'utilisateur des résultats relativement explicites car les similitudes sont caractérisées dans le langage même d'expression des données. En outre, il est possible de travailler directement sur des données relationnelles. Cependant, la recherche des ressemblances, fondée sur l'opération de généralisation, s'avère être complexe dans le cas de données relationnelles<sup>33</sup>.

Enfin, dans le domaine de l'IA, deux types de mesure de similarité sont reconnus. Une mesure utilisant des connaissances de surface, liées au domaine d'application, et une mesure dite structurelle utilisant des connaissances profondes, liées à la structure d'un exemple, problème ou cas. Tout en respectant le principe de systématité<sup>34</sup>, une mesure de similarité n'est pas exclusivement de surface ou structurelle.

## 2 Similarité en analyse de données

L'analyse de données permet de traiter d'importantes quantités de données. L'analyse peut être exploratoire (classification, par exemple) ou confirmatoire (prise de décision, par exemple). L'analyse de données est une collection de méthodes permettant de modéliser des informations et de trouver des relations entre objets ou entre les paramètres caractérisant ces objets.

Nous nous intéressons ici à la partie de l'analyse de données relative à l'étude de la ressemblance entre individus. Celle-ci est utilisée notamment lors de la classification automatique par partition, arbre ou hiérarchie. Les **mesures de ressemblance** issues de l'analyse de données ont fortement inspiré les **mesures de similarité** utilisées en Raisonnement à Partir de Cas (RàPC). Nous supposons que les données sont homogènes, c'est-à-dire que toutes les variables des individus sont de même nature.

<sup>30</sup> Nous ne parlons pas ici de l'explicabilité du point de vue mathématique mais du point de vue sémantique des informations manipulées. Ainsi, il est difficile de justifier en termes simples une valeur de similarité entre deux structures auprès d'un utilisateur non numéricien.

<sup>31</sup> À l'exception notable du raisonnement à partir de cas dans lequel la recherche en mémoire des cas voisins s'appuie, le plus souvent, sur des notions de similarités numériques.

<sup>32</sup> Toutefois, les critères d'évaluation de la qualité d'une généralisation peuvent être totalement numériques.

<sup>33</sup> En ASA, ces données sont souvent représentées à l'aide de sous-ensembles de la logique des prédicats du premier ordre.

<sup>34</sup> Le principe de systématité exprime le fait que les mesures de similarité doivent refléter en priorité les ressemblances structurelles profondes entre les données, plus que les similitudes de surface. Cette propriété fondamentale a été mise en lumière par les travaux de Gentner [83].

## 2.1 Définitions

Une mesure de ressemblance est une application qui permet d'exprimer numériquement un lien existant entre les individus ou entre les variables d'une structure de données. Un **indice de similarité** sur un ensemble  $\Omega$  d'individus est une application  $S$  qui vérifie les trois propriétés suivantes [Diday *et al.* 82] :

1.  $S$  est une application  $\Omega^2$  dans  $\mathfrak{R}^+$ .
2.  $S$  est symétrique :  $\forall (w_1, w_2) \in \Omega^2, S(w_1, w_2) = S(w_2, w_1)$ .
3.  $\forall (w_1, w_2) \in \Omega^2$  avec  $w_1 \neq w_2, S(w_1, w_1) = S(w_2, w_2) > S(w_1, w_2)$ .

La dernière condition indique que la similarité entre un élément et lui-même est maximale et conserve la même valeur pour tous les individus de la population  $\Omega$ . Un **indice de dissimilarité** est une application  $D$  qui satisfait les deux premières conditions de l'indice de similarité (application et symétrie), la troisième est remplacée par :  $\forall w \in \Omega, D(w, w) = 0$ . Ce qui signifie simplement que la dissimilarité entre un individu et lui-même est nulle. Notons qu'un indice de dissimilarité peut se définir à l'aide de l'indice de similarité par la relation suivante :  $D(w_1, w_2) = S(w_1, w_1) - S(w_1, w_2)$ . En ce sens, la distance **euclidienne** est un indice de dissimilarité classique obtenu par la formule :

$$D(w_1, w_2) = \left[ (x_{w_1} - x_{w_2})^2 + (y_{w_1} - y_{w_2})^2 \right]^{1/2}$$

La distance euclidienne est couramment utilisée et souvent pondérée par l'inverse de la variance ou l'inverse de l'écart maximum. Elle vérifie en plus les deux propriétés suivantes :

1.  $D(w_1, w_2) = 0 \Leftrightarrow w_1 = w_2$ .
2.  $\forall (w_1, w_2, w_3) \in \Omega^3, D(w_1, w_2) \leq D(w_1, w_3) + D(w_3, w_2)$  (inégalité triangulaire).

Un indice de dissimilarité qui vérifie seulement la première propriété est appelé **indice de distance**. S'il vérifie la deuxième propriété, c'est un **écart**. Enfin, une distance **ultranumérique** est un indice de dissimilarité qui, au lieu de vérifier l'inégalité triangulaire, vérifie l'inégalité suivante :  $\forall (w_1, w_2, w_3) \in \Omega^3, D(w_1, w_2) \leq \max(D(w_1, w_3), D(w_3, w_2))$ .

## 2.2 Exemples de distance

Dans le cas de tableaux où les variables sont quantitatives, la distance de **Minkowski** est la plus utilisée. Elle est définie par la relation suivante [Diday *et al.* 82] :

$$d(w_1, w_2) = \left[ \sum_{j=1}^m |x_{11}^j - x_{12}^j|^{\frac{1}{\lambda}} \right]^{\lambda} \text{ avec } \lambda \geq 1$$

La distance de Minkowski est dite **semi-euclidienne** car pour certaines valeurs du paramètre  $\lambda$ , il n'est pas possible de mettre cette distance sous forme quadratique. La distance de Minkowski englobe en fait plusieurs distances. Parmi celles-ci, citons trois exemples de distances utiles mais non quadratiques :

- la distance des **valeurs absolues** (ou "City block") :

$$d(w1, w2) = \sum_{j=1}^p p_j |x_{i1}^j - x_{i2}^j|$$

- la distance de **Cambera** :

$$d(w1, w2) = \sum_{j=1}^n \frac{|x_{i1}^j - x_{i2}^j|}{x_{i1}^j - x_{i2}^j}$$

- la distance de **Chebychev** :

$$d(w1, w2) = \max_j |x_{i1}^j - x_{i2}^j|$$

Les distances de **Mahalanobis** et du  $\chi^2$  sont également importantes et très souvent employées en analyse de données. La distance du  $\chi^2$ , par exemple, prend en compte les différentes valeurs possibles de chaque variable et est en cela particulièrement adaptée aux tableaux de fréquences [Diday *et al.* 82].

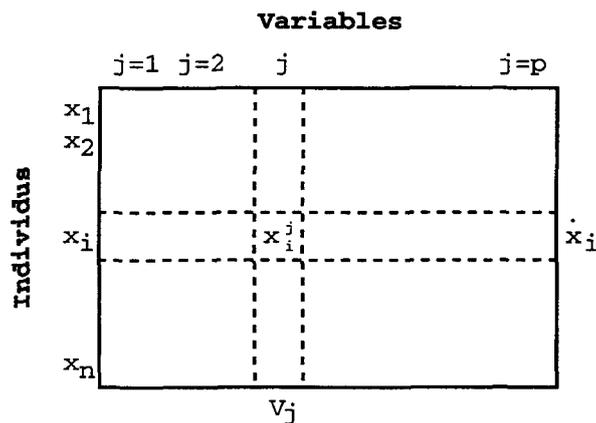


Figure B.1 — Représentation des individus en analyse de données.

Relativement à la figure B.1, considérons deux individus  $x_i$  et  $x_{i'}$  possédant chacun  $p$  variables  $x_i^j$  et  $x_{i'}^j$ , où  $j$  est le numéro de la variable. Pour chacune de ces variables, il existe un certain nombre de valeurs possibles dans l'ensemble de tous les individus. Soit :

$$V_j = \sum_{i=1}^n x_i^j \text{ et } \dot{x}_i = \sum_{j=1}^p x_i^j$$

À l'aide de ces deux sommes, la distance du  $\chi^2$  s'exprime de la façon suivante :

$$d^2(x_i, x_{i'}) = \sum_{j=1}^p \frac{1}{V_j} \left( \frac{x_i^j}{\dot{x}_i} - \frac{x_{i'}^j}{\dot{x}_{i'}} \right)^2$$

Lorsque deux individus sont à valeurs booléennes ou binaires, il existe des distances adaptées : distances de **Russel et Rao**, de **Jaccard et Needham**, de **Dice**, de **Sokal et Sneath**, de **Sokal et Michener**, de **Kulzinsky**, de **Rogers et Tanimoto**, de **Yule** ou de

**corrélation.** Elles sont basées sur la fréquence d'apparition des valeurs 0 et 1 dans l'un et l'autre des individus [Diday *et al.* 82].

Enfin, à partir de distances inter-individus, il est possible de définir des mesures de ressemblance entre groupes d'individus. Étant donné deux groupes d'individus  $A_1$  et  $A_2$  et une mesure de ressemblance, il existe plusieurs possibilités pour calculer la ressemblance entre deux groupes qui peuvent être, par exemple, le lien minimum, le lien maximum ou, de façon plus complexe, la distance des noyaux et la distance des centres de gravité [Diday *et al.* 82].

## 2.3 Conclusion

Les mesures de ressemblance sont nombreuses en analyse de données et il n'est pas toujours aisé de choisir la mesure appropriée aux besoins de l'utilisateur. Il existe cependant certains critères à partir desquels le choix d'une mesure est plus ou moins adéquate. Notamment, lorsque l'utilisateur a une idée de la proximité de certains individus, il peut comparer son évolution par rapport aux mesures proposées.

Certaines mesures, comme la distance du  $\chi^2$ , privilégient la ressemblance des profils des individus. Deux individus ont exactement le même profil si la différence entre les valeurs des individus est constante pour chaque variable. Ce qui se traduit par la formule suivante :  $|x_i - y_i| = \text{constante}, \forall i$ . Le profil est donc d'autant plus proche que la valeur de la somme finie suivante est faible :

$$\sum_{i=1}^n |x_i - y_i| - |x_j - y_j|$$

D'autres mesures privilégient surtout la distance entre les valeurs moyennes des valeurs de deux individus, comme la distance de Minkowski pour  $\lambda = 1$ . Deux individus  $x$  et  $y$  sont alors d'autant plus proches que le résultat de la somme suivante est petit :

$$\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

En analyse de données, les données doivent suivre un format bien déterminé en se représentant sous forme d'individus possédant des valeurs pour un certain nombre de paramètres. Cette représentation s'avère particulièrement adaptée à la représentation par attributs-valeurs en IA. Dans le domaine limitrophe de l'IA, qu'est la psychologie cognitive, différents modes de calcul de similarité correspondent à différents modes de pensée des êtres humains. Il est intéressant de se pencher sur ces méthodes de calcul.

## 3 Similarité en psychologie cognitive

En psychologie cognitive, il existe différents modèles de processus d'évaluation. Chacun présente une façon différente de traiter la connaissance des experts en situation de prise de décision. Nous présentons quelques uns de ces modèles [Pinson 87].

Le modèle **conjonctif**. Dans ce modèle pour que l'individu soit jugé acceptable, tous les critères doivent être supérieurs à un seuil minimum, appelé **seuil de satisfaction**. Le jugement général porté sur un sous-domaine sera égal au minimum des jugements élémentaires.

Le modèle **disjonctif**. Il est aussi appelé “fonction maximum d'évaluation” car l'individu est jugé sur son meilleur aspect sans considération des autres attributs. Le concept de “meilleur” est représenté sous la forme d'un seuil. Ce modèle signifie qu'un individu est considéré comme acceptable s'il est excellent sur au moins une caractéristique pertinente, quelque soit la valeur des autres. De façon générale, il s'agit de privilégier un attribut, celui considéré comme étant le plus important. La notion d'importance d'une caractéristique apparaît donc ici sous sa forme la plus élémentaire.

Le modèle **lexicographique**. Ce modèle suppose que les caractéristiques sont observées par ordre d'importance. La caractéristique la plus importante est d'abord examinée. Si certaines conditions sont remplies (par exemple, la valeur d'un attribut est jugée suffisamment proche : un certain seuil de proximité est atteint) alors le processus d'évaluation est arrêté, sinon la caractéristique suivante dans l'ordre d'importance est examinée. Cette méthode est plus complète que la précédente dans la mesure où il est possible que tous les attributs soient pris en compte avec leur importance associée. Cependant, cela nécessite qu'un seuil et un ordre soient arbitrairement, ou pas, définis par l'utilisateur. Dans ce dernier cas, il faut acquérir les connaissances correspondantes et pondérer l'importance de chaque attribut.

Le modèle **compensatoire**. Il compense de mauvais scores obtenus sur certaines caractéristiques par de bons scores sur d'autres attributs. Il évalue un individu en lui donnant une note globale selon une fonction d'évaluation pondérée. L'importance de chaque attribut constitue un indice de pondération et l'individu est évalué en fonction de l'ensemble des attributs. Si  $N$  est le nombre d'attributs du domaine,  $S_j$  la similarité pour deux exemples par rapport à l'attribut  $j$ ,  $P_j$  le poids (ou l'importance) associé à l'attribut  $j$  et, enfin,  $S$  la similarité globale entre les deux exemples, il existe alors plusieurs façons de calculer la similarité, par exemple :

$$S = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j S_j \quad \text{ou} \quad \log(S) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j S_j$$

Ces méthodes de calcul prennent en compte les “ressemblances” de valeur entre attributs (les  $S_j$ ) et les importances de tous les attributs (les  $P_j$ ) vis-à-vis de l'ensemble des attributs. Les deux calculs correspondent à une mesure de similarité équivalente qui semble être une mesure de similarité plus adéquate dans la sélection du meilleur.

Le modèle de **Tversky** [77], figure B.2. La représentation de Tversky considère un individu dans sa totalité. L'individu est décrit à l'aide d'attributs mais ceux-ci ne sont pas examinés un par un. Pour comparer deux individus, il suffit, dans cette approche, de construire une seule mesure de similarité. La comparaison entre deux objets ne passe donc pas par une étape préliminaire de comparaison attribut par attribut puis par une étape d'agrégation. Le point faible de cette approche est de ne pas décomposer le problème de l'évaluation de la similarité en sous-problèmes.

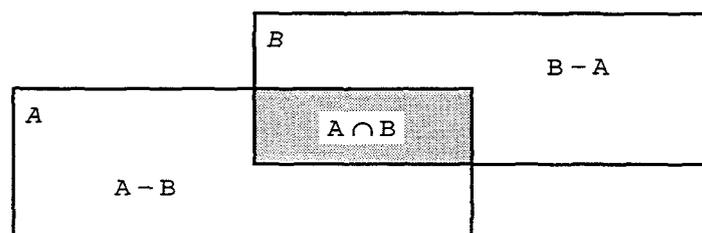


Figure B.2 — Variables pertinentes dans l'évaluation de la similarité [Tversky 77].

Tversky s'oppose à la représentation géométrique des mesures de similarité, largement utilisée, exprimant la similarité comme une distance. Son opposition est surtout centrée sur la symétrie exigée par de tels modèles. La similarité, selon lui, n'est pas une relation symétrique. Il suggère donc une mesure de similarité qui n'est ni métrique, ni dimensionnelle, exprimée comme une fonction  $F$  de trois arguments :

- les traits communs à  $A$  et  $B$  ( $A \cap B$ ) ;
- les traits de  $A$  que ne partage pas  $B$  ( $A - B$ ) ;
- les traits de  $B$  que  $A$  ne partage pas ( $B - A$ ).

$$S(A, B) = F(A - B, A \cap B, B - A)$$

Cette mesure de similarité satisfait quatre axiomes de monotonie, d'indépendance, de solvabilité et d'invariance. Il en propose une forme linéaire sans toutefois justifier ce choix :

$$S(A, B) = \alpha f(A - B) - \beta f(A \cap B) - \gamma f(B - A) \quad \text{avec } \alpha, \beta, \gamma \geq 0$$

## 4 Similarité dans le raisonnement à partir de cas

La notion de similarité utilisée en IA concerne essentiellement les domaines de l'ASA et du RàPC. En ASA, la classification automatique se propose, non seulement de déterminer des catégories, mais aussi de calculer la similarité entre les instances de façon à minimiser la similarité inter-catégories et à maximiser la similarité intra-catégorie. Dans ce contexte, le choix d'une mesure de similarité équivalente à celles de l'analyse de données peut s'avérer insuffisante. Un des buts de la classification automatique est de déterminer de nouvelles mesures de similarité satisfaisant aux formats des données et aux contraintes intra et inter-catégories énoncées ci-dessus. En RàPC, la notion de similarité joue un rôle majeur lors de l'étape de sélection du meilleur candidat.

### 4.1 Choix du meilleur cas

Choisir le meilleur cas nécessite d'être capable d'apparier deux cas pour générer une correspondance entre leurs parties. L'appariement est relativement simple dans le cadre d'une représentation par attributs-valeurs. Cependant, dans certains domaines comme la planification, il est inévitable de considérer des représentations structurelles ou relationnelles et cela complique fortement le processus d'appariement. Il est nécessaire d'avoir plus d'informations sur les caractéristiques des cas, par exemple les relations entre les parties du cas et les relations avec les autres cas. La similarité est alors dite structurelle et devient plus complexe à évaluer.

La plupart des systèmes de RàPC évaluent la similarité de deux cas en comptabilisant les caractéristiques communes. Les poids associés à ces caractéristiques dépendent de leur importance relative donnée par l'expert. Dans les systèmes CYRUS [Riesbeck et Schank 89], SHRINK [Kolodner 85] et JULIA [Kolodner 88] les similarités sont liées à la procédure d'organisation. Dans SHRINK et JULIA, une seconde procédure d'organisation permet de modifier l'importance relative des caractéristiques en fonction des erreurs signalées par l'expert. Dans le système MEDIATOR [Kolodner *et al.* 85], un premier filtrage permet d'éliminer les cas ne partageant pas les caractéristiques majeures et les autres cas sont réévalués vis-à-vis d'un sous-ensemble des caractéristiques les plus importantes. La procédure

d'adaptation de la solution extraite peut éventuellement modifier l'évaluation de la similarité. Le système HYPO [Ashley et Rissland 87] sélectionne les cas les plus proches, la similarité s'évaluant par les faits spécifiques et par le rôle que joue le cas dans le raisonnement. Enfin, le système GREBE [Branting 88] utilise une explication pour évaluer la similarité des cas.

Il est possible de considérer différents points autour desquels les systèmes de RàPC se différencient :

- l'extraction de cas et l'évaluation de la similarité peuvent être confondues ou différenciées. Dans le cas où ces étapes sont bien séparées, les cas sont extraits en fonction de leur similarité et le processus d'extraction est indépendant. Une évaluation supplémentaire est donc nécessaire pour déterminer le cas le plus similaire ;
- les cas sont représentés à l'aide de caractéristiques simples ou abstraites. Lorsque les caractéristiques sont abstraites, leur extraction est un processus externe au système ;
- soit les caractéristiques s'expriment de la même façon dans tous les cas de la mémoire, soit elles ne sont pas exprimées de la même façon dans les différents cas de la mémoire, une procédure d'équivalence de caractéristiques est alors nécessaire ;
- dans certains systèmes [Donahue 89], pour évaluer la similarité, la connaissance du domaine est nécessaire en plus des caractéristiques ;
- des fonctions de similarité numériques ou heuristiques sont utilisées pour déterminer un ordre partiel sur les cas extraits.

## 4.2 Similarité dans SACRÉ

L'évaluation de similarité réalisée par SACRÉ commence par une comparaison descripteur par descripteur. Chaque comparaison élémentaire utilise une mesure de similarité à valeur numérique. La quantification des ressemblances entre les valeurs des descripteurs est représentée sous la forme d'un nombre réel compris dans l'intervalle [0..1]. La valeur 0 signifie une totale différence entre les descripteurs étudiés et la valeur 1 une parfaite identité. La mesure de similarité  $\text{Sim}(D_{C_i}, D_{S_i})$  entre un descripteur cible  $D_{C_i}$  et un descripteur source  $D_{S_i}$  est basée sur le calcul de leur distance :

$$\text{Sim}(D_{C_i}, D_{S_i}) = 1 - d(D_{C_i}, D_{S_i})$$

La distance dépend du type des descripteurs évalués. La distance calculée dans le cas de descripteurs numériques émane de la distance de Minkowski :

$$d(D_{C_i}, D_{S_i}) = \frac{|D_{C_i} - D_{S_i}|}{D_{C_i}}$$

Lorsque les descripteurs comparés sont des chaînes de caractères, la distance est fondée sur le principe suivant : deux chaînes de caractères sont d'autant plus proches que le coût de la transformation de l'une, dans le but de la rendre identique à l'autre, est plus faible. Le coût dépend du nombre de transformations à effectuer : substitution, insertion et suppression de caractères, et du coût de chacune d'elles. La distance calculée a pour origine les travaux de Wagner et Fisher [74] sur les distances d'édition dans les domaines de la communication et de la recherche d'informations. Différentes suites d'opérations conduisent au résultat escompté. La distance évaluée correspond à la suite la moins coûteuse permettant la conversion d'une des deux chaînes en l'autre.

L'évaluation de la similarité entre deux chaînes de caractères considère successivement la similarité des deux chaînes limitées à leur premier, puis leurs deux premiers, puis leurs trois premiers caractère(s), et ainsi de suite pour tous les caractères. La fonction  $d(i, j)$ , ci-dessous, permet d'évaluer la distance entre deux chaînes de caractère  $A = a_1 a_2 \dots a_i$  et  $B = b_1 b_2 \dots b_j$ . À chacune des transformations évoquées correspond un coût.  $C(a_i \rightarrow b_j)$  représente le coût de remplacement de  $a_i$  par  $b_j$ ,  $C(a_i \rightarrow \varepsilon)$  désigne le coût de la suppression de  $a_i$  et  $C(\varepsilon \rightarrow b_j)$  précise le coût d'insertion de  $b_j$ .  $\varepsilon$  représente la chaîne vide. Nous avons :

$$d(i, j) = \{d(i-1, j-1) + C(a_i \rightarrow b_j), d(i-1, j) + C(a_i \rightarrow \varepsilon), d(i, j-1) + C(\varepsilon \rightarrow b_j)\}$$

En d'autres termes, le but est de déterminer quelles sont les transformations à appliquer à  $A$  pour retrouver deux chaînes identiques  $a_1 a_2 \dots a_m$  et  $b_1 b_2 \dots b_n$ , sachant que si l'on dispose de la transformation :

- $a_1 a_2 \dots a_{m-1}$  en  $b_1 b_2 \dots b_{n-1}$  alors elle autorise le remplacement de  $a_m$  par  $b_n$  ;
- $a_1 a_2 \dots a_m$  en  $b_1 b_2 \dots b_{n-1}$  alors il suffit d'ajouter  $b_n$  ;
- $a_1 a_2 \dots a_{m-1}$  en  $b_1 b_2 \dots b_n$  alors il suffit de supprimer  $a_m$ .

Pour exemple, considérons deux chaînes de caractères  $A$  et  $B$  de longueur, respectivement,  $m$  et  $n$ , telles que  $A = agtg$  et  $B = tgatg$ . La distance entre  $A$  et  $B$ , égale à  $d(m, n)$ , est calculée de façon itérative à partir de  $d(0, 0) = 0$ . En choisissant un coût de substitution uniforme égal à 2 (si les caractères sont différents et nul sinon) et des coûts d'insertion et de suppression valant 1, il vient le tableau suivant :

	$\varepsilon$	t	g	a	t	g
$\varepsilon$	0	1	2	3	4	5
a	1	2	3	2	3	4
g	2	3	2	3	4	3
t	3	2	3	4	3	4
g	4	3	2	3	4	3

Dans les conditions définies, la distance entre  $agtg$  et  $tgatg$  vaut donc  $d(4, 5) = 3$ . La complexité de la méthode est en  $O(mn)$ , en temps et en espace, et en  $O(n)$  en espace si l'on se contente du résultat final.



Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page. The text is arranged in approximately 15 horizontal lines. There are two small red marks on the right side of the text area, one near the middle and one near the bottom.

## Résumé

La supervision des modes de fonctionnement anormaux des procédés automatisés complexes implique le recours à des méthodes de résolution de problèmes. Parmi celles-ci, l'évocation d'une solution analogue préétablie en mémoire épisodique constitue une méthode efficace et économique d'un point de vue cognitif. Toutefois, sa mise en œuvre systématique se heurte à plusieurs limites intra et extra-individuelles. De façon à pallier ou corriger ces limites, l'objectif de la thèse est de proposer une méthodologie interdisciplinaire de développement de systèmes d'assistance à l'opérateur de supervision fondée sur la capitalisation et la réutilisation de l'expérience.

La méthodologie s'appuie sur un cycle de développement en cascade dont l'objet des phases de spécification et de conception constitue la principale particularité. La phase de spécification s'inscrit dans un cycle incrémental d'acquisition structurée des connaissances et se préoccupe des caractéristiques, des contraintes et des besoins de l'activité de supervision. Elle est finalisée par le modèle conceptuel des connaissances descriptives et opératoires de la réutilisation de l'expérience. À partir des spécifications explicitées par le modèle conceptuel de l'expertise, la phase de conception du système d'assistance exploite les modes de représentation des connaissances et des raisonnements développés en intelligence artificielle.

Les expériences de supervision sont capitalisées sous la forme de cas d'incident. Chaque cas représente la signature d'une situation anormale diagnostiquée et résolue. Il est représenté au sein du système d'assistance par un objet structuré. La réutilisation des cas d'incident s'effectue selon les étapes du cycle de raisonnement à partir de cas. L'expérience de supervision est ainsi pérennisée et valorisée. Cette maîtrise du retour d'expérience contribue à accroître l'efficacité de l'activité de supervision et, en conséquence, la sûreté de fonctionnement du procédé et la qualité des produits ou des services objets de la supervision. Les phases de spécification et de conception s'attachent à, respectivement, modéliser et représenter les notions fondamentales de point de vue de l'opérateur de supervision sur la résolution de problèmes et de contexte de la résolution de problèmes.

La méthodologie a été confrontée au domaine particulier de la supervision du trafic téléphonique de l'Île de France. Elle a débouché sur la conception du système SACRÉ dont l'évaluation expérimentale montre la pertinence des diagnostics et des plans d'action proposés à l'opérateur de supervision.

**Mots clés :** supervision, supervision du trafic téléphonique, système d'assistance au diagnostic et à la planification, méthodologie de capitalisation et de réutilisation de connaissances, acquisition structurée des connaissances, modèle conceptuel de l'expertise, raisonnement à partir de cas, cas d'incident, point de vue et contexte.

## Abstract

Supervision of complex automated process in case of abnormal situations requires problem solving methods. Among these one, previous similar solution evocation in episodic memory constitutes an efficient and cognitive economic method. However, its systematic application is restricted by several intra and extra-individual limits. In order to palliate or to correct these limits, thesis proposes a support systems development interdisciplinary methodology based on experience reusing and capitalizing.

Methodology is based on a waterfall development cycle which purpose of the specification and design stages is the main particularity. Specification stage is included in a iterative knowledge acquisition cycle and takes into account characteristics, constraints and needs of the supervision activity. Experience reusing conceptual model is its major result. From specifications described by this expertise conceptual model, the support system design stage uses knowledge and reasoning formalisms developed in artificial intelligence.

Supervision experiences are capitalized as incident cases. Each case represents an abnormal situation diagnosed and solved in the past. An incident case is represented into the support system by a structured object. Incident case reusing is carried out according to the case-based reasoning stages. Thus, supervision experience is capitalized and used. This experience feedback management contributes to improve supervision activity efficiency and, in consequence, process reliability and products or services quality. Specification and design stages allow to, respectively, model and represent supervision operator point of view on the problem solving and context of the problem solving.

Methodology has been applied to the Île de France telephone traffic supervision domain. The SACRÉ system has been performed. Its experimental assessment shows relevance of diagnosis and action plans proposed to the operator.

**Key words :** supervision, supervision of telephone traffic, diagnostic and planning assistance system, knowledge reusing and capitalizing, structured knowledge acquisition, conceptual model, case-based reasoning.

Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00904598