



Etude de la fonction d'explication dans les systèmes à bases de connaissances : application à la conduite de procédés

Marc Lejeune

► To cite this version:

Marc Lejeune. Etude de la fonction d'explication dans les systèmes à bases de connaissances : application à la conduite de procédés. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 1999. Français. NNT : 1999NAN10203 . tel-01747503

HAL Id: tel-01747503

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747503>

Submitted on 29 Mar 2018

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

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



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

Etude de la fonction d'explication dans les Systèmes à Bases de Connaissances- Application à la conduite de procédés

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 25 juin 1999

pour l'obtention du

Doctorat de l'université Henri Poincaré – Nancy 1
(spécialité informatique)

par

Marc LEJEUNE

Composition du jury

<i>Président :</i>	M. Jean-Paul Haton,	Professeur à l'UHP Nancy 1 et à l'IUF
<i>Rapporteurs :</i>	Mme Marie-Odile Cordier, Mme Rose Dieng, Mme Monique Grandbastien,	Professeur à l'université de Rennes 1 Directeur de recherche à l'INRIA Sophia-Antipolis Professeur à l'UHP Nancy 1
<i>Examineurs :</i>	Mme Marie-Christine Haton, M. Martial Lallier,	Professeur à l'UHP Nancy 1 Ingénieur de recherche à l'IRSID
<i>Invités :</i>	M. Joël Frigière, M. Claude-Charles Thirion,	DISA USINOR DISA USINOR, Directeur du projet SACHEM

Remerciements

Je remercie les membres du jury, mes encadrants, les membres de l'équipe RFIA, de l'équipe MAIA, de l'équipe IIA de l'IRSID, de l'équipe SACHEM et tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à cette thèse.

Je remercie premièrement Monique Grandbastien que j'ai rencontré pour la première fois pendant mes études, bien que n'étant pas étudiant à l'ESIAL. J'ai apprécié ses qualités personnelles et sa pédagogie. Lorsque j'ai commencé cette thèse et que j'ai suivi les travaux de Gaelle Simon ou de Nicolas Van Labeke dans son équipe, j'ai pu remarqué les rapprochements entre mon sujet de thèse et les micro-mondes plutôt qu'avec les tuteurs intelligents. Ses remarques, lors de mes présentations dans l'équipe de recherche qu'elle dirige et lors des discussions qui ont suivis ont toujours été constructives. Elles montrent sa grande connaissance du domaine de cette thèse ainsi que du contexte d'application.

Lorsque j'ai croisé Rose Dieng entre les exposés des conférences Explication'96 et COOP'96, j'ai pu apprécié combien elle était reconnue par la communauté. Ses travaux sur l'acquisition de connaissances basés sur la méthodologie KADS, ceux avec Alain Giboin ou Philippe Martin, par exemple, sur les explications et ceux actuellement sur la capitalisation des connaissances m'ont toujours très intéressés. Nonobstant sa grande richesse personnelle, c'est avec plaisir que j'ai pu l'accueillir dans mon jury. Je souhaiterais lui exprimer ma gratitude.

Je souhaiterais remercier Marie-Odile Cordier d'avoir accepté de rapporter ce travail. Elle connaît le projet SACHEM par son implication dans le comité scientifique et comprend les problèmes posés par la conduite de procédés réels et complexes. Ses remarques ont été constructives.

Jean-Paul Haton m'a toujours fait confiance. Il a initié ce projet de collaboration avec l'IRSID et m'a permis de découvrir le monde de la recherche. Il m'a accueilli au sein de l'équipe RFIA qu'il a dirigé pendant de nombreuses années et m'a également permis de découvrir les problèmes de reconnaissance de la parole, de classification, d'apprentissage ou de planification. Qu'il soit remercié de m'avoir confié ce sujet, de m'avoir donné les moyens de le réaliser et d'avoir accepté de présider ce jury.

Marie-Christine Haton a accepté de diriger ce travail pendant ces trois années. Elle a toujours cru en moi et m'a aidé autant que possible pour sa réalisation. Je souhaite lui exprimer ma reconnaissance. Son esprit critique a permis l'amélioration de mon travail et de ce document.

Claude-Charles Thirion est le responsable du projet SACHEM. C'est un expert haut-fouriste passionné par son métier avec qui il est toujours agréable de travailler. Son exigence, sa tenacité et sa foi ont permis la réalisation du plus grand système expert industriel en Europe. J'ai particulièrement apprécié son contact et le remercie de m'avoir accueilli dans son équipe pour prendre en charge l'étude de la fonction d'explication. Le projet SACHEM m'a passionné, je souhaite une longue vie au système à qui il a donné le jour.

J'ai été accueilli dans l'équipe IIA de l'IRSID dirigée par Joël Frigière. Joël m'a fait confiance, il m'a intégré comme un ingénieur de recherche et m'a permis de découvrir le monde de l'industrie sidérurgique. Je souhaite le remercier chaleureusement pour ses attentions, ses encouragements ainsi que pour ses critiques constructives.

Enfin, *last but not least*, je voudrais remercier Martial Lallier, mon responsable et ami sans qui cette thèse n'aurait jamais été jusqu'au bout. Le travail que nous avons fait ensemble a toujours été intéressant, constructif et m'a beaucoup appris. Il a su m'aider et détecter, inexorablement, les failles dans mes idées. J'ai appris à le connaître, à apprécier ses remarques réfléchies et sa méthode de travail. Il m'a soutenu dans les moments difficiles, il a su regonfler ma motivation et m'a donné à cœur de réaliser ce projet. Je souhaite également lui souhaiter bonne chance pour la réalisation complète de la fonction d'explication au sein du système SACHEM à la suite de mon

travail. Je serais heureux de pouvoir retravailler avec lui un jour.

Les trois rapporteurs de mon travail et Marie-Christine, ma directrice de recherche, sont toutes quatre des femmes actives, sympathiques, qui allient qualités humaines et professionnelles. Je souhaiterais témoigner ici de mon plaisir d'avoir vu se constituer au fil des rencontres ce jury très féminin et d'avoir pu travailler avec les différents membres du jury.

Travailler avec les experts de SACHEM, avec les opérateurs de conduite de Sollac ou avec les membres de l'équipe SACHEM a été enrichissant pour moi. Grâce à Gérard Tischendorf, à Norbert Dolenc, à Claude Thirion, à Michel Barles, à Alain Gobrecht ou à Jean-Marie Librasso, j'ai découvert l'amour que les hauts-fourneaux ont pour leur métier. Je souhaite remercier chaleureusement ces experts qui m'ont accordé une partie de leur temps pourtant très précieux. Sans eux, le système SACHEM et des travaux comme cette thèse n'existeraient pas.

Il me faut remercier maintenant les membres des trois équipes dont j'ai fait parti.

- au laboratoire LORIA, j'ai intégré l'équipe RFIA dirigée par Jean-Paul Haton. Du fait des restructurations des équipes, j'ai ensuite été accueilli dans l'équipe MAIA dirigée par François Charpillat. Je souhaiterais remercier ici les membres de cette *grande famille*.
- un bureau m'a également été dévolu au sein de l'équipe IIA de l'IRSID. J'ai pu découvrir des projets passionnant dans le groupe USINOR. Je remercie pour leur accueil, leurs attentions, leurs remarques ou leurs aides Sonia, Philippe, Laurent, Mauro, Marie-Pierre, Pascal, Jean, Bernard, Emile, Didier, Patrice, Muriel, Florence, Robert et Gérard.
- l'équipe de développement SACHEM située en majorité à Sollac-Fos m'a également fait une petite place. J'ai pu discuter d'informatique, d'explication, de hauts-fourneaux, de psychologie ou de planche à voile. Je souhaiterais remercier les principales personnes qui m'ont accueilli : Lionel, Marcel, Michel, Rémy, Bruno, André, Norbert, Pierre, Alain, Christophe, Marc, Daniel, François-Marie, Edgar, Jean-Baptiste, Emmanuel, Claudine, Xavier, Pascal, Gérard et Philippe.

Je remercie encore tous ceux qui m'ont permis de vivre une expérience agréable de doctorant :

- les membres actifs de CORE DUMP¹ qui, comme moi, pensent qu'il faut améliorer la valorisation du doctorat et permettre que cette expérience riche soit bien vécue par tous. Il ont vécu avec moi des moments importants : la création de CORE DUMP, la démocratisation de la représentation des doctorants au laboratoire, les nombreuses réflexions sur la mise en place d'une charte des thèses locales, les difficultés à faire *passer le message*, la mise en place du serveur web, de l'annuaire des anciens, les problèmes de financements et d'encadrements de quelques doctorants, les tentatives d'actions pour favoriser les échanges doctorants-entreprises, les efforts de communication et de motivation pour faire vivre le mouvement des doctorants, les rencontres avec les chercheurs, directeurs, présidents . . . Grâce à eux, j'ai pu bénéficier de la formation de *président d'association* et tester d'une part l'inefficacité des explications non structurées ne reposant pas sur des bases solides et d'autre part l'importance des explications pour comprendre.
- les membres actifs de la CEC² qui m'ont permis de participer, concrètement ou par courrier électronique, à : l'échange des actions des différentes associations, la vie du mouvement des doctorants, des réflexions sur l'amélioration des conditions de travail des chercheurs non

1. association CORE DUMP des doctorants en informatique de Nancy http://www.loria.fr/CORE_DUMP/

2. Confédération des Etudiants Chercheurs <http://garp.univ-bpclermont.fr/cec/>

permanents, les relations avec les syndicats d'étudiants et d'enseignants-chercheurs, la mise en place officielle de la charte de thèse, les mouvements et retournements politiques, les nouvelles réformes, les nouveaux arrêtés, la place des doctorants dans les universités, les rencontres avec les membres du cabinet ministériel ...

Grâce à eux, j'ai appris le travail en équipe, les différences entre argumentaires et explications et les meilleures manières d'expliquer l'inexplicable.

- Mes amis doctorants, ou assimilés, avec qui j'ai pu discuter, manger, rire, nager, blaguer. C'était : Nicolas, Corinne, Laurent, Sandrine, Thomas, Valérie, Pierrot, Frédéric ou Pascale. Mais ce fut aussi Pierre, Olivier, Arnaud, Nicolas, Carlos, Raphaël, Olivier, Ludmilla, Olivier, Nicolas ou Guillaume (quoique je devrais plutôt employer d'autres noms plus appropriés ...).

Certains ont partagé mon bureau, d'autres mes loisirs, les pauses café, les repas, les activités associatives, les sorties ciné, ou piscine, la course, le triathlon, le VTT, les Vosges, le blast, les ragots, les discussions ... tout ce qui fait d'une thèse une période agréable !



Je dédicace cette thèse à

Florence et Aude,

*Florence, ma femme, à mes cotés depuis 10 ans, sans laquelle je ne suis rien, qui a su devenir
Docteur un an avant moi, nous avons encore beaucoup de promesses à tenir ensemble.
Aude, ma fille aux sourires enjoués et malicieux, aux yeux pétillants et pleins de vie, aux rires
ennivants et communicatifs.*

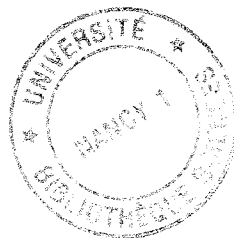


Table des matières

Avant-propos	1
Introduction générale	3
Partie I Les systèmes explicatifs	7
Introduction	9
Chapitre 1 Les principaux concepts des systèmes explicatifs	11
1.1 Le concept d'explication	12
1.1.1 Le sens commun	12
1.1.2 Qu'est-ce qu'une explication : point de vue psychologique	13
1.1.3 Les explications utilisées dans les Systèmes à Bases de Connaissances (SBC)	15
1.1.4 Apprentissage à partir d'explications	16
1.2 Termes employés	17
1.2.1 Système explicatif et fonction d'explication	17
1.2.2 Explications externes	17
1.2.3 Raisonnement explicatif et explication	18
1.2.4 Système expert, système à bases de connaissances et système d'informations	18
1.3 Introduction des explications dans les SBC	19
1.3.1 L'origine	19
1.3.2 Le but des explications	21
1.3.3 La forme des explications	23
1.4 Utilisations dans les SBC	24
1.4.1 Pour les applications médicales	25
1.4.2 Pour l'enseignement ou l'apprentissage	26
1.4.3 Pour l'aide à la conception	29

1.4.4	Pour l'aide à la décision ou au diagnostic	30
1.4.5	Pour les domaines juridiques et financiers	30
1.4.6	Pour la recherche d'informations	31
1.4.7	Pour l'aide à la conduite de procédés	31
Chapitre 2	Expliquer : une tâche de résolution de problèmes	35
2.1	Finalité de l'explication et destinataires	36
2.2	La tâche de construction des explications	36
2.2.1	Une tâche de résolution de problèmes	36
2.2.2	Un problème mal structuré	37
2.2.3	Un problème complexe	38
2.3	Dissocier construction des explications et raisonnement	38
2.4	Types d'explication	39
2.5	Interactivité avec l'utilisateur	41
2.5.1	Questions et réponses en langue naturelle	41
2.5.2	Explications interactives	43
2.6	Utilisation d'un modèle de l'utilisateur	43
2.7	Acquisition des connaissances explicatives	45
2.8	Représentation des connaissances explicatives	45
2.9	Evaluation et validation des explications	46
2.10	Construction des explications	48
2.10.1	Les principes	48
2.10.2	Une voie à explorer : l'explication à partir de cas	49
2.11	Génération des explications	50
Conclusion		51

Partie II Développement de systèmes explicatifs pour l'aide à la conduite de procédés complexes	53
Introduction	55
Chapitre 3 Systèmes d'aide à la conduite de procédés complexes	57
3.1 Caractéristiques des systèmes d'aide à la conduite de procédés complexes . .	58
3.2 Raisonnements pour la conduite de procédés complexes	60
3.2.1 Les principales architectures de raisonnement	60
3.2.2 Proposition de modèle de raisonnement tenu par les opérateurs de conduite	63
3.3 Modèle de raisonnement et fonctions du SBC d'aide à la conduite	66
3.3.1 La fonction de détection	67
3.3.2 La fonction état courant du procédé	67
3.3.3 La fonction de diagnostic	67
3.3.4 La fonction de conseil d'action	68
3.4 Construction du système explicatif et construction du SBC	68
Chapitre 4 Acquisition des connaissances explicatives	71
4.1 Les interlocuteurs	72
4.1.1 L'expert en explication	72
4.1.2 L'utilisateur lambda	73
4.1.3 Le cognicien	74
4.2 Différentes méthodes de recueil des connaissances explicatives	74
4.3 Méthodes retenues	77
4.4 Analyse de la documentation technique	78
4.5 Analyse approfondie de documents experts	78
4.6 Observation des utilisateurs et des experts en situation réelle	79
4.7 Interviews des utilisateurs et des experts en situation réelle	80
4.8 Analyse des discussions et des interviews	81
4.9 Synthèse : cinq phases pour l'acquisition des connaissances explicatives	81
4.10 Evaluation des explications	82
4.11 Structuration et modélisation des connaissances explicatives	84
Chapitre 5 Réalisation et intégration de systèmes explicatifs	87
5.1 Des explications : A qui ? Pourquoi ?	89
5.1.1 Finalité de la fonction	89
5.1.2 Destinataire cible	89

5.1.3	Interactivité avec l'utilisateur	90
5.2	Des explications : Quoi ? Sous quelle forme ?	92
5.2.1	Contenu des explications	92
5.2.2	Niveau des explications	93
5.2.3	Forme des explications	94
5.3	Des explications : Comment les créer ?	95
5.3.1	Liens avec les autres fonctions d'aide et d'apprentissage	95
5.3.2	Point d'entrée des explications	96
5.3.3	Comprendre ou prolonger le raisonnement	97
5.3.4	Construction des explications	98
5.3.5	Production des explications	102
5.3.6	Interactions de la fonction d'explication avec le SBC	102
5.4	Des explications : Et après ?	103
5.4.1	Evolution des utilisateurs ou de leurs besoins	103
5.4.2	Evolution des connaissances	104
5.4.3	Evolution du système	104
5.4.4	Evolution et mise à jour de la fonction d'explication	104
5.4.5	Retour d'expérience sur la mise en place de la fonction d'explication	106
Chapitre 6	Architecture des systèmes explicatifs	109
6.1	Exemples d'architectures de systèmes explicatifs	110
6.1.1	L'architecture du système EES	110
6.1.2	L'architecture du système ESMERALDA	111
6.1.3	L'architecture du projet Tap-Extra	114
6.1.4	L'architecture multi-agents du système SYNERGIC	115
6.2	Les éléments à prendre en compte dans l'architecture	118
6.2.1	Les bases de données	118
6.2.2	Les bases de connaissances	118
6.2.3	L'éventuel modèle de l'utilisateur	119
6.2.4	Les interactions	119
6.3	Proposition d'architecture modulaire	119
6.3.1	Caractéristiques	119
6.3.2	Structure modulaire	120
6.3.3	Modification de l'architecture modulaire	121
6.4	Vers une proposition d'architecture multi-agents	121
6.4.1	Rappel sur la définition d'un agent	121
6.4.2	Les principales contraintes	121

6.4.3	Proposition d'architecture multi-agents	122
6.4.4	Caractéristiques de l'architecture multi-agents proposée	125
6.4.5	Modification de l'architecture multi-agents	126
6.4.6	Généralisation de l'architecture multi-agents	126

Chapitre 7 Une fonction d'explication, un outil du processus de capitalisation de connaissances 131

7.1	Définitions	132
7.1.1	Capitalisation des connaissances et <i>knowledge management</i>	132
7.1.2	Objectif de la capitalisation des connaissances	133
7.1.3	Connaissances manipulées	134
7.2	Les étapes principales de la capitalisation des connaissances	134
7.2.1	D'après Dieng et alii : détecter, construire, diffuser, utiliser, évaluer et maintenir	134
7.2.2	D'après Wolf : construire, rendre accessible, vérifier, présenter et traiter le facteur humain	135
7.2.3	D'après Grundstein : repérer, préserver, valoriser et actualiser	135
7.2.4	Les points communs	136
7.3	La fonction d'explication comme outil de la capitalisation de connaissances .	136
7.3.1	Repérer	136
7.3.2	Préserver	137
7.3.3	Valoriser	138
7.3.4	Actualiser	138
7.3.5	Evolution cyclique	138

Conclusion 141



Partie III	Application industrielle	143
Introduction		145
Chapitre 8	Des explications dans SACHEM pour l'aide à la conduite de hauts-fourneaux	147
8.1	Le Contexte industriel	150
8.1.1	L'environnement sidérurgique	150
8.1.2	L'usine à fonte	152
8.1.3	Le haut-fourneau	152
8.1.4	L'activité de conduite d'un haut-fourneau	153
8.2	Le projet SACHEM	156
8.2.1	Les objectifs du projet SACHEM	156
8.2.2	Ses caractéristiques principales	156
8.2.3	Les travaux d'ergonomie dans SACHEM	158
8.3	Le cahier des charges de la fonction d'explication pour SACHEM	158
8.3.1	Le cahier des charges de la fonction « explication / justification »	158
8.3.2	Le cahier des charges de la fonction d'explication	159
8.4	Acquisition des connaissances explicatives	163
8.4.1	Les interlocuteurs	163
8.4.2	Analyse de la documentation technique	165
8.4.3	Analyse approfondie de documents experts	165
8.4.4	Protocole de recueil des connaissances explicatives	172
8.4.5	Observations pour le recueil de connaissances explicatives	173
8.4.6	Interviews pour le recueil de connaissances explicatives	175
8.4.7	Autoconfrontations pour le recueil de connaissances explicatives	180
8.4.8	Evaluation des explications	182
8.4.9	Structuration et modélisation des connaissances explicatives	182
8.4.10	Volume des connaissances explicatives	183
8.5	Réalisation et intégration de la fonction d'explication dans le système SACHEM	184
8.5.1	Des explications : A qui ? Pourquoi ?	184
8.5.2	Des explications : Quoi ? Sous quelle forme ?	184
8.5.3	Des explications : Comment les créer ?	185
8.5.4	Des explications : Et après ?	193
8.5.5	Retour d'expérience sur la mise en place de la fonction d'explication	194
8.5.6	Maquettage de la fonction d'explication pour le système SACHEM	195
8.6	Architecture du système explicatif de SACHEM	208

8.6.1	Les éléments à prendre en compte dans l'architecture	208
8.6.2	Architecture modulaire	208
8.6.3	Architecture multi-agents	209
Chapitre 9 Démarche de réalisation d'un système explicatif		213
9.1	Principales étapes	214
9.1.1	Définition du problème et analyse des besoins	214
9.1.2	Acquisition des connaissances explicatives	214
9.1.3	Développement d'une maquette	215
9.1.4	Modèle d'explication et typologie	216
9.1.5	Spécifications	216
9.1.6	Développement complet	216
9.1.7	Intégration	216
9.1.8	Evolution	217
9.2	Quelques conseils sur le cycle de développement d'un système explicatif . . .	217
9.2.1	Cycle de vie d'un SBC	217
9.3	Quelques conseils	218
9.4	Cycle de développement pour l'application SACHEM	219
Conclusion		223
Conclusion générale		225
Perspectives		229
Bibliographie		231



Table des figures

1	Présentation de la thèse selon deux axes et présentation choisie	4
1.1	Positionnement des modules d'un SBC (extrait de [HR92])	16
1.2	Exemple de règle du système MYCIN	20
1.3	Exemple de portion de graphe historique du système MYCIN	21
1.4	Exemple de production d'explication par le système MYCIN	22
1.5	L'outil EMYCIN et les suites de MYCIN (extrait de [HR92])	22
2.1	Le dialogue explicatif pour GENE (extrait de [Gene96])	42
3.1	Architecture générale d'un système de surveillance en ligne (extrait de [Basseville et al.96])	60
3.2	Architecture cognitive humaine (extrait de [Richard90])	61
3.3	Architecture fonctionnelle des traitements (extrait de [Hoc91])	62
3.4	Modèle du raisonnement tenu par les opérateurs selon Rasmussen (extrait de [Damme et al.92])	64
3.5	Le raisonnement de conduite et les quatre fonctions du SBC	66
4.1	Les cinq phases de notre proposition d'acquisition des connaissances explicatives	82
5.1	Le cadre de la fonction d'explication	88
5.2	La distinction entre explications globales et locales	97
6.1	La structure du système EES (extrait de [Moore95])	111
6.2	L'architecture du système explicatif de EES (extrait de [Moore95])	112
6.3	Exemple de représentation de la construction du dialogue (extrait de [Lemaire92c])	113
6.4	L'architecture du système ISEE (extrait de [Wickler et al.93])	114
6.5	L'architecture du système Tap-Extra (extrait de [Lambert et al.97c])	115
6.6	La structure du système Tap-Extra (extrait de [Lambert et al.97c])	116
6.7	L'interface homme-machine du système Tap-Extra (extrait de [Lambert et al.97c])	117
6.8	Communications entre l'agent explicatif et les autres agents du système SYNERGIC (extrait de [PB94])	117
6.9	Stratégie de réponse à la question Comment (extrait de [PB94])	117
6.10	Architecture modulaire de la fonction d'explication	120
6.11	Architecture multi-agents de la fonction d'explication	124
6.12	Architecture multi-agents étendue de la fonction d'explication	127
8.1	La filière fonte	151
8.2	L'usine à fonte articulée autour du haut-fourneau	152

8.3	Détection précoce de l'expert intégrée dans SACHEM	157
8.4	Fonctionnement du système SACHEM	157
8.5	Classement des utilisateurs	164
8.6	Le graphe complet reformulé de M. Duperray (échelle 1/6)	171
8.7	Le graphe reformulé réduit au réglage thermique	172
8.8	Exemple d'explications de la détection de SACHEM	187
8.9	Le passage des sous-problèmes aux problèmes majeurs, d'après Duperray	189
8.10	Exemple d'explications des recommandations d'action de SACHEM	190
8.11	Exemple de vue d'explication globale	191
8.12	Maquette de recueil des explications	196
8.13	Maquette de recueil des explications (deuxième exemple)	197
8.14	Maquette, vue d'explication de la détection du phénomèneHF de Garni	198
8.15	Maquette, vue d'explication de la rubrique CHT	199
8.16	Maquette, vue d'explication de la recommandation d'action	200
8.17	Maquette, vue d'explication du graphe causal	201
8.18	Maquette, vue d'explication de la vue EGHF	202
8.19	Maquette, vue de synthèse des problèmes ETHF	203
8.20	Maquette, vue d'explication du problème de Garni non détecté	204
8.21	Maquette, vue d'explication du problème de Garni en phase de garnissage	205
8.22	Maquette, vue d'explication du problème de Garni en phase de garni formé	206
8.23	Maquette, vue d'explication du problème de Garni en phase de dégarnissage	207
8.24	Architecture modulaire de la fonction d'explication pour le système SACHEM	209
8.25	Architecture multi-agents de la fonction d'explication pour le système SACHEM	210
9.1	Processus de développement d'un SBC (extrait de [HR92])	217

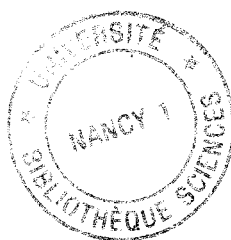
Avant-propos

Cette thèse a fait l'objet d'une convention CIFRE³ entre l'IRSID⁴ et le laboratoire LORIA⁵. Elle a bénéficié d'une aide financière de l'ANRT⁶.

Certains morceaux de la thèse s'appuient sur des informations confidentielles sur le projet SACHEM, sa structure, ou sur l'expertise de conduite des hauts-fourneaux de Sollac. Ces informations sont confidentielles et ne doivent pas être publiées dans cette thèse, en accord avec la clause de confidentialité signée au début de la thèse entre le laboratoire LORIA et l'IRSID.

La collaboration industrielle de cette thèse implique également que des personnes non spécialistes du domaine seront amenées à lire cette thèse. Nous essaierons d'être clairs et de positionner régulièrement les différents paragraphes dans la structure globale du document. Nous nous efforcerons aussi de replacer le problème traité dans la construction des systèmes explicatifs. Nous nous excusons, à l'avance, pour les lecteurs connaissant l'intelligence artificielle, les systèmes à bases de connaissances et les problèmes posés par les explications, qui risquent d'être lassés par ces précisions.

Merci de votre compréhension



3. Convention Industrielle de Formation par la Recherche

4. Institut de Recherche de la Sidérurgie française, du groupe USINOR

5. Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications. Ce laboratoire est une unité mixte de recherche (UMR 7503) entre le CNRS, l'INRIA-Lorraine, l'université Henri Poincaré -NancyI, l'INPL et l'université de Nancy II <http://www.loria.fr/>

6. Association Nationale de la Recherche Technique

Introduction générale

Le but de cette thèse est d'étudier l'intégration d'une fonction d'explication dans un système à bases de connaissances, dans le contexte de l'aide à la conduite de procédés complexes. Le contexte applicatif pourra être une centrale thermique ou nucléaire, un réseau d'irrigation, un four électrique, un laminoir ou un haut-fourneau.

Un système à bases de connaissances (SBC), également appelé système expert, peut s'appliquer sur tout domaine comportant une expertise. L'expertise est modélisée et intégrée dans un système qui aide alors l'utilisateur à résoudre un problème. Il existe par exemple des systèmes d'aide au diagnostic médical, des systèmes d'aide à la conception ou des systèmes d'aide à la conduite de procédés industriels ; ces derniers nous intéressent particulièrement. Ces systèmes intègrent des expertises souvent importantes, mettent en œuvre des raisonnements complexes ou s'appuient sur des données nombreuses. Dans le cas d'expertises complexes, le système n'agit pas directement mais conseille l'utilisateur dans sa tâche. L'action à effectuer par l'utilisateur, peut être un traitement prescrit à la suite d'un diagnostic dans le domaine médical, ou la modification de quantité de coke chargée dans un haut-fourneau. Elle est prise par l'homme en suivant complètement ou partiellement les informations ou les conseils donnés par le système.

Les conseils d'action donnés par le système, et de façon plus générale tous les résultats du système, doivent donc être complètement compris par les utilisateurs. Améliorer la compréhension des résultats du système à bases de connaissances, faire accepter un résultat, faire partager un raisonnement ou faire apprendre sont les tâches de la fonction d'explication que l'on appelle également système explicatif. Ceci rejoint la finalité des explications humaines données dans un contexte quelconque. On peut donc faire le parallèle entre les explications humaines et les explications transmises par des systèmes informatiques. Dans ce contexte, Roger Schank écrit : *« Pourquoi le processus d'explication mérite-t-il un intérêt particulier ? La réponse, en bref, est que l'explication est le cœur de l'intelligence. L'explication est le processus par lequel nous donnons un sens au monde qui nous entoure »* [Schank86]. Néanmoins nous ne cherchons pas ici à transmettre des explications aussi riches, complexes, adaptées au contexte et au destinataire que celles que l'on peut avoir dans une relation homme-homme, la tâche serait par trop complexe.

Cette thèse a l'objectif ambitieux d'être conçue comme un *guide à la réalisation d'un système explicatif pour l'aide à la conduite de procédés complexes*, comme nous allons le voir ci-dessous. Nous y avons étudié les travaux existants en matière de systèmes explicatifs et ceux relatifs au contexte de la conduite de procédés complexes. Nous avons ensuite analysé les contraintes particulières dues au domaine fortement contraint de l'application puis nous avons émis des propositions permettant de réaliser une fonction d'explication. Ces propositions concernent la tâche d'acquisition des connaissances explicatives, la réalisation des explications, ou le choix de l'architecture logicielle.

Comme le montre la figure 1, deux possibilités de présentation de la thèse s'offraient à nous :
– suivre la chronologie d'un projet informatique, avec tout d'abord le cahier des charges et

l'étude du besoin, puis la modélisation et la typologie des explications et enfin la réalisation de la fonction. Pour chaque étape, nous pouvons étudier les idées avancées dans la littérature, faire des propositions pour le contexte de l'aide à la conduite des procédés et décrire l'application pour les hauts-fourneaux ;

- analyser les idées avancées dans la littérature, faire des propositions pour le contexte de l'aide à la conduite des procédés et décrire l'application pour les hauts-fourneaux. Pour chacun de ces points, nous reprenons les trois grandes étapes de développement présentées ci-dessus.

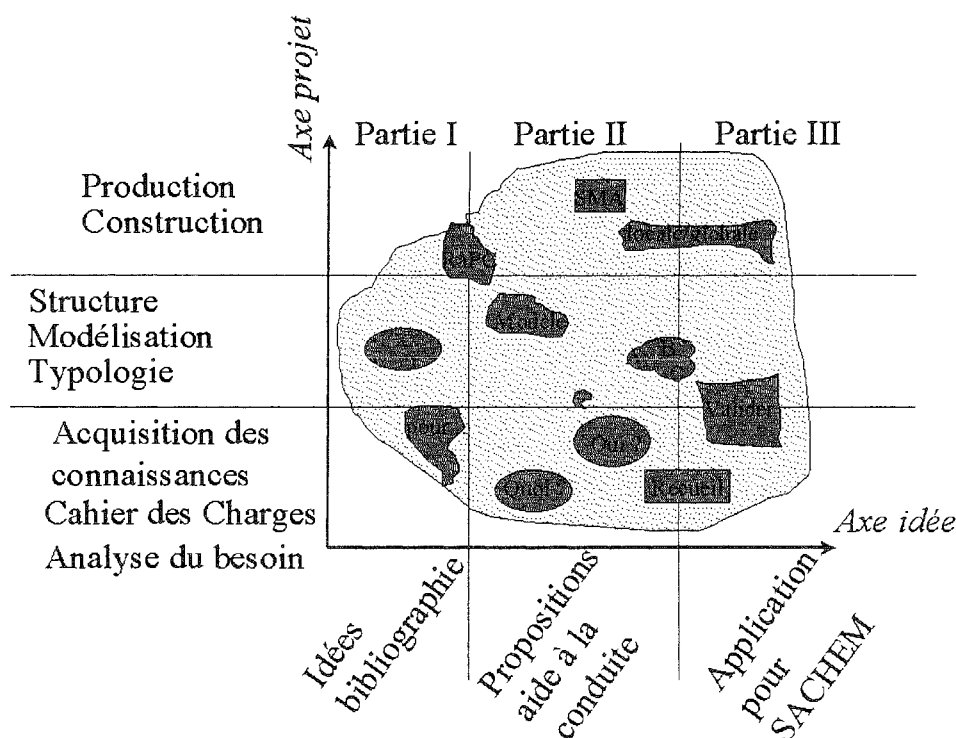


FIG. 1 – Présentation de la thèse selon deux axes et présentation choisie

Nous avons choisi la deuxième possibilité qui nous permet de bien détailler les idées des nombreux travaux sur les explications en intelligence artificielle (partie 1), les propositions concrètes correspondant au domaine de la conduite de procédés (partie 2) et l'application de ces propositions au domaine de la conduite de hauts-fourneaux (partie 3). Nous allons donc analyser dans chaque partie les principales étapes relatives à la construction d'un système explicatif. Ce choix aura ainsi pour conséquences induites des redites au long de ce document.

Dans le premier chapitre de la partie bibliographique, nous allons définir le terme explication et analyser différentes applications possibles dans les systèmes à bases de connaissances. Pour cela, nous allons d'abord nous intéresser à ce que l'on appelle une « explication » dans le sens commun. Nous regarderons l'interprétation de ce terme faite par les psychologues et le point de vue des concepteurs de SBC explicatifs. Nous n'oublierons pas de définir les principales notations utilisées dans la thèse, nous y verrons l'origine de l'introduction d'explications dans les SBC, avant de mentionner les principales applications des systèmes explicatifs.

Dans le deuxième chapitre de cette même partie, nous nous intéresserons à la réalisation de la tâche d'explication en détaillant les mécanismes utilisés, les types d'explications possibles, les possibilités d'interaction avec l'utilisateur et enfin celles de construction et de production d'explications. Nous verrons alors quelques-uns des nombreux travaux existants en France, en Europe et dans le monde.

La deuxième partie de ce travail propose des techniques de construction et de production d'explications, adaptées au contexte de la conduite de procédés industriels complexes. Toutes les étapes du cycle de développement d'un système explicatif, indispensables pour sa réalisation, y sont décrites. Dans un premier chapitre (chapitre 3), nous préciserons en effet le contexte d'application et les contraintes liées aux systèmes d'aide à la conduite de procédés complexes. Nous utiliserons pour cela un modèle simplifié du raisonnement des opérateurs de conduite en quatre tâches principales.

Le chapitre 4 sera consacré au problème délicat de l'acquisition des connaissances explicatives. Nous allons donc préciser les différents intervenants de ce processus et analyserons et critiquerons les principales techniques existantes. Ainsi nous proposerons une réalisation de cette phase d'acquisition des connaissances explicatives en cinq étapes distinctes. Nous proposerons également une aide à l'évaluation des connaissances recueillies avant d'aborder rapidement le problème de la structuration et de la modélisation des connaissances explicatives.

Le troisième chapitre de cette partie (chapitre 5) est un chapitre clé dans nos travaux sur les systèmes explicatifs. Nous nous placerons dans un contexte de rédaction d'un cahier des charges pour la réalisation d'un système explicatif. Nous utiliserons la métaphore des explications données en réponses aux questions du lecteur et détaillerons ainsi tour à tour « A qui? » et « Pourquoi? » il faut dispenser des explications, « Quelles explications » il est possible de proposer et « Comment les créer? ». Enfin, la question « Et après? » est importante pour le devenir du système explicatif. Dans ce chapitre, nous étudierons donc la finalité des explications, les interactions avec les utilisateurs, la forme des explications et les liens entre la fonction d'explication et les autres fonctions. Quatre explications locales aux fonctions du système et une explication globale pourront être proposées. Elles permettront de comprendre le raisonnement du système ou de le prolonger. Enfin, pour une meilleure adéquation entre les besoins des utilisateurs et les explications, nous proposerons trois mécanismes simples permettant facilement l'évolution des explications.

Le chapitre 6 sera consacré à deux types particuliers d'architecture logicielle d'un système explicatif. Nous verrons qu'une structuration en trois modules permet de répondre de façon simple et efficace au problème posé. L'étude des systèmes multi-agents nous permettra de voir comment mieux adapter et faire évoluer l'architecture logicielle. Ainsi nous pourrions proposer une architecture multi-agents reposant sur les structures des explications locales et globales.

Dans un dernier chapitre de cette partie (chapitre 7), nous verrons pourquoi la fonction d'explication peut s'intégrer dans la démarche de capitalisation des connaissances et comment elle peut être utilisée.

Dans la troisième partie, nous appliquerons nos propositions au contexte de la conduite des hauts-fourneaux et décrirons notre application réalisée pour USINOR.

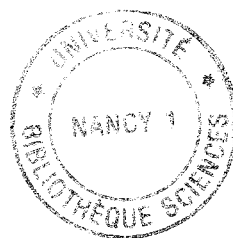
Nous détaillerons dans le chapitre 8 le contexte industriel du projet SACHEM, l'usine sidérurgique et plus spécialement le haut-fourneau. En précisant les besoins en explications des opérateurs de conduite, nous décrirons le cahier des charges de la fonction d'explication pour SACHEM. Nous aborderons alors les phases d'acquisition des connaissances puis de réalisation de la fonction correspondant aux besoins identifiés. Comme dans la partie précédente, nous utiliserons

le paradigme multi-agents pour proposer une architecture facilement évolutive.

Enfin, nous synthétiserons notre démarche de conception d'un système explicatif dans le dernier chapitre. Nous préciserons alors les différentes étapes du processus de réalisation d'un tel système, en nous basant sur le cycle de développement de systèmes à bases de connaissances et préciserons quelques conseils utiles pour la réalisation d'un système explicatif.

Première partie

Les systèmes explicatifs

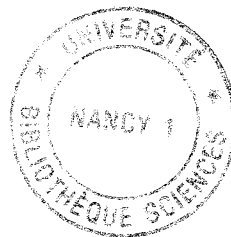


Introduction

L'introduction d'explications dans les système à bases de connaissances (SBC) date des premiers systèmes avec MYCIN. En vingt ans, de nombreux travaux ont été consacrés à la manière de construire les explications et de les intégrer dans les SBC. Les explications étaient au départ destinées aux concepteurs des SBC. Elles sont, maintenant, de plus en plus destinées aux utilisateurs. Les explications prennent des formes variées suivant les destinataires, les possibilités de dialogue du système, l'objectif des explications ou le domaine d'application du système.

Dans un premier chapitre, nous allons définir le terme explication et ses différentes applications possibles dans les SBC. Nous allons d'abord nous intéresser à ce que l'on appelle une « explication », d'après le sens commun grâce aux définitions du dictionnaire Larousse et de l'historique de ce terme, d'après la vision des psychologues et enfin d'après le point de vue des concepteurs de SBC explicatifs. Ceci nous permettra de définir les principaux termes utilisés dans la thèse. Nous décrirons ensuite l'origine de l'introduction d'explications dans les SBC, avec les différents buts et formes possibles de celles-ci, avant de mentionner les principales applications des systèmes explicatifs.

Dans un deuxième chapitre, nous nous intéresserons à la réalisation de la tâche d'explication. Pour cela, nous détaillerons les mécanismes utilisés, les types d'explications possibles, les possibilités d'interactions avec l'utilisateur, les possibilités de construction et de production d'explications. Nous nous appuierons pour cela sur les nombreux travaux existant en France, en Europe ou dans le monde.



Chapitre 1

Les principaux concepts des systèmes explicatifs

Sommaire

1.1	Le concept d'explication	12
1.1.1	Le sens commun	12
1.1.2	Qu'est-ce qu'une explication : point de vue psychologique	13
1.1.3	Les explications utilisées dans les Systèmes à Bases de Connaissances (SBC)	15
1.1.4	Apprentissage à partir d'explications	16
1.2	Termes employés	17
1.2.1	Système explicatif et fonction d'explication	17
1.2.2	Explications externes	17
1.2.3	Raisonnement explicatif et explication	18
1.2.4	Système expert, système à bases de connaissances et système d'informations	18
1.3	Introduction des explications dans les SBC	19
1.3.1	L'origine	19
1.3.2	Le but des explications	21
1.3.3	La forme des explications	23
1.4	Utilisations dans les SBC	24
1.4.1	Pour les applications médicales	25
1.4.2	Pour l'enseignement ou l'apprentissage	26
1.4.3	Pour l'aide à la conception	29
1.4.4	Pour l'aide à la décision ou au diagnostic	30
1.4.5	Pour les domaines juridiques et financiers	30
1.4.6	Pour la recherche d'informations	31
1.4.7	Pour l'aide à la conduite de procédés	31

Introduction

Le but de ce chapitre est de définir explicitement le terme « explication », concept le plus utilisé dans cette thèse et de voir son application dans le domaine des systèmes à bases de connaissances (SBC).

Les différentes notations utilisées dans cette thèse et relatives aux systèmes explicatifs et aux systèmes à bases de connaissances seront ensuite décrites.

Nous pourrions alors aborder le cas particulier des apprentissages à partir d'explications avant de nous intéresser à l'introduction des explications dans les systèmes à bases de connaissances. Le système MYCIN, pionnier en la matière, est un bon exemple.

Nous verrons, par la suite, les principaux systèmes ayant intégré depuis des explications. Ces systèmes ont été regroupés par domaine d'application, comme par exemple les deux plus grands domaines que sont le domaine médical et celui de la formation (appelé également EIAO⁷).

1.1 Le concept d'explication

1.1.1 Le sens commun

Pour commencer à définir le concept d'explication, prenons la définition du sens commun, c'est-à-dire les définitions du dictionnaire et du dictionnaire historique des mots « expliquer » et « explication » :

Définition du mot « Expliquer » : *v.tr. Faire comprendre ou faire connaître en détail par un développement oral ou écrit; éclaircir, exposer : expliquer un problème, un projet. || être une justification, apparaître comme une cause : le danger d'avalanche explique qu'on ne peut construire à cet endroit. || commenter : expliquer un auteur [...] [Larousse86]*

Historique du mot « Expliquer » : *Expliquer est un emprunt savant (XIV^e s) au latin explicare «dérouler», «déployer, développer» au propre et au figuré. Dans son premier emploi connu pronominal, le verbe signifie peut-être «se développer». Il est ensuite attesté (v. 1450) au sens de « faire comprendre (ce qui paraît obscur) », puis (XVI^e s) de « faire comprendre (qqch) en développant ». De là vient l'emploi pronominal s'expliquer (1580 Montaigne) pour « être rendu intelligible ». Les emplois du verbe se développent à l'époque classique : « faire connaître sa pensée » et « rendre raison (d'un fait, etc.) » sont tous deux attestés en 1651 (Corneille), puis « faire une mise au point sur un malentendu » (1662). Du sens transitif « rendre clair » vient l'emploi spécial expliquer du latin « le traduire » (1668 Molière) acception disparue. Par extension le verbe signifie « faire connaître la cause de (qqch) » (1677 Racine). [...] [Robert89]*

Définition du mot « Explication » : *n. f. action d'expliquer, de s'expliquer; commentaire, justification, discussion [...] [Larousse86]*

Historique du mot « Explication » : *Le nom d'action explication emprunt au latin classique explicatio « action de présenter clairement » a eu une évolution sémantique parallèle à celle du verbe. Introduit (1321-1323) avec le sens de « développement destiné à faire comprendre quelque chose », il désigne ensuite ce qui donne la raison d'un comportement (1672 Molière) ou d'un fait (1690 Furetière). [...] [Robert89]*

⁷. s'interprète maintenant comme Environnements Interactifs Assistés par Ordinateur, et non plus comme précédemment Enseignement Intelligent Assisté par Ordinateur

En résumé, on peut dire que d'après le sens commun, l'explication est destinée à *faire comprendre* par un développement oral ou écrit.

1.1.2 Qu'est-ce qu'une explication : point de vue psychologique

Nous avons essayé de définir les processus mis en œuvre lors de la transmission d'explications entre des hommes, à travers les travaux de psychologues ou de sociologues. Ces travaux ne sont pas directement liés à nos recherches mais pourraient nous permettre d'identifier des points forts et des points délicats.

Il est difficile de trouver des travaux de référence détaillant les trois points qui nous intéressent :

1. les mécanismes de construction de l'explication,
2. la structure des explications produites par une personne,
3. et leur influence sur la personne à qui est destinée cette explication.

D'après nos entretiens avec M. J.C. Prêheur, Maître de Conférences en Psychologie à Nancy II, nous pouvons, au moins, donner à l'explication deux sens qui nous indiquent plusieurs champs d'étude :

1. L'« explication » du monde ou de la réalité par les sciences (par exemple, Einstein explique ...), dans ce cas elle intéresse la philosophie des sciences, l'épistémologie qui se demande « Comment la science explique-t-elle ... ? »
2. L'« explication » qui est une des démarches de tout enseignant. Dans ce cas il faut se tourner vers la didactique de la discipline enseignée.

1.1.2.1 Explication du monde par les sciences

Le célèbre psychologue Piaget, qui fut à l'origine de l'épistémologie génétique et de nombreux travaux sur le développement de la pensée et du langage chez l'enfant, se situe tout à fait dans le cadre du premier sens évoqué ci-dessus. Dans [Piaget98], à propos de la possibilité que des modèles abstraits soient explicatifs, il dit : « *J'entends par expliquer, reconstituer le mode de production des phénomènes (en dépit des interdictions positivistes!)* ».

Il donne aussi quelques exemples : « *Einstein a réduit la gravitation à un modèle géométrique, mais en physicalisant l'espace et en expliquant ses courbes par l'action des masses, de telle sorte qu'il n'y a plus de contenant indépendant (l'espace) et de contenu épousant ses formes, mais un seul tout indissociable en interaction* ». La physicochimie pourrait expliquer la vie, « *expliquer en physique, c'est déduire le phénomène en ne se bornant pas à rendre ses lois cohérentes mais en montrant pourquoi il est nécessaire, ou pourquoi il est le plus probable, une fois certaines conditions réalisées* » [Piaget98].

1.1.2.2 Comprendre, c'est construire une représentation

Bien que le mécanisme de construction d'explications ne soit pas explicitement décrit dans la littérature, on peut étudier la notion, qui lui est liée, de compréhension. Cette compréhension est importante puisque les explications sont essentiellement destinées à « faire comprendre » comme nous l'avons vu d'après le sens commun ou comme nous le reverrons en étudiant les buts des explications dans les systèmes à bases de connaissances aux paragraphes 1.3.2 et 5.1.1.

D'après J.F. Richard, « comprendre », c'est « construire une représentation ». Or la construction des interprétations est, d'après lui, la question-clé de la psychologie cognitive [Richard90].

Dans [Richard et al.90a], les auteurs précisent par ailleurs que « *comprendre, c'est construire une représentation, c'est-à-dire élaborer une interprétation qui soit compatible à la fois avec les données de la situation, symboliques (énoncé, texte, dessin) ou matérielles (objets physiques)* ».

Richard distingue ainsi plusieurs sens du mot « comprendre » à partir des différents processus de construction des représentations [Richard90] :

- comprendre, c'est particulariser un schéma. C'est un processus guidé par les connaissances : sélection d'un schéma en mémoire avec des relations préconstruites, remplacement des variables du schéma par les informations spécifiques fournies sur la situation ;
- comprendre, c'est construire une structure conceptuelle. On va construire une structure conceptuelle par inférences (c'est-à-dire un réseau complexe de relations) en utilisant les informations d'un texte et l'ordre dans lequel elles sont fournies. Les relations construites vont du particulier au général pour une représentation pour comprendre (comprendre un récit) ou du général au particulier pour une représentation pour agir (résoudre un problème) ;
- comprendre, c'est construire une représentation particularisée de situation (ou modèle mental). On va construire une situation spécifique, particularisée dans ses moindres détails, y compris ses caractéristiques spatiales, à partir des informations fournies par un texte, lesquelles sont plus générales. La construction nous donne une image de situation, réalisée par des inférences qui particularisent ;
- comprendre, c'est raisonner par analogie avec une situation connue. Cette construction d'une représentation fait appel principalement à la mémoire et se trouve guidée par les connaissances. La solution obtenue est construite par mise en correspondance avec le processus connu. L'information récupérée en mémoire peut être générale, analogue à un schéma (c'est le cas d'une représentation construite pour comprendre), elle sert alors de guide pour construire les relations entre les objets de la situation, ou concerner une situation relativement spécifique et le souvenir d'un processus de solution mise en œuvre (c'est le cas d'une représentation construite pour agir).

1.1.2.3 Influence de la source de communication

Dans un ouvrage de référence de la psychologie cognitive déjà mentionné, on trouve, dans le domaine de la communication orale, des informations relatives à l'influence de la source de communication.

Selon des travaux sur la suggestion, on peut identifier trois grandes caractéristiques de la source susceptibles d'avoir un effet sur l'efficacité du message [Richard et al.90b] :

- la crédibilité : la crédibilité de la source résulte de la compétence et de la confiance accordées à la source par un ou plusieurs individus. Selon les travaux cités et décrits dans [Richard et al.90b], une source crédible serait donc une personne perçue à la fois comme possédant des informations pertinentes, *vraies*, et désireuse de transmettre ces informations sans les dénaturer, c'est-à-dire digne de confiance ;
- l'attractivité : selon les travaux décrits, lorsque la source de la communication est attractive, le changement d'attitude est médiatisé par un procès d'identification, le sujet adopte le point de vue de la source sur la base des sentiments qu'il a pour elle ;
- le pouvoir de la source à distribuer, ou non, des récompenses et des punitions.

D'autres éléments influant sur la suggestion sont [Richard et al.90b] :

- les caractéristiques du récepteur : pour qu'un message ait un impact persuasif, il faut successivement que le récepteur prête au message un minimum d'attention, puis qu'il le com-

prenne, qu'il l'accepte plus ou moins, qu'il mémorise sa nouvelle opinion et qu'enfin il se comporte selon sa nouvelle attitude ;

- la motivation du sujet: l'implication personnelle du sujet est un des facteurs motivationnels importants (plus le sujet est impliqué par le contenu du message et ses conséquences, plus il est motivé à fournir un effort cognitif ayant pour but d'évaluer la pertinence de l'argumentation).

Ces travaux montrent que la notion de compréhension est fortement corrélée avec celle d'explication. Nous chercherons dans la suite à faire en sorte que les explications soient toujours adaptées aux besoins des destinataires de ces explications et évoluent avec leurs besoins, leurs connaissances ou leurs tâches.

1.1.3 Les explications utilisées dans les Systèmes à Bases de Connaissances (SBC)

Les concepteurs de systèmes à bases de connaissances (SBC) définissaient à l'origine la notion d'explication par : « *Le terme explication désigne une structure explicite qui peut être utilisée de manière interne pour le raisonnement et l'apprentissage, et de manière externe pour expliquer à un utilisateur les résultats de ce raisonnement ou de cet apprentissage. Dans les systèmes à base de règles, par exemple, l'explication comprend les étapes intermédiaires du processus du raisonnement, c'est-à-dire une trace des règles qui ont été activées, une structure de preuves, etc.* » [Giboin95].

L'explication du raisonnement était donc destinée aussi bien au concepteur du SBC (c'était donc dans ce cas un outil de débogage) qu'à son utilisateur. De plus l'explication était *simple*, elle ne comportait que la liste des règles déclenchées, elle était donc difficilement lisible et exploitable même par les concepteurs, et surtout par les utilisateurs du SBC.

L'utilisation actuelle des explications dans les SBC est plus générale que l'exploitation de ces premières explications. Ainsi que l'a résumé Swartout dans l'*Encyclopedia for Artificial Intelligence*, les explications sont maintenant destinées à décrire ce qu'un système informatique fait, comment il travaille et pourquoi ses actions sont pertinentes (« *what a computer system does, how it works, and why its actions are appropriate* ») [Swartout92].

La figure 1.1, extraite du même ouvrage de référence de l'intelligence artificielle [HR92], dans le paragraphe consacré aux systèmes experts, positionne les différents modules d'un SBC suivant leur niveau cognitif. Le niveau le plus haut (communication) est celui demandant le plus d'*intelligence*. Bien que ce schéma ne soit pas forcément général, il permet de se rendre compte de la place du module «Explication/Justification». On peut voir que ce module est positionné au même niveau que les mécanismes de contrôle ou les stratégies d'optimisation.

De façon générale, on peut dire que la tâche de construction d'explication est une tâche hautement cognitive. Comme toute tâche dite intelligente, elle est alors complexe et nécessite une attention particulière.

Néanmoins, le terme explication est assez vague, il recouvre des notions variées selon le type de questions qu'il est possible de poser, l'objectif, le contenu et la forme des explications, l'utilisateur visé, le contexte applicatif et ses contraintes, etc.

Il n'est pas possible de définir un seul type d'explication utilisable pour tous les SBC. Nous verrons ainsi dans les paragraphes 1.4 et suivants les différentes explications introduites dans des SBC. Nous décrirons dans le chapitre suivant les principaux aspects des explications et reprendrons ces différents aspects pour proposer des explications compatibles avec les contraintes des systèmes d'aide à la conduite de procédés et répondant aux besoins des opérateurs de conduite.

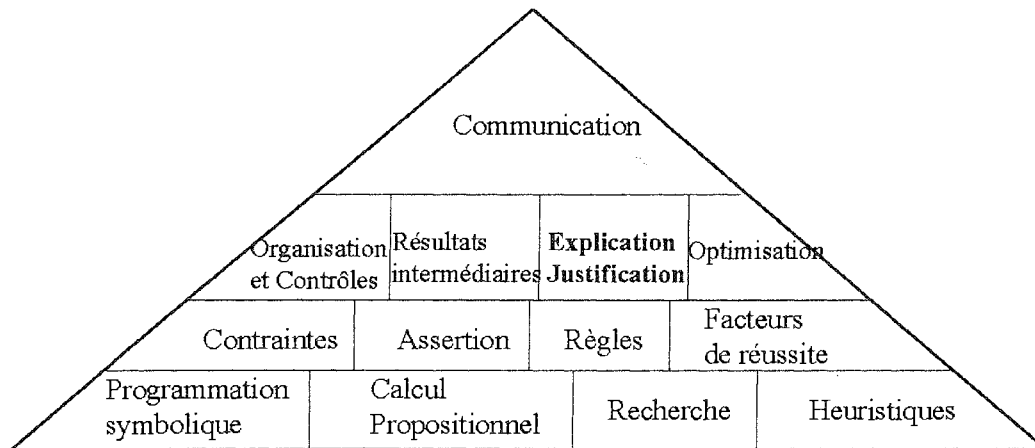


FIG. 1.1 – Positionnement des modules d'un SBC (extrait de [HR92])

1.1.4 Apprentissage à partir d'explications

Bien que l'utilisation particulière des explications faite dans le contexte de l'apprentissage ne soit pas dans le cadre de nos recherches, il nous est paru important de ne pas passer sous silence cette notion d'explication. Nous allons donc décrire dans ce paragraphe les idées principales de ce contexte de recherche et mentionner quelques-uns des nombreux travaux sur ce sujet. Nous invitons les lecteurs intéressés à utiliser les références citées pour en savoir plus sur le sujet.

Dans le cadre de l'apprentissage, on parle, en anglais, de « *Explanation-Based Learning* » (noté EBL) que l'on peut traduire par « apprentissage à partir d'explications », ou « apprentissage basé sur les explications » [Marquis89].

C'est une méthode analytique qui consiste à utiliser des connaissances spécifiques d'un domaine, la théorie, pour traiter des exemples, en reliant des caractéristiques de ces exemples à la définition de concepts. La preuve ainsi construite constitue une explication de l'exemple [Kassel et al.90]. D'une façon générale, l'explication peut être généralisée par le système pour modifier ou compléter sa théorie [Mitchell et al.86].

C'est un champ de recherche en marge de l'étude des explications dans les SBC et de notre travail. Le lecteur pourra néanmoins se référer, par exemple, aux travaux d'Armengol et Plaza [Armengol et al.95], ou de Rosenbloom autour du niveau de connaissance (introduit par Newell dans [Newell82] et commentés dans [Newell93]) et des systèmes d'apprentissage, aux nombreux travaux de David B. Leake sur le sujet et particulièrement à propos du problème de l'évaluation des explications générées par raisonnement à partir de cas [Leake95] [Leake96], [Leake92], ou encore à [Sooriamurthi et al.95], [Hair et al.92], [Kambhampati et al.91], [Klein94],

[Rosenbloom et al.90] ...

Quelques applications peuvent être mentionnées, comme le système **PRODIGY** implantant un apprentissage de cette forme [Knoblock et al.91], l'intégration d'apprentissage basé sur les explications pour les réseaux de neurones [Thrun et al.93], les grammaires étudiées par Neumann [Neumann94] ou encore les travaux de Barletta et Mark [Barletta et al.88].

Ces travaux sur l'apprentissage à partir d'explications reposent en partie sur le fait que les explications sont habituellement considérées comme des chaînes causales [Schank et al.94]. On considère les explications comme les hypothèses, les causes ou les éléments déclencheurs de l'apparition d'un fait pour des raisonnements abductifs ou des raisonnements inductifs.

C'est dans ce cadre que se situe des travaux entre l'IRSID et le LORIA sur les explications de défauts, de tôles sortant du laminoin, à partir de modèles de Markov cachés (que l'on appelle MMC ou *HMM*, pour *Hidden Markov Model*).

Donnons un exemple simple, extrait de [Haton et al.91], à propos de la construction d'hypothèses (raisonnement inductif) en logique mathématique non classique :

soit la connaissance *Tous les éléphants sont gris* et l'observation *Clyde est gris*. L'hypothèse *Clyde est un éléphant* est alors une connaissance nouvelle qui est une explication de l'observation *Clyde est gris* (elle explique pourquoi *Clyde est gris*).

1.2 Termes employés

Nous avons vu rapidement le sens commun des explications, l'interprétation des psychologues et le sens des explications introduites dans les systèmes à bases de connaissances.

Avant de pouvoir analyser plus longuement l'origine des explications dans les SBCs, les principaux buts et formes de celles-ci, nous devons définir les principaux termes employés. Nous commencerons par les notions centrales relatives aux explications avant d'aborder celles relatives aux systèmes que l'on appelle systèmes à bases de connaissances ou systèmes experts.

1.2.1 Système explicatif et fonction d'explication

Certains auteurs parlent de fonction ou de module d'explication, alors que d'autres préfèrent le terme de système explicatif mais, en fin de compte, l'idée est la même, c'est de doter un SBC de capacités explicatives. Cette idée ne préjuge pas du moyen employé, qui peut être soit d'augmenter les possibilités du SBC en conservant le caractère unique du système, soit de créer un nouveau système dédié aux explications inter-agissant avec le SBC.

A priori, les deux premières notions sont plus simples et traduisent le fait que l'on adjoint des capacités explicatives à un système à bases de connaissances. La troisième est plus ambitieuse et considère que l'on doit créer un véritable système pour construire et produire les explications, elle insiste sur la difficulté de cette tâche qui doit traiter pratiquement tous les aspects des systèmes à bases de connaissances (acquisition et modélisation des connaissances, interactions avec l'utilisateur et le système, construction et production des explications, développement de la fonction ou du système ...).

Dans la suite, nous supposerons équivalentes les notions de « fonction d'explication », « module explicatif » et « système explicatif ».

1.2.2 Explications externes

Nous nous focaliserons dans cette thèse sur les « explications externes » destinées aux utilisateurs du système. Les « explications internes » destinées aux informaticiens concepteurs du

SBC (c.f. § 1.1.3) ne nous intéressent pas puisque notre travail, décrit dans les parties II et III, se situe au niveau des interactions entre la machine et les utilisateurs, que ceux-ci soient novices ou experts dans le domaine du SBC. Cette focalisation est plutôt une orientation prise en fonction du domaine et des besoins importants des utilisateurs, qu'une véritable notation.

L'évaluation du système final (incluant des explications), en terme de qualité, ainsi que l'évaluation financière du projet de création du système sont faites par les utilisateurs finaux, ou par les décideurs au vu de l'intérêt pour le travail des utilisateurs finaux. C'est donc auprès de ces utilisateurs qu'il nous paraît important de faire un effort de compréhension et c'est donc bien à eux que s'adressent les explications sur lesquelles nous travaillons.

1.2.3 Raisonnement explicatif et explication

Actuellement, alors que le sens commun ne le précise pas, la majorité des travaux distinguent raisonnement explicatif et explication. Le « raisonnement explicatif » est le processus de conception de l'explication, alors que le terme « explication » est réservé au produit de ce raisonnement [Balacheff90a] [Lemaire92c].

Ceci correspond à la distinction entre « *explanandum* : la chose à expliquer » et « *explanans* : la chose qui explique » [Grize96].

Nous utiliserons également dans cette thèse le terme « raisonnement explicatif », plutôt que « raisonnement d'explication » parfois employé, pour le processus de conception de l'explication et « explication » pour le produit de ce raisonnement.

De même, nous préférons utiliser le terme de « connaissance explicative » plutôt que « connaissance d'explication » dans cet ouvrage. Les connaissances explicatives concernent les connaissances relatives aux explications et non les connaissances du domaine ou les connaissances de métier.

1.2.4 Système expert, système à bases de connaissances et système d'informations

Les notions de « système expert » et de « système à bases de connaissances » sont quasi équivalentes mais nous préférons la deuxième qui est, de loin, la plus utilisée actuellement. Nous définissons un « système à bases de connaissances » comme un système qui manipule, traite ou utilise des connaissances.

« *Un SBC vise à simuler les performances d'un expert dans un domaine particulier et non à reproduire les processus réellement mis en œuvre* » [David et al.90].

D'après [Prince91], on peut définir un SBC comme « *un produit, dont la proximité avec une source humaine n'est en aucun cas une raison de validité, mais qui doit appuyer certaines activités humaines présentant un caractère cognitif.* »

D'après [Visetti91], le paradigme des SBC ne repose pas sur l'émergence d'une technologie différente de celle des systèmes experts, mais plutôt sur un recul délibéré des prétentions liées à ce type de système.

On parle également de « systèmes experts de seconde génération », séparant explicitement les connaissances du domaine, des connaissances de résolution de problèmes. L'architecture logicielle des systèmes experts de seconde génération doit permettre de fournir des explications de meilleure qualité [Kassel89].

La notion de « système d'information » n'est pas très éloignée. Les fonctions d'explications que nous décrivons sont toujours adjointes à un système, existant ou en cours de construction,

manipulant des informations. Nous préférons la notion de « connaissance » plutôt que d'« information » dès que cette information est choisie, sélectionnée. C'est bien lors de cette étape de transformation d'information en connaissance que, selon nous, se situent les explications. C'est pourquoi nous utiliserons dans la suite la notation de SBC pour décrire le système auquel est adjointe la fonction d'explication.

Les systèmes manipulant des informations simples et faciles à comprendre ne nécessitent pas d'explications. Ce sont des systèmes d'informations. Lorsque les données sont complexes, nombreuses, qu'elles nécessitent un raisonnement non trivial pour être comprises, analysées ou corrélées, ce raisonnement étant lié à un apprentissage et donc à des connaissances, on parlera plutôt de SBC pour le système manipulant ce type d'informations complexes.

La réalisation d'une fonction d'explications a un coût non négligeable ; la plus-value de chaque explication doit donc être évaluée. Le but n'est pas d'ajouter ce que coûte des explications à tout SBC mais bien d'expliquer les connaissances ou les raisonnements qui peuvent poser des problèmes aux utilisateurs. Ce n'est donc pas sur des informations simples que portent les explications mais sur des connaissances.

Les « systèmes d'aide à la conduite » mentionnés dans la suite (partie II et III) sont des SBC particuliers. Les travaux décrits sur les SBC peuvent s'appliquer à ces systèmes en prenant soin de respecter les contraintes particulières inhérentes au domaine de la conduite de procédés.

1.3 Introduction des explications dans les SBC

Après avoir mentionné les différentes utilisations ou interprétations de la notion d'*explication*, pour le sens commun, en psychologie, ou pour l'apprentissage, nous allons revenir sur l'introduction des explications dans le contexte de notre recherche. Nous allons tout d'abord rappeler l'origine des explications dans les SBC avant de préciser dans quels buts les explications sont actuellement utilisées et quelles formes elles prennent. Nous établirons ensuite la liste de la plupart des différents systèmes explicatifs existants, à partir des contextes d'application de ces systèmes.

1.3.1 L'origine

Le concept d'explication dans les SBC est né dans les années 70/80 avec le premier système expert : MYCIN, à l'université de Stanford, appliqué aux maladies infectieuses du sang [Davis et al.77, Davis et al.93, Buchanan et al.84]. Apparaissait ainsi le concept de *système transparent* à l'utilisateur. C'est donc le grand intérêt des explications : en accédant à une certaine compréhension du raisonnement du système, l'utilisateur accepte plus volontiers les conclusions proposées. On parlait alors de « *explanation-giving facility* ».

Les premières recherches sont donc issues de la communauté de chercheurs « Systèmes Experts » dans le domaine d'application de la médecine.

Le premier article concernant MYCIN été publié en 1973 [Shortliffe et al.73]. Celui-ci comportait déjà des exemples d'explications rudimentaires, plutôt destinées au débogage. E. Shortliffe avait développé la première fonction d'explication grâce à la commande **Rule**. R. Davis, qui rejoignit le projet quelques années plus tard, la transforma en question **Why** et programma un *arbre historique* qui permettait à l'utilisateur de comprendre le raisonnement du système par l'enchaînement des règles déclenchées. Puis il ajouta la question **How** qui permettait à l'utilisateur de descendre dans certaines branches du réseau de raisonnement.

D'après [Buchanan et al.84] : « *In describing MYCIN's design consideration in Chapter 3, we pointed out that an ability of the program to explain its reasoning and defend its advice was an early major performance goal. It would be misleading, however, to suggest that explanation*

was a primary focus in the original conception. As was true for many elements of the systems, the concept of system transparency evolved gradually during the early years », que l'on peut traduire par « en décrivant la construction de MYCIN dans le chapitre 3, nous avons remarqué que la capacité d'un programme d'expliquer son raisonnement et de défendre ses conseils était un objectif important. Cependant, ce serait mentir que de suggérer que l'explication était un but premier de la conception originale. Ainsi que pour beaucoup d'éléments du système, le concept de système transparent a évolué graduellement durant les premières années ».

On peut considérer que la capacité d'explication du système devint alors, entre 1975 et 1976, un thème important de recherche autour du projet MYCIN, avec notamment MM. A. Scott, W. Clancey, R. Davis et E. Shortliffe [Scott et al.77].

1.3.1.1 Les explications dans le système MYCIN

Dans le cas de MYCIN, l'explication était constituée de la trace des règles, en l'occurrence de la succession des règles déclenchées, que l'utilisateur pouvait consulter par des questions Why et How.

La règle 1.2 est un exemple d'une règle écrite pour le système MYCIN. Sa traduction en anglais est donnée également.

La figure 1.3 correspond à un *graphe historique* du même système qui permet la production éventuelle d'explications se basant sur la structure du graphe. Enfin, la figure 1.4 est un exemple de production d'explications par le système MYCIN.

```

-----
| RULE 009                                     |
|                                             |
| PREMISE: ($AND (SAME CNTXT GRAM GRAMNEG)   |
|              (SAME CNTXT MORPH COCCUS))    |
| ACTION:  (CONCLUDE CNTXT IDENTITY NEISSERIA TALLY 800) |
|                                             |
| IF: 1) The gram stain of the organism is grammed, and |
|      2) The morphology of the organism is coccus      |
| THEN: There is strongly suggestive evidence (.8) that the identity |
|        of the organism is Neisseria.              |
|-----

```

FIG. 1.2 – Exemple de règle du système MYCIN

Pourtant, cette première production d'explication était assez limitée; l'utilisateur devait connaître les noms des règles, et leurs significations pour utiliser au mieux ces informations. Des explications de ce type sont encore utilisées dans les systèmes actuels à base de règles. Elles sont assez bien adaptées pour la mise au point d'applications de faible complexité, mais elles se révèlent bien insuffisantes pour des applications plus complexes et ne permettent pas à un utilisateur béotien (non au fait de la réalisation du système) de comprendre les mécanismes mis en œuvre. Comme l'a exprimé W. Clancey [Clancey83] [Clancey93], les explications produites par MYCIN sont assez limitées. La plus importante limitation concerne les explications de stratégie de résolution. Ces méta-connaissances ne sont pas présentes dans le système, les explications se situent à un niveau assez bas [Chandrasekaran et al.89]. Les explications de contrôle et de stratégies sont importantes pour la compréhension de la manière de *raisonner* d'un système. C'est essentiellement par celles-ci que *l'intelligence* de l'expert est codée dans le système. Mais elles

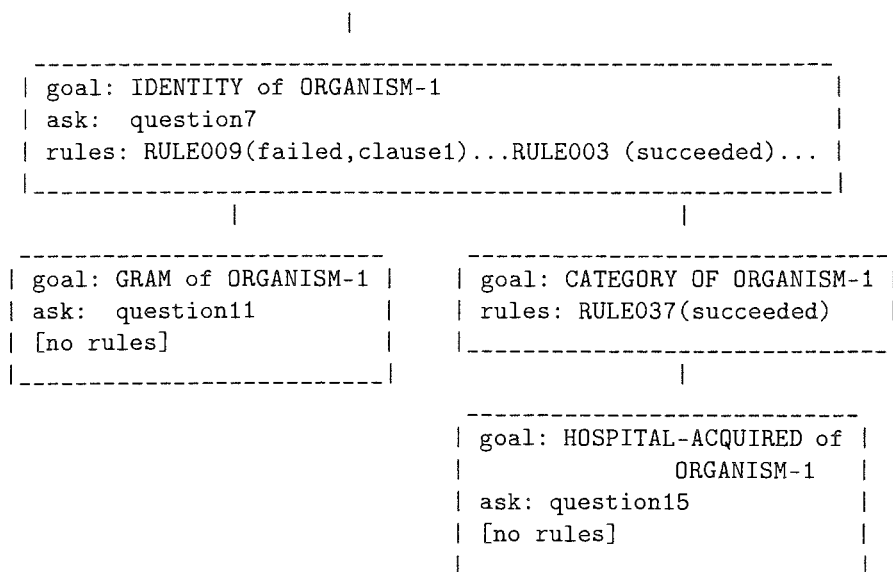


FIG. 1.3 – Exemple de portion de graphe historique du système MYCIN

sont également les plus difficiles à modéliser, à représenter et à exprimer, c'est pourquoi elles ne figuraient pas dans ce premier système explicatif MYCIN.

1.3.1.2 Les suites de MYCIN

La figure 1.5, extraite de [HR92], présente de manière schématique les langages, les outils et les systèmes développés à la suite de MYCIN.

Différents travaux de recherche ont suivi cette première approche des explications, pour produire des explications plus élaborées que la trace des règles de production, notamment à la suite des systèmes EMYCIN puis NEOMYCIN de Clancey et Letsinger [Clancey83, Clancey et al.81], ou XPLAIN de W. Swartout [Swartout81, Swartout83].

Les systèmes EMYCIN et NEOMYCIN ont introduit un processus de construction d'explications indépendantes du domaine d'application.

De façon moins significative, un système comme R1 de McDermott [Mcdermott82] a lui aussi contribué aux recherches sur l'explication. Il traitait du problème de la conception d'ordinateur VAX.

1.3.2 Le but des explications

Les explications peuvent être utilisées :

- pour le débogage ou pour la conception. Elles sont alors destinées au concepteur pour l'aider dans sa conception. On parle alors d'explication *interne*. C'était le premier but des explications lors de leur introduction dans les SBC. Les programmeurs pouvaient consulter la trace des règles déclenchées. Ce type d'explications destinées au concepteur est moins courant que les autres types mais néanmoins encore utilisé. Les explications peuvent alors, d'après [Trichet et al.96b], servir à
 - justifier une résolution,
 - mettre en évidence des propriétés de la base de connaissances,

```

| 15) Is the patient's illness with ORGANISM-1 a hospital-acquired
| infection ?
| **WHY
| [i.e. WHY is it important to determine whether or not the infection
| with ORGANISM-1 was acquired while the patient was hospitalized?]
| [1.0] This will aid in determining the category of ORGANISM-1.
|   It has already been established that
|       [1.1] the gram stain of ORGANISM-1 is gramneg, and
|       [1.2] the morphology of ORGANISM-1 is rod, and
|       [1.3] the aerobicity of ORGANISM-1 is facultative
|   therefore, if
|       [1.4] the infection with ORGANISM-1 was not acquired
|       while the patient was hospitalized
|   then
|       there is a strongly suggestive evidence (.8) that the
|       category of ORGANISM-1 is enterobacteriaceae
|   ALSO: there is a weakly suggestive evidence (.1) that the
|       identity of ORGANISM-1 is pseudomonas-aeruginosa
|   [RULE037]
| **WHY
| [i.e. WHY is it important to determine the category of ORGANISM-1?]
| ...

```

FIG. 1.4 – Exemple de production d'explication par le système MYCIN

- faire comprendre le modèle conceptuel : faire comprendre les notions ou la dynamique de ce modèle ;
- pour faire apprendre, voire pour apprendre. Ce contexte est essentiellement celui de l'EIAOet des systèmes d'apprentissage. On utilise alors des systèmes « hors-ligne » déconnectés d'un procédé industriel ou des systèmes de résolution de problèmes (résolution d'exercice de géométrie par exemple) ;
- pour informer. Des explications dans les systèmes d'information peuvent être données dans

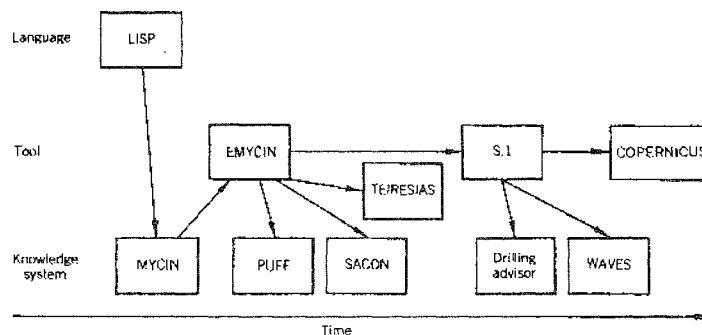


FIG. 1.5 – L'outil EMYCIN et les suites de MYCIN (extrait de [HR92])

ce but, mais on cherche aussi à expliquer pour informer dans le but d'aider à la compréhension des résultats ;

- pour faire accepter un résultat ;
- pour faire comprendre ;
- pour faire partager un raisonnement.

Les explications pour le débogage existent encore parfois mais elles n'entrent pas dans le champ de notre recherche qui s'intéresse aux explications fournies par un SBC à ses utilisateurs.

On ne s'intéressera pas non plus dans cette thèse aux systèmes d'apprentissage complets. Cependant, dans beaucoup d'explications fournies, un des buts majeurs, parfois caché, est de permettre à l'utilisateur d'améliorer ses connaissances grâce à l'expertise fournie et de progresser. Ainsi des explications « pour apprendre » seront donc souvent intégrées dans les explications fournies.

Lorsque l'on souhaite faire accepter un résultat ou faire partager un raisonnement, il est souvent utile de montrer les éléments sur lesquels se base le raisonnement ou d'informer l'utilisateur des dernières conclusions importantes. Les quatre derniers objectifs mentionnés ci-dessus sont différents mais assez liés, en tout cas généralement utilisés simultanément comme dans les propositions d'explications présentées dans la partie II.

1.3.3 La forme des explications

Ainsi que nous l'avons expliqué, les premières explications créées étaient des réponses à la question « Pourquoi ? ». Cette explication concerne surtout les résultats ou éléments à la base de l'affirmation, du résultat, ou du diagnostic donné. Cela correspond aux questions : *Pourquoi as-tu dit cela ? Pourquoi est-ce important ? Sur quoi te bases-tu ?* Alors que la question « Comment ? », introduite ensuite, concerne plutôt la construction du résultat ou de l'affirmation donné : *Comment l'as-tu construit ? Qu'est-ce qui te permet de dire cela ?*

On mentionne aussi la question, peut-être plus simple, « Quoi ? » Cette question concerne moins les explications que les autres et porte sur l'élément ou le résultat décrit *Qu'est-ce que c'est ?*

A la question « Pourquoi ? », a été ajoutée sa négative « Pourquoi pas ? », au sens : *Pourquoi non ? Pourquoi ne pas ? Pourquoi pas tel fait ?* [Rousset et al.87]. Elle exprime le besoin de savoir et de comprendre pourquoi une solution, ou un résultat, n'a pas été choisi et quels sont les critères qui permettent de sélectionner ou de rejeter une solution. De tels explications ont, par exemple, été introduite dans le système *Pourquoi-Pas* dont l'objectif principal est de permettre la formulation d'explications négatives [Safar90].

On utilise aussi, mais plus rarement, la question « Et après ? » pour un besoin d'anticipation [Bayad et al.94]. Dans [Tong et al.95], les auteurs parlent de façon plus générale des « cinq W », pour « *Who, What, When, Why, Where* » (qui, quoi, quand, pourquoi et où).

Très tôt, pour dépasser les limites des premières explications, une orientation forte vers les explications en langue naturelle (et le domaine du « *natural language processing* ») et les dialogues explicatifs a été prise par les principaux chercheurs. De ce fait, la forme des explications est généralement du texte en langue naturelle, que ce soit pour les travaux comme le système EES devenu Expect [Moore et al.90], le système BLAH [Weiner80], le projet français Aide [Kassel95], le système à base de tableau noir Esmeralda [Lemaire92c], ou les systèmes Diva [David et al.90] ou NAIAD [Joab90] ... C'est un choix pris par de nombreux chercheurs comme dans [PB94] : « nous nous limiterons aux systèmes qui, sollicités par l'utilisateur, construisent l'explication sous forme de texte en langage naturel ».

D'autres travaux, en revanche, comme pour le système QUE [Metzler et al.98] par exemple, ont considéré que les explications textuelles n'étaient pas forcément la meilleure forme d'explication. « Dans notre expérimentation, nous avons un rejet par le chercheur (ici l'utilisateur) de toute explication fournie sous forme textuelle » [Sala96]. On citera alors principalement les travaux de Maybury sur les explications multimédia [Maybury91] [Maybury95].

1.4 Utilisations dans les SBC

Nous essaierons dans les paragraphes suivants de faire un survol des principaux systèmes explicatifs développés. Nous avons regroupé par domaine d'application ces systèmes, bien qu'il paraisse évident que ce découpage soit arbitraire et ne rende pas compte des systèmes eux-mêmes.

Le domaine d'application final du système explicatif est important, les besoins en explication dépendant d'une part du domaine des tâches couvertes par le SBC, d'autre part du type d'utilisateur à qui est destiné le système et de ses buts d'utilisation [Karsenty et al.95a]. L'application finale, son domaine d'activité, les buts du système, ou les activités des utilisateurs, ont donc un impact fort sur le système explicatif, par exemple sur le type de connaissances manipulées, les types d'utilisateurs, la forme des explications, les interactions possibles, les contraintes d'architecture ...

C'est donc pourquoi nous avons souhaité regrouper les systèmes par domaine d'application.

Par ailleurs, nous reviendrons dans le chapitre suivant sur les principales idées relatives à ces systèmes et les mécanismes utilisés.

Il faut également préciser que la conception d'un système explicatif réunit souvent sur le même projet des psychologues, des didacticiens, des linguistes, des informaticiens, des cognitivistes en plus des experts du domaine d'application concerné.

On peut considérer que la recherche dans le domaine des SBC explicatifs s'oriente selon deux axes principaux [Kassel88] [Kassel90] [Lemaire92c] :

- une production d'explications incluse dans le résolveur de problème. Cet axe consiste à travailler sur le module de raisonnement et donc sur la représentation des connaissances.
- un module d'explication séparé du résolveur de problème. Pour développer un tel module, il faut agir sur la production d'explications.

Ces deux axes sont en fait nés de la séparation entre raisonnement et explication. D'après [Lemaire92c], le plus gros projet combinant ces deux voies est « *Explainable Expert System* » (EES) lancé en 1984 à Los Angeles [Neches et al.84, Paris92]. Ce système est décrit dans la partie suivante au paragraphe 6. Dans les deux cas, le but de l'explication est moins d'enseigner la connaissance que de la rendre accessible à l'utilisateur. On parle alors d'*explication pour informer* par opposition à *explication pour enseigner*.

Ceci correspond à une autre forme du point de vue de Kassel « *expliquer, c'est raisonner sur le raisonnement* » [Kassel89].

Certains systèmes, comme le système MYCIN, décrit auparavant, ou les systèmes PROSE⁸ [JD90b] [JD90a] [JD92], SACS0 [Bayad et al.94] ... , sont basés sur des règles de production alors que d'autres ont défini des techniques et des architectures plus complexes. Nous reviendrons sur la représentation des connaissances explicatives au paragraphe 2.8 et sur la notion d'architecture de systèmes explicatifs au chapitre 6, en nous basant sur les trois systèmes classiques EES, ESMEALDA et ISEE.

8. *Production Rule-based Object-oriented System for Explanation*

1.4.1 Pour les applications médicales

Ainsi que nous l'avons vu au paragraphe 1.3.1, la recherche en intelligence artificielle à propos des explications a débuté pour des applications médicales avec MYCIN essentiellement, et cela reste une des principales applications pour la recherche.

Voici la liste des principaux systèmes à bases de connaissances explicatifs appliqués à la médecine :

- Les concepts développés par W. Swartout pour le système XPLAIN [Swartout81, Swartout83] ont été appliqués au système DIGITALIS ADVISOR pour des conseils d'utilisation de la digitaline à des fins thérapeutiques. [Swartout81].
- Le projet AIDE⁹ est un projet de conception de systèmes interactifs d'aide à la décision [Kassel95]. Dans le cadre de ce projet, un générateur de résolveurs de problèmes a été réalisé. Celui-ci utilise, comme exemple, des connaissances tirées du système de diagnostic médical SATIN¹⁰ [Kassel et al.92, Bourcier et al.94]. Ce projet pose le problème de la représentation des connaissances d'un SBC en vue de leur explication et propose de concevoir des résolveurs de problèmes plus explicatifs (premier axe de recherche défini précédemment au paragraphe 1.4). Celui-ci s'inspire largement des travaux réalisés pour le système NEOMYCIN. Les *modèles de haut niveau* définis pour le système permettent, d'après les auteurs, de définir de nouveaux types d'explications. Grâce aussi à la représentation séparée et explicite des connaissances du domaine et de stratégie, il devient possible :
 - de présenter un concept du domaine en le situant dans sa taxinomie, en montrant ses propriétés et les liens que ce concept entretiendrait avec d'autres concepts.
 - de présenter comment une tâche (non terminale) est exécutée en montrant comment elle se décompose en sous-tâches et sous quelles conditions ces sous-tâches sont exécutées.
- Le groupe de recherche GENE¹¹ a également utilisé le projet AIDE comme base de validation de ses idées sur l'explication, l'argumentation et la négociation [Gene95] [Gene96] (voir également le paragraphe 2.5.1 pour la description du groupe GENE et le schéma 2.1 qui décrit les relations entre les trois fonctions d'explication, de négociation et d'argumentation).
- Appliqué au corpus du projet AIDE, le système ESMERALDA utilise la technique de tableau noir pour réaliser un système explicatif [Lemaire et al.91], [Lemaire92b]. Nous reviendrons sur cette architecture au chapitre 6.
- Le système ESTHER, développé dans l'équipe RFIA, est un système de planification en radiothérapie externe. Dans ce système, les explications sont construites à partir de schémas de texte traduisant les fonctions booléennes ou numériques utilisées dans les règles d'inférence. « *Elles sont proposées à l'utilisateur au moment de la consultation des résultats d'une consultation. Ces résultats sont essentiellement graphiques et l'utilisateur peut, en pointant sur l'un ou l'autre des éléments des dessins, obtenir sa description sous forme de texte ou les étapes de raisonnement qui ont conduit à définir sa position* » [Chouvet92].
- Un système a été développé pour l'aide à l'information du patient, pour le traitement des migraines, à la suite des travaux sur MYCIN [Buchanan et al.95].
- Le système OPADE¹² d'aide à la prescription de médicaments a été amélioré dans sa deuxième version afin de produire des explications à destination des utilisateurs indirects,

9. Architecture Intégrant Dédution et Explication

10. Système d'Aide au Traitement des Infections Néonatales

11. Génération d'explications négociées

12. The Optimization of Drug Prescription using Advanced Informatics

que peuvent être les patients [Berry et al.95]. A partir d'une étude des désirs d'informations des patients, les auteurs ont défini les différentes informations qui doivent être données sous forme d'explications écrites, imprimées par le système à la fin de la consultation.

- Dans le cadre du diagnostic médical, des explications ont été intégrées au système DIACODEX, dont la tâche est d'effectuer un diagnostic en utilisant des connaissances déclaratives [Masson96].

1.4.2 Pour l'enseignement ou l'apprentissage

Les explications peuvent aussi s'adresser à des élèves (aide à la résolution de problèmes, enseignement) en EIAO ou à de futurs opérateurs dans l'industrie.

Dans tous ces cas d'enseignement ou d'apprentissage, l'explication est particulière ; on parle d'*explication pour enseigner*.

On peut citer par exemple :

- L'échec du système NEOMYCIN [Clancey et al.81] a entraîné la conception complète du système GUIDON de Clancey. Ces deux systèmes ont été construits à la suite de MYCIN. NEOMYCIN est un tutoriel qui utilise la connaissance en résolution de problème de MYCIN pour piloter l'apprenant dans des études de cas. Pour cela, le tuteur dispose à la fois du résultat calculé par le système expert et de la trace du calcul. La résolution proposée par l'apprenant est comparée à celle du système expert, le tuteur intervient alors pour suggérer des actions ou mettre en garde contre d'autres. Mais ce système ne proposait pas d'explication des connaissances stratégiques.
- Les travaux de R. Schank sur l'explication étaient établis dans une perspective d'auto-apprentissage [Schank86]. D'après l'auteur, l'explication est, à un premier niveau, la capacité à expliciter la suite des actions mises en œuvre au cours d'un raisonnement et, à un second niveau, la capacité à expliciter les raisons des choix effectués au cours du raisonnement.
- Le système TAILOR [Paris88] a permis d'implanter l'adaptation des explications à l'interlocuteur à partir des résultats d'une étude linguistique. Cette étude portait sur des descriptions textuelles d'objets complexes.
- Le système Sophie, des Anglais Brown, Burton et De Kleer, a pour contexte applicatif l'apprentissage industriel.
- Le système Aplusix, de résolution d'exercices d'algèbres [Nicaud87b] [Nicaud87a], a introduit le modèle de l'apprenant dans la construction de l'explication. Ce modèle est de type *expertise partielle* [Balacheff90a].
- Ces travaux ont donné suite aux travaux sur la résolution de problèmes d'algèbre [Nicaud et al.90], [Saidi92].
- La tentative de définition de modèles formels pour l'explication didactique de N. Balacheff est très intéressante, du fait de sa volonté de formalisation. Il distingue trois types de modélisation de l'apprenant : *d'une part la conception qui est un modèle construit par le didacticien. C'est en général un modèle non strictement symbolique (nous parlerons de modèle non formel) issu de l'analyse didactique du comportement de l'apprenant et de ses effets. D'autre part, au niveau du dispositif informatique, deux modèles : le modèle comportemental et le modèle épistémique qui sont calculés par la machine.* [Balacheff90a]
- Le système ELISE, développé par Delozanne et Carrière, a pour but de permettre à des étudiants d'acquérir un savoir-faire sur le calcul des primitives, par la résolution de problèmes et les explications [Delozanne et al.92]. C'est un système dont le principal thème

est *l'interaction explicative* [Carriere et al.90]. L'utilisateur y tient une place importante par une forte implication lors de la conception et des tests. Il s'appuie sur le prototype CAMELIA, un résolveur de problèmes de calcul algébrique. Ce système utilise quatre niveaux de connaissances : les connaissances de base, les connaissances opératoires, les connaissances stratégiques propres au domaine et les connaissances générales de contrôle de la résolution [Vivet84].

- Le système NAIAD de M. Joab est un système pour l'enseignement de l'algèbre [Joab90]. Il a été conçu sur la notion de dialogue explicatif.
- Dans le cadre du système SEPT¹³, d'EDF, un système industriel d'apprentissage par simulation de réseaux à très haute tension, P. Brezillon a développé une dimension explicative « *afin de transformer SEPT en un système expert explicatif* » [Brezillon89]. L'application a été écrite dans le langage Alouette, développé à l'EDF et utilise la notion d'interprétation [Brezillon89, Brezillon91, Brezillon92].
- Le système C.Q.F.E¹⁴ de Kassel [Kassel86b] s'articule autour d'un système à base de règles. Le système comprend un module explicatif dont « *l'objectif est de présenter à l'utilisateur, en fin de session, une synthèse du raisonnement suivi. Pour cela, le module d'explication opère un nouveau raisonnement comportant trois étapes distinctes : le raisonnement du système expert est tout d'abord structuré, puis il est simplifié et en dernier lieu présenté à l'utilisateur [...] Pour cela, il utilise deux types de connaissances profondes : une théorie du domaine, appelée modèle conceptuel, et un savoir-faire explicatif* » [Kassel86a]. Ce système a été validé sur une application de diagnostic technique.
- Le système KNIGHT¹⁵ [Lester et al.91] est un tuteur intelligent appliqué au domaine des sciences naturelles. Un modèle de l'utilisateur aide à la construction d'un premier plan d'explication, structuré en blocs qui conduiront aux différents paragraphes du texte généré.
- Un système, nommé CONSOL¹⁶, a été développé en collaboration entre la société Sollac et l'équipe RFIA. Il est né du souci d'améliorer et de compléter la formation des opérateurs des différents postes de travail de coulée continue aux consignes d'exploitation [Haton et al.88].
- Les travaux de G. Simon pour l'intégration d'aides et d'explications dans un système de capitalisation de connaissances ont été appliqués à la reconnaissance de défauts métallurgiques [Simon97]. Quatre types d'aides et d'explications sont proposés [Simon96] :
 - aider l'utilisateur à se servir correctement du logiciel : ce type d'aide correspond à l'aide en ligne sur les fonctionnalités d'un logiciel,
 - aider l'utilisateur final à interpréter le compte-rendu d'analyse produit par le système : ce type d'aide correspond à l'aide à la compréhension des résultats,
 - suggérer à l'utilisateur final des modifications de la fabrication pour supprimer ou atténuer les défauts détectés : cette aide correspond à l'aide à la résolution de problèmes que l'on retrouve particulièrement dans les systèmes d'EIAO lorsqu'il s'agit d'aider l'élève à appliquer des méthodes et stratégies ou l'aider à corriger ses erreurs,
 - aider l'expert à utiliser le modèle de défaut : cette aide peut prendre la forme d'une présentation synthétique de la modélisation effectuée, d'une explication des différents composants et de leur rôle, ou d'une aide dynamique à la résolution d'un problème de modélisation.

13. Suivi d'Événements dans les Postes de Transports.

14. Ce Qu'il Fallait Expliquer

15. Knowledge Integration-based Generator of History-sensitive Text

16. pour CONsignes de SOLlac

- Dans [Alvarez92], I. Alvarez introduit des « *explications morphologiques* » pour expliquer des problèmes de géométrie, « *c'est un point de vue géométrique qui complète le point de vue logique (des règles)* » [Alvarez91].
- Le système **SIGALE**, développé dans le contexte de la classification des immunoglobulines, fournit des explications pouvant aider un chercheur dans une phase de découverte [Sala96]. Les explications sont générées automatiquement au moment opportun ou à la demande pour la validation des hypothèses du chercheur.
- Dans [Nedellec93], les explications servent à valider le processus d'apprentissage automatique. En revanche, il n'est pas dit qui valide ces explications.
- Dans [Gabriel96b], les explications sont également utilisées pour valider le processus d'apprentissage automatique.
- Le système **EDGE**¹⁷ [Cawsey92] est un système de tutoriel interactif. Il propose des explications interactives sur des circuits électroniques [Cawsey95]. **EDGE** utilise une planification descendante qui intègre des modifications des plans en fonction des interactions avec l'utilisateur [Cawsey91].
- Le système **REX**¹⁸ a été construit et testé sur plusieurs domaines applicatifs [Wick et al.92]. Il a, par exemple, servi à étudier les mécanismes d'explications sur le calcul des intégrales pour des étudiants en mathématiques [Wick et al.95].
- Le système **SCHNAPS**, réalisé par FM. Blondel dans le cadre de sa thèse, est un environnement d'aide à la résolution de problèmes en chimie [Blondel96]. L'auteur parle d'« *aide, conseil et explication* ». Il distingue plusieurs types d'aides habituellement utilisées [Blondel96] :
 - aide fonctionnelle en ligne : le but est de faire connaître les possibilités d'un logiciel et d'en faciliter l'usage ;
 - aide intelligente : cette aide correspond à l'objectif final de l'utilisateur qui est le plus souvent d'effectuer une tâche, de produire un résultat ou de résoudre un problème. On peut distinguer l'aide passive quand le système répond à la demande de l'utilisateur et l'aide active lorsque le système juge le cas opportun. L'auteur cite alors le projet de système d'aide intelligente générique **Eurohelp** [Winkels92] comme un exemple significatif ;
 - conseil : l'idée est de proposer à un élève des conseils reliés au problème et à la tâche en cours ;
 - explication : le but des explications est de permettre de faire comprendre à un utilisateur pourquoi une solution fonctionne et pourquoi telle solution est préférable à telle autre ;
 - initiative : le système d'aide peut prendre l'initiative d'apporter des informations que l'utilisateur n'a pas demandées ;
 - dialogue : la prise en compte du caractère actif de l'utilisateur dans la démarche de recherche d'information a conduit plusieurs chercheurs à envisager le processus d'aide comme un dialogue entre l'utilisateur et le système.

En comparaison des travaux dans ce domaine, et pour reprendre le vocabulaire utilisé, nos travaux présentés dans la partie II se situent plutôt dans le cadre des « micromondes » que

17. *Explanatory Discourse GEnerator*

18. Reconstructive explanation

des « tuteurs intelligents ». Les micromondes sont des environnements de découverte libre, habituellement avec une interface homme-machine intuitive et paramétrable, alors que les tuteurs intelligents guident fortement l'utilisateur.

1.4.3 Pour l'aide à la conception

Les explications peuvent être utilisées pour aider à la conception de produits *structurés*:

- Le système SMACK est un système d'aide pour la conception d'équipements électroniques [Thomas92, Thomas93, Levrat et al.94]. Le besoin en explication est suscité, à la fois par la nature de l'interaction envisagée entre le système et l'utilisateur (le système se veut coopératif et permet à l'utilisateur de demander des explications avant d'agir) et par le type de l'application traitée (un problème de conception dans un domaine technologique en évolution) [Carcagno et al.92]. Les explications sont générées en langue naturelle par un dialogue explicatif.
- Le système ATOME-Explication développé dans l'équipe RFIA est un système d'aide à la conception d'un système multi-experts générique [Chevrier et al.91]. Il se situe donc au niveau conceptuel. C'est un système explicatif développé pour le système de développement à base de tableau noir ATOME¹⁹ [Haton et al.87], en utilisant le concept de tableau noir explicatif. Les explications ne sont cependant pas destinées à des utilisateurs *lambda*, mais à des cognitivistes, experts ou informaticiens concepteurs du système.
- Le système DIVA a été réalisé dans une collaboration entre Alcatel-Alsthom et EDF [David et al.90]. Le système de résolution de problème est amélioré pour intégrer un module explicatif (premier axe défini au §1.4). Il est bâti autour d'une décomposition en trois tâches de traitement de l'information : une tâche de diagnostic, une de reconnaissance de situation et une dernière d'abstraction de données. Les tâches (au nombre d'une trentaine dans cette application) sont explicitement représentées dans DIVA. Toute requête est interprétée suivant cette structure de tâches et de sous-tâches associées et peut prendre la forme des questions « POURQUOI, COMMENT » et « POURQUOI-PAS ». Il s'inspire donc assez fortement des travaux autour du système NEOMYCIN.
- Un système a été réalisé en extension de la maquette de système explicatif *OrientExplain* [Amerge et al.94, Acacia94]. Cette extension a été développée dans le cadre d'un contrat avec le CNET au laboratoire INRIA de Sophia-Antipolis sur un sujet de conception de réseaux. Ce système repose sur un planificateur de texte explicatif ainsi que sur des stratégies explicatives intéressant les experts.
- Le module *Advisor* a été développé pour le simulateur *Smash*, utilisé par des concepteurs en micro-électronique [Duprez96b]. Il propose des conseils contextuels aux experts qui sont ici les concepteurs, mais aussi des explications qui justifient ces conseils. Le module d'aide donne les informations sur la *bonne utilisation* de chaque fonctionnalité et il signale la violation de ces règles dans le contexte d'une session. « *Dans la limite de sa connaissance, le module d'aide prévient les conflits et, quand une situation d'échec est rencontrée, il propose l'ensemble des alternatives à envisager pour la résoudre. De cette façon, l'utilisateur s'approprie petit à petit les capacités du progiciel* » [Duprez96a].
- Dans le système DSTM, F. Trichet a intégré des explications à destination du concepteur d'un système à bases de connaissances pour permettre au concepteur de comprendre les implications de ses choix de modélisation [Trichet et al.96a]. Ses travaux se distinguent d'une part des outils proposés pour aider le concepteur à mettre au point la base de

19. Another TOL for developing Multi-Expert systems

connaissances (de type explications même si cette finalité est rarement présentée en tant que telle pour ces systèmes) et d'autre part des travaux plus courants où les explications sont destinées à l'utilisateur [Trichet et al.96b]. Ils se basent sur l'étude d'objectifs d'explication essentiellement pour la problématique de l'explication de la dynamique de raisonnement [Trichet98].

- Pour le système EES, que nous avons déjà mentionné aux paragraphes 1.3.3 et 1.4, une application, nommée PEA²⁰, a été développée par Moore [Neches et al.84]. Ce système PEA a pour but d'améliorer des programmes en code Common LISP par des conseils de transformation de code [Moore95]. Les conseils permettent d'améliorer le code suivant trois dimensions : maintenabilité, lisibilité et efficacité [Paris92]. Les questions et réponses sont données en langue naturelle. Ce système est souvent décrit, il est souvent utilisé comme système de *référence* dans la littérature, nous en reparlerons au chapitre 6.
- De même, les explications peuvent être utilisées pour les concepteurs de programmes en PROLOG [dS89]. On peut noter que ces explications ne sont pas pour autant des explications externes, puisqu'elles ne sont pas destinées au concepteur du système explicatif ; elles aident l'utilisateur dans sa tâche de conception.

1.4.4 Pour l'aide à la décision ou au diagnostic

- Le système SIAM est un système de diagnostic qui, d'après l'auteur, « *s'adapte aisément à de nouveaux domaines et qui enseigne sa méthode* » [Courtois90].
- Le prototype AUSTRAL [Bredillet et al.94], développé dans le cadre du système GEMO pour l'acquisition de scénarios par simulation pour la surveillance de réseaux de distribution d'électricité d'EDF, vise à assister l'opérateur chargé de conduite dans ses activités de gestion d'alarmes, de diagnostic et de reprise de service. Ce prototype a eu pour suite le système SyDRE développé pour la génération et le suivi de plans de reprise [Cordier et al.97]. Des explications basées sur des graphes causaux ou des graphes d'influence ont été introduites. Ces explications reposent sur une forte technique pour l'aide au diagnostic dans une approche à base de modèles (modèle de pannes plutôt que modèle de bon fonctionnement).
- Pour le système SERIN, l'auteur s'est intéressée au raisonnement incertain [Bouri90]. Elle s'est beaucoup basée sur les techniques de construction et de production d'explications du système MYCIN [Davis et al.77]. Son apport majeur se situe dans le cadre des explications du raisonnement. Elle a proposé une analyse de la sensibilité qui « *consiste à étudier comment varierait la conclusion en fonction de tel ou tels faits* » [Bouri90]. C'est cette technique qui a été utilisée pour le système SERIN dont l'accès aux explications se faisait par un menu.
- Un système explicatif a été développé dans un système de reconnaissance de plans pour l'aide à la décision [Canamero et al.92].

1.4.5 Pour les domaines juridiques et financiers

Les applications des SBC dans ces deux domaines sont très nombreuses, on peut prendre comme exemple le numéro spécial (*special issue "expert systems in accounting, auditing and finance"*, Volume 9, numéro 4, 1995) de la revue *expert systems with applications*, avec par exemple [Swinney95]. Pourtant il existe peu de systèmes dans ces domaines dotés de faculté

20. pour Program Enhancement Advisor

d'explication. On peut citer néanmoins :

- Le système BLAH a été validé sur une application d'explication de loi d'impôt sur le revenu américain. BLAH est un système de type question-réponse capable de répondre à trois types de questions : « *les deux premières sont des requêtes au SBC et peuvent traiter du raisonnement. L'utilisateur peut demander à BLAH si une assertion est valide ou non, ou lui demander de faire un choix entre deux alternatives. Le troisième type de question est une requête à BLAH pour que le système explique pourquoi une assertion, déjà dans la base de connaissances, est validée* » [Weiner80]. Il fonctionne à l'aide des trois questions SHOW, CHOICE et EXPLAIN. Mais les explications produites sont assez simplistes, les explications de stratégies de choix de résolution ne sont pas données. Et, comme le souligne l'auteur, une autre sérieuse limitation est due à l'interface du système. Par exemple, (SHOW (HERBY MUST FILE TAX RETURN)) est un exemple de question de l'utilisateur, (HERBY MUST FILE TAX RETURN) est une réponse possible du système BLAH à cette question [Weiner80].
- Ye ainsi que ses collègues sont responsables de plusieurs études de l'impact des explications pour l'AUDIT [Ye95].
- Dans [Dugdale96], l'auteur introduit des explications dans le contexte des systèmes de maintenance de cohérence à base d'hypothèses (*assumption-based truth maintenance systems* : ATMS). Un système coopératif de résolution de problème pour une application de gestion d'investissements a été développé. Les explications introduites peuvent être de trois types :
 - des explications à propos des actions,
 - des explications à propos des concepts,
 - des explications à propos des méthodes de résolution.

En plus de ces trois types, l'auteur utilise trois **niveaux** d'explication : explications complètes, normales ou réduites. Ces explications ne sont pas fournies sous forme de langue naturel et ceci semble, d'après l'auteur, être une limitation importante du système.

1.4.6 Pour la recherche d'informations

Ce domaine, ainsi que celui décrit dans le paragraphe précédent, est assez éloigné de notre application. Aussi, nous n'avons pas approfondie nos recherches de systèmes explicatifs existant, qui ne semblent, par ailleurs, pas très nombreux. Nous pouvons néanmoins citer deux exemples simples :

- Les explications peuvent également servir comme guide pour l'interrogation de bases de données avec le système MAXIM'S pour la banque d'information politiques et d'actualités [Safar et al.92].
- Dans [Bedou et al.96], les auteurs ont étudié le rôle des explications dans la coopération entre systèmes d'informations. Ils se situent dans le domaine des « *Systèmes d'Informations Coopératifs* ». Les explications sont introduites pour aider à la résolution coopérative de conflits engendrés par des requêtes.

1.4.7 Pour l'aide à la conduite de procédés

Il existe de nombreux SBC d'aide à la conduite de procédés. La société japonaise Nippon-Steel, par exemple, déclare avoir développé plus de cent systèmes experts dont la plupart sont en activité, la majorité aidant à la conduite de procédés [Miyabe et al.93]. On peut trouver également le système allemand Blast Furnace [Koert et al.92], pour rester dans le domaine de

la sidérurgie sidérurgie. Cependant, il semblerait que très peu d'entre eux aient introduit une fonction d'explication.

- Un travail intéressant dans ce domaine est le module MAIN²¹ couplé sur le système SACS0²² [Bayad et al.94]. Il consiste en la réalisation d'un module d'aide interactif pour un système d'aide à la conduite de centrale classique EDF.

Ce système d'aide à la conduite s'appuie sur un *planificateur* pour assister la conduite durant les grands transitoires normaux (démarrage, conditionnement, arrêt), pour une aide sur incident et pour servir d'outil de formation. Ce dernier point est particulièrement important puisque les auteurs ambitionnent de réaliser, à terme, un *tuteur intelligent*. Leur système, en phase de test sur la centrale électrique de Martigues, s'appuie fortement sur la notion de multi-média, la gestion des écrans d'explications se fait par « *un méga-écran composé de mini-écrans avec des possibilités d'intra-navigations* » [Bayad et al.94].

Leur système devrait répondre aux questions classiques « Pourquoi ? » et « Comment ? », mais aussi « Pourquoi Pas ? » et, ce qui est le plus intéressant, à la question difficile « Et Après ? ». Pour cela, ils ont décidé de faire interagir fréquemment leur module explicatif avec l'utilisateur pour « *laisser le choix à tout moment à l'utilisateur aussi bien pour la sélection de la question à poser que pour la sélection de la forme du contenu tout en lui proposant une aide adaptée au contexte* » [Bayad et al.94]. Les explications consistent simplement à analyser conditions et les conclusions des règles. Les explications sont toutes de ce type, ce qui est un peu restrictif mais tout de même intéressant. L'originalité vient surtout de la structuration en quatre types de question (La question « Et Après ? » n'avait jamais été traitée ailleurs). Le plus intéressant est sa facilité de mise en place sur le système SACS0 à base de règles.

Environ 150 capteurs, soit environ 500 actions opérateur (sur un capteur on peut effectuer les trois actions suivantes : Eteindre, Allumer, Atteindre_Visée_X), devraient être couverts dans la version finale de SACS0. Les explications s'appuient sur ce système à bases de règles de production en analysant les conditions et les conclusions des règles [Millerat et al.96].

La vue de l'interface de la maquette J'explique, développée pour SACS0, est structurée en quatre parties : une partie d'interaction avec SACS0 correspondant aux demandes d'explications et aux commandes, une partie de réponse contenant l'explication produite, une partie contenant une réponse complémentaire et une partie schéma indiquant le positionnement ou le fonctionnement du conducteur traité.

Pour une action proposée par SACS0 qui peut être : « Debloquer_Clapets_VAR », la question « Pourquoi ? » produirait l'explication suivante : « Vous voulez savoir : "Pourquoi j'ai proposé Debloquer_Clapets_VAR?" »

J'ai proposé : "Debloquer_Clapets_VAR"

Pour atteindre le but : "Fin_Allumage"

D'une part, vous avez effectué AVANT "Debloquer_Clapets_VAR" les actions suivantes

"Monter_2400_Turbine"

"Selectionner_Corps_MP_Turbine"

et d'autre part, pour atteindre "Fin_Allumage", vous devrez effectuer après

"Debloquer_Clapets_VAR" au moins une des actions suivantes :

"Monter_2400_Turbine" ».

21. Module d'Aide INteractif

22. Système d'aide à la conduite des centrales classiques

Ces travaux ne semblent pas avoir été introduits industriellement sur les centrales thermiques. En revanche, ils ont été suivis par des travaux relatifs à la capitalisation de connaissances. Une maquette, correspondant à l'application de la systémique à la conception d'un modèle de conduite (un modèle de conduite en mode dégradé d'une centrale classique), a été développée. Le modèle est composé de quatre parties et utilise une méthodologie du type MKSM [Ermine98] (méthode du CEA²³ appliqué à la conduite de réacteur nucléaire) présentant l'information sous forme de graphes d'interactions entre les concepts. Il est destiné à la formation et doit permettre à tout utilisateur de consulter les graphes des connaissances et de modifier les connaissances incluses dans le système [Millerat et al.96].

- Le projet I-SEE²⁴ [Wickler et al.93] est un projet ESPRIT lancé par le laboratoire anglais CLRC²⁵ avec deux partenaires industriels :
 - le groupe Suez-Lyonnaise des Eaux pour une application GEANT de diagnostic de panne de système d'égouts. Le module ISEE, inclus dans l'application, propose à l'utilisateur une série de questions une fois le diagnostic effectué : « *Why is this conclusion valid?* », « *Why has this conclusion been eliminated?* » ;
 - le *British Maritime Technologies*, pour l'application OASIS, un programme de modélisation numérique qui prédit ce qui se passe quand de l'huile est répandue dans la mer. Pour le projet ISEE, ces trois partenaires se sont efforcés de donner au système OASIS la possibilité d'expliquer les sorties graphiques.

Le but du projet était de créer une boîte à outils pour la construction de systèmes explicatifs et de montrer l'efficacité de cette approche sur deux applications industrielles.

Suite au projet I-SEE, un nouveau projet pour mettre en place une nouvelle application test et évaluer l'avenir commercial d'un tel outil a été envisagé. Le projet ESPRIT Tap-Extra²⁶ a donc été lancé [Lambert et al.97c] [Lambert et al.97a] [Lambert et al.97b].

Le projet Tap-Extra teste les techniques d'explication sur un exemple de contrôle de procédé et étudie l'existence d'un intérêt industriel et d'un marché. L'application est un projet de pilotage du réseau d'assainissement pluvial de Bordeaux. Il existe un système d'aide au pilotage en temps réel (à la minute près) sous la forme d'un SBC ; c'est le système ALEPH, un des buts du projet Tap-Extra est de lui ajouter un module explicatif. Les buts du projet TAP-EXTRA sont [Lambert et al.97c] : « (1) *to test the application of an emerging software technology to a trial application: the monitoring of Bordeaux drainage network*, (2) *to disseminate the technology used to potential users and to examine how it can be employed in new industrial area and for new types of problem* » ((1) tester l'application d'une nouvelle technologie logiciel sur une application test : le contrôle du réseau d'irrigation de la ville de Bordeaux, (2) de disséminer la technologie utilisé à d'autres clients potentiels et d'examiner elle pourrait être utilisé pour d'autres secteurs industriels pour de nouveaux types de problèmes).

Une application test a été développée sur l'application ALEPH du groupe Suez-Lyonnaise des Eaux, un autre projet ESPRIT, permettant à un télé-contrôleur de gérer environ 60 pompes, bassins de rétention ou cours d'eau, implantée pour gérer le bassin d'eaux pluviales de Bordeaux. L'application permet au télé-contrôleur d'avoir une vision d'ensemble, et d'être averti des problèmes, par des alarmes : « Le bassin Maginot ne s'est pas réouvert, contrairement aux autres » ; « La pompe 3 Maginot ne s'est pas mise

23. Commissariat à l'Energie Atomique

24. *Interaction Self Explaining Engine*

25. *Central Laboratory Research Center*

26. *Trial Application of Explaining Technology for Risk Assessment and Monitoring*

en service ».

Les explications introduites concernent la règle utilisée (les explications indiquent le problème « **Le bassin Maginot est fermé** » et pourquoi ceci n'est pas normal « **MAIS la situation de crise est terminée** ») et donne des informations de synthèse (par exemple, la capacité de stockage utilisée actuellement, en pourcentage de la capacité totale).

- Dans le cadre du système DIAPASON, un système de formation à la conduite des réseaux électriques de distribution à moyenne tension fondé sur la simulation, des explications à destination des opérateurs ont été introduites ainsi que des explications dynamiques d'un dispositif simulé [Auzende et al.96a]. Comme pour les deux autres systèmes mentionnés, les explications sont destinées aux opérateurs [Auzende et al.96b].

Conclusion

Nous avons pu constater que dans les systèmes explicatifs développés actuellement, les explications étaient généralement utilisées dans le domaine médical et dans celui de la formation (ou EIAO). Le système MYCIN a été le premier à introduire des explications accessibles par les questions « pourquoi » et « comment » dans les années 70. Il était destiné au diagnostic des maladies du sang. Les explications étaient alors utilisées en interne pour les concepteurs du système. Elles sont maintenant plus généralement utilisées en externe pour les utilisateurs. Elles prennent principalement la forme de texte en langue naturelle et peuvent être l'objet de négociation avec l'utilisateur. Les explications ont pour but de convaincre l'utilisateur, de lui faire comprendre le raisonnement suivi par le système et lui permettre d'accéder à de nouvelles connaissances. Après avoir effectué une revue des travaux existant sur le sujet, nous pouvons constater que le contexte particulier de l'aide à la conduite de procédés complexes a été peu abordé. Nous y avons trouvé seulement trois systèmes : les systèmes SACS0, ISEE devenu Tap-Extra et DIAPASON.

Dans le chapitre suivant, la tâche de conception d'un système explicatif sera analysée précisément.



Chapitre 2

Expliquer : une tâche de résolution de problèmes

Sommaire

2.1	Finalité de l'explication et destinataires	36
2.2	La tâche de construction des explications	36
2.2.1	Une tâche de résolution de problèmes	36
2.2.2	Un problème mal structuré	37
2.2.3	Un problème complexe	38
2.3	Dissocier construction des explications et raisonnement	38
2.4	Types d'explication	39
2.5	Interactivité avec l'utilisateur	41
2.5.1	Questions et réponses en langue naturelle	41
2.5.2	Explications interactives	43
2.6	Utilisation d'un modèle de l'utilisateur	43
2.7	Acquisition des connaissances explicatives	45
2.8	Représentation des connaissances explicatives	45
2.9	Evaluation et validation des explications	46
2.10	Construction des explications	48
2.10.1	Les principes	48
2.10.2	Une voie à explorer : l'explication à partir de cas	49
2.11	Génération des explications	50

Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous nous intéressons à la réalisation de la tâche d'explication. Pour cela, nous rappellerons brièvement la finalité des explications avant de positionner cette tâche comme une tâche de résolution de problème, ainsi que l'ont fait de nombreux auteurs.

Nous verrons les idées et les principaux problèmes relatifs à cette tâche de construction d'explications en détaillant les différents types d'explications, les mécanismes d'interactivité avec le destinataire des explications, le problème particulier des modèles de l'utilisateur, ainsi que les mécanismes d'acquisition, de représentation et de validation des connaissances explicatives. Nous aborderons ensuite les deux points importants, décrits sous des formes très différentes, que sont la construction et la génération des explications.

2.1 Finalité de l'explication et destinataires

L'idée d'intégrer des explications dans les SBC est fortement liée à l'idée classique de « *système transparent* » [Wickler et al.93] [Metzler et al.98]. Le but est de permettre aux utilisateurs d'explorer le raisonnement suivi par le système.

Les différents buts des explications introduites ont été détaillés au paragraphe 1.3.2. Néanmoins, « *il est clair que les buts de l'explication sont mal définis. Il s'agit d'informer, de convaincre, de persuader l'utilisateur. Le fait que ces objectifs soient intrinséquement relatifs à un humain qui doit être pris en compte avec ses connaissances, ses habitudes, ses doutes confère au problème une composante fortement subjective qui brouille des objectifs déjà difficiles à formaliser par nature* » [Lemaire92c].

Nous rappelons que les explications peuvent être utilisées : pour le débogage, pour faire apprendre, voire pour apprendre, pour informer, pour faire accepter un résultat, pour faire comprendre et pour faire partager un raisonnement.

Dans [Karsenty et al.95b], les auteurs étudient les coopérations interhumaines (H-H) pour la coopération Homme-Machine pour « *aider à comprendre et dépasser les problèmes d'utilisation avec les systèmes experts existants* » (voir aussi [Vivier96]).

Ils considèrent que l'utilisateur est caractérisé par deux traits :

- il possède une certaine compétence dans son domaine lui permettant de traiter seul un éventail de problèmes ;
- il n'a pas nécessairement la connaissance du fonctionnement du système expert censé l'aider.

Le deuxième trait signifie que l'utilisateur et le système ne vont pas toujours utiliser les mêmes connaissances ni les mêmes modes de raisonnement pour résoudre un problème. Ce type d'asymétrie peut rendre difficiles la compréhension et l'acceptation des réponses du système et entraver la coopération entre l'homme et la machine. Les travaux visant à doter les systèmes d'une capacité à générer des explications tentent de dépasser cette difficulté [Karsenty et al.95b]. C'est également ce que nous ferons dans travaux présentés dans les deux parties suivantes.

Dans [Thirion et al.95], les auteurs précisent que la compétence de l'utilisateur intervient de manière significative dans la compétence globale du système homme-machine. Il est donc particulièrement important d'améliorer les connaissances et la compréhension des utilisateurs. On arrivera alors à augmenter l'efficacité globale du SBC.

2.2 La tâche de construction des explications

Le but de ce paragraphe est de caractériser le problème de construction et de génération des explications.

Nous allons ainsi voir que cette tâche est généralement vue comme une tâche de résolution de problème. Certains auteurs parlent également de problème mal structuré ou de problème complexe.

2.2.1 Une tâche de résolution de problèmes

Les travaux visant à faire reconnaître la construction et la génération d'explications comme une tâche à part entière nécessitant un raisonnement complet sont nombreux. Ce raisonnement mis en œuvre est appelé le raisonnement explicatif. On peut citer notamment les travaux autour du système EES [Wick et al.89] [Wick et al.92], ceux autour du projet AIDE [Greboval94] [Greboval et al.94] [Kassel95] et encore [JD90b] [Cawsey95] [Lemaire92c].

D'après l'introduction de la conférence française EXPLICATION'96 à Sophia-Antipolis, « *l'objectif principal de la précédente édition du congrès de faire apparaître la construction d'explications comme une tâche à part entière nécessitant ses propres connaissances et son propre mode de raisonnement est maintenant largement admis.* » On peut donc considérer que cette reconnaissance est effective. Ainsi, « *il n'est plus à prouver que cette tâche de génération nécessite un raisonnement à part entière* » [Greboval96b].

Cette reconnaissance pourrait entraîner la modélisation de l'explication comme une tâche de résolution de problèmes en trois niveaux d'après la méthodologie KADS. Ainsi un modèle d'expertise d'un système explicatif dans AIDE est défini par [Greboval96b] :

1. une théorie du contrôle,
2. une théorie du domaine,
3. Un modèle spécifique du cas traité ;

Dans un tel modèle d'expertise :

- la théorie du contrôle explicative correspond à la représentation des connaissances de stratégies explicatives : des buts du discours (par exemple, justifier-diagnostic, définir-concept ...) associés aux méthodes de résolution qui les réalisent ;
- la théorie du domaine explicative correspond à la représentation des connaissances du domaine explicatives c'est-à-dire des connaissances indépendantes de toute application mais propres à la représentation de l'objet explication (par exemple, la structure informationnelle, la structure intentionnelle) ;
- le modèle spécifique du cas traité explicatif comprend, outre le modèle d'expertise objet, une représentation des connaissances élaborées au cours d'un raisonnement explicatif : la trace des raisonnements objet et explicatif, l'objet explication, l'interprétation de la question de l'utilisateur. L'historique du dialogue se trouve aussi représenté dans cette couche.

2.2.2 Un problème mal structuré

En complément de la reconnaissance de la tâche de construction des explications comme une tâche de résolution de problème, certains auteurs évoquent le terme de « problème mal structuré » ou de « problème mal défini » pour caractériser le problème de construction des explications.

Ainsi, d'après [Lemaire92c], Newell définit un « problème mal structuré » par des buts mal définis, l'absence de chemin prédéterminé des états initiaux aux buts et une absence de critères bien définis pour juger si une solution est acceptable.

Dans [Farreny et al.87], les auteurs considèrent un « problème bien défini » s'il existe pour ce problème une procédure qui permet de tester automatiquement toute solution proposée et de la valider comme solution effective, si c'est le cas, en un nombre fini d'étapes. D'autre part, il faudra pouvoir disposer pour un problème bien défini d'un ensemble de moyens pour engendrer et énumérer des solutions potentielles à soumettre au test.

En conclusion, d'après [Lemaire92c], « *le problème de l'explication est mal structuré. Cela n'est pas un aveu d'impuissance, Simon affirme d'ailleurs que la différence entre problème bien structuré et mal structuré ne se situe qu'au niveau de la masse des connaissances à considérer et que les mécanismes sous-jacents sont les mêmes. Dans le second cas, le nombre de connaissances est tel que nous, humains, ne pouvons accéder pleinement à la structure du problème.* »

2.2.3 Un problème complexe

Nous venons de voir que pour plusieurs auteurs, la tâche de construction des explications était considérée comme un problème mal structuré. Certains auteurs se sont aussi intéressés à évaluer la difficulté de cette tâche.

D'après [Kassel89], le raisonnement explicatif peut être plus ou moins complexe, et donc plus ou moins profond, selon l'objectif et la qualité des explications que l'on souhaite obtenir. Présenter une étape d'un raisonnement ou sa conclusion est un problème explicatif simple. En revanche, justifier la conclusion ou certains points du raisonnement, présenter une synthèse du raisonnement, ou montrer que plusieurs raisonnements étaient possibles pour arriver à la même conclusion sont des exemples de problèmes explicatifs plus complexes, nécessitant un raisonnement profond exigeant une compréhension en profondeur du raisonnement à expliquer [Kassel89]. La complexité peut également être liée à une exigence de qualité comme le fait de fournir des explications pédagogiques tenant compte du niveau de connaissance de l'interlocuteur.

Dans [Greboval et al.94], les auteurs expliquent qu'« *il est impossible, en général, de caractériser la complexité de cette tâche de conception, à cause de la diversité des problèmes des explications.* » On sait par ailleurs que la construction d'une explication négative est plus difficile à construire qu'une explication positive [Rousset et al.87].

Pour évaluer la difficulté de la de construction des explications, B. Lemaire commence par identifier les principales tâches qui interviennent dans cette construction. Dans le contexte des explications en langue naturelle, il distingue [Lemaire92c] :

- saisie de la question de l'utilisateur,
- interprétation de la question,
- choix de la stratégie appropriée,
- construction de l'explication correspondante,
- transmission à l'utilisateur.

Bien que ce modèle de raisonnement soit trop réducteur, il permet à l'auteur d'affirmer qu'« *une tâche ne possède pas toute l'information nécessaire à la réalisation de ses objectifs* ». L'auteur conclut ainsi « *l'explication est un problème complexe qui nécessite des mécanismes de raisonnements particuliers* » [Lemaire92c]. C'est une conclusion identique à celle donnée dans [Carcagno et al.92].

Une autre origine de la complexité du problème de l'explication est donné dans [Balacheff90b] : l'explication prend un sens non seulement en référence à la connaissance mais aussi en référence au contexte de sa production. N. Balacheff donne l'exemple suivant : « *un élève factorisera $x^2 - 4$ mais hésitera, se demandant s'il a le droit, à effectuer la factorisation de $x^2 - \sqrt{2}$. Le domaine de validité de la connaissance est finalement déterminé par l'univers de pratique défini par la formation* » [Balacheff90b].

2.3 Dissocier construction des explications et raisonnement

Il est apparu, très tôt, utile de séparer la description des faits du domaine, des métarègles, qui représentent les stratégies de diagnostic employées par le système [Swartout92] [Clancey83]. Cette séparation était, par exemple, effective dans le système NEOMYCIN [Clancey et al.81]. Une approche très connue, qui avait pour but de séparer différents types de connaissances, est l'approche des tâches génériques de Chandrasekaran [Chandrasekaran86].

Cette séparation a ensuite été généralisée pour les explications. On considère maintenant qu'il est indispensable de séparer la résolution du problème de la construction des explications

[Wick et al.92] [Wick et al.95] [Berry95] [Kassel89] [Paris92] [Sprenger92], comme pour le système EES [Neches et al.84], sur lequel nous reviendrons au chapitre 6.

Il est alors utile de réaliser deux bases de connaissances, l'une servant à la résolution du problème, l'autre étant utilisée pour produire les explications [Swartout92]. Cette séparation en plusieurs bases de connaissances en fonction des connaissances décrites, présente également l'avantage de rendre les systèmes plus modulaires et plus faciles à maintenir [Swartout et al.93] [Paris92].

2.4 Types d'explication

De nombreux travaux ont cherché à établir des catégories d'explications ou à créer des typologies, les premiers étant ceux des psychologues pour catégoriser les explications données dans des dialogues oraux.

Les typologies les plus simples existantes se basent sur les différents types des questions ou des réponses. Ainsi, certains auteurs se sont penchés sur les intentions sous-jacentes d'une question (par exemple : vérification, habilitation ou jugement) [Hughes86], [Lehnert77], alors que d'autres comme Gilbert ont cherché à analyser le contenu sémantique des réponses.

On peut également faire le parallèle avec les explications données par des hommes et classer les explications en fonction de l'objet sur lequel elles portent. Ainsi, l'étude, réalisée dans [Bouri90], distingue :

1. explication des moyens de raisonnement

(a) explication des connaissances de base

- exhibition : il s'agit d'exhiber totalement ou partiellement un élément de la base de connaissances initiale non instancié (une règle, une taxonomie, une tâche, un fait),
- commentaire : si l'exhibition montre des informations que le moteur peut utiliser pour inférer, le commentaire montre des informations qui ne sont présentes dans le système qu'en vue de l'explication. Ces informations sont des bases implicites à partir desquelles le système raisonne (on utilise souvent plusieurs outils mentionnés ci-dessous, par exemple on exhibe et on commente par la référence et la justification).
 - la référence : les références concernant un élément de la base de connaissance, comme le nom de l'auteur, la date de son introduction dans la base,
 - la définition d'un terme,
 - l'illustration par un exemple,
 - l'explicitation de la nature des relations existant entre différents éléments de base ou différents termes,
 - la justification d'une règle par la présentation explicite du raisonnement sous-jacent à cette règle,

(b) explication du fonctionnement général du moteur d'inférence : on utilise les commentaires. Par exemple, on peut mentionner l'ordre d'évaluation des règles ou des éléments de prémisses d'une règle.

2. explication du raisonnement

(a) la description : la description revient à restituer fidèlement le raisonnement tenu par le moteur d'inférence avec les redondances et les échecs éventuels ;

- (b) la synthèse : elle consiste à supprimer, à partir d'une partie ou de la totalité du raisonnement tenu, les étapes jugées non pertinentes et à exhiber le raisonnement élagué ;
- (c) la comparaison : il s'agit de faire une comparaison entre le raisonnement tenu par le système et un autre raisonnement qui peut être celui tenu (ou supposé tenu) par l'utilisateur afin de détecter les points de rupture entre ces deux raisonnements ;
- (d) l'analyse de la sensibilité : elle consiste à étudier comment varierait la conclusion en fonction de tel ou tel fait. Cette analyse a été développée au sein du système SERIN [Bouri90].

On peut également ajouter à cette typologie les *explications non intentionnelles*, également appelées *explications spontanées*. De telles explications contiennent des éléments permettant à l'utilisateur de comprendre mais elles n'ont pas pour but premier d'expliquer. Un bon exemple des explications non intentionnelles est celui du dialogue entre un pilote d'avion et la tour de contrôle extrait de [Falzon96] : un pilote écoute le dialogue entre les autres pilotes et la tour de contrôle, il enregistre des informations qui ne lui étaient pas destinées mais qui sont néanmoins utiles pour lui comme la charge du trafic, la maîtrise de la situation par le contrôleur, les stratégies employées par celui-ci en cas d'engorgement, la visualisation spatiale des autres avions proches ... Toutes ces informations lui permettent de savoir si la situation est calme, normale ou surchargée et donc d'adapter son comportement en conséquence.

La question de l'élargissement du terme « explication » aux « explications spontanées » ne fait pas l'unanimité dans la communauté des chercheurs, mais elle ne semble pas prioritaire puisqu'il est évident que les explications spontanées sont très difficiles à modéliser dans un système explicatif.

Farreny et Prade ont étudié le problème de l'explication de raisonnements incertains [Farreny et al.90]. A partir des questions « Comment » et « Pourquoi » de MYCIN (voir les paragraphes 1.3.1.1 et 1.3.3), ils ont considéré six types de questions susceptibles d'explication en raisonnement incertain [Farreny et al.90] :

- Comment telle distribution de possibilité a-t-elle été obtenue ? Cette question correspond à la question « Comment » de MYCIN.
- Comment, pour l'essentiel, telle distribution de possibilité a-t-elle été obtenue ? D'après les auteurs, cette question peut à deux types de question du fait du terme *pour l'essentiel*. Premièrement, quels sont les sous-ensembles de faits qui à eux seuls conduiraient à une distribution de possibilité identique ? Deuxièmement, on peut souhaiter choisir pour l'opérateur les étapes les plus marquantes du raisonnement.
- Comment et pourquoi tels éléments du domaine de la conclusion ont un degré de possibilité nul ou faible ? Cette question étend en environnement incertain la recherche d'explications négatives.
- Dans le cas où la distribution de possibilité est trop incertaine ou trop imprécise, quels sont les faits qui jouent un rôle déterminant dans la mauvaise qualité de la réponse ?
- Comment varierait la distribution de possibilité de la conclusion en fonction de la distribution de possibilité de tel ou tels faits ?
- Pourquoi le système a-t-il cherché à évaluer tel fait ? Cette question correspond à la question « Pourquoi » de MYCIN, l'explication porte sur la stratégie d'inférence du système.

La typologie principale des explications la plus reconnue et la plus mentionnée, bien que datant d'une dizaine d'années, est celle de [Chandrasekaran et al.89]. Elle comporte trois types d'explications :

- Type 1 : Justifier le lien entre données et résultats.

- Type 2 : Justifier les connaissances elles-mêmes.
- Type 3 : Présenter la méthode de résolution mise en œuvre.

Les explications de type 1 sont les explications les plus naturelles mais ce ne sont pas les plus simples. Les explications de type 2 sont des explications *statiques*. Pourtant, elles ne se bornent pas à présenter les connaissances ; il peut être important de les *justifier*. Ce peut être fait en montrant de quelle façon elles sont liées à d'autres connaissances. Celles de type 3 correspondent à la description de la démarche suivie. Elles comprennent également les méthodes de discrimination, et les explications négatives. Ce sont les explications de plus haut niveau, les plus complexes.

Cette typologie est souvent reprise [Kassel et al.92], [Martin94], [Raccah92], [Xu et al.96], [PB94], ou légèrement modifiée [Bourcier et al.94] [Bourcier et al.92]. Par exemple, dans [Bourcier et al.92], un « *type 0 : présenter les connaissances* » a été introduit. « *Le type 0 concerne toutes les connaissances représentées explicitement. Il devient alors possible (pour notre application SATIN) de demander entre autre : quels sont les diagnostics émis ? Quel est le tableau clinique du bébé ?* ». Nous présenterons une version plus détaillée et légèrement modifiée de cette typologie au paragraphe 5.2.1.

2.5 Interactivité avec l'utilisateur

Dans [Karsenty96], Karsenty a effectué une analyse psychologique pour (i) identifier les caractéristiques des utilisateurs qui affectent la production d'explication et (ii) comprendre comment ces caractéristiques sont prises en compte par un expert humain pour adapter ses explications. Il indique que le niveau d'expertise des utilisateurs affecte sensiblement la quantité et le type d'explication fournie par le concepteur, et que le niveau d'intérêt et le niveau de responsabilité affectent dans une moindre mesure le type d'explication fournie. Il introduit une nouvelle dimension prise en compte par le concepteur pour adapter ses explications : *l'accessibilité* du destinataire aux informations ou aux connaissances. Selon l'auteur, cette accessibilité dépend de trois facteurs :

- le temps séparant l'actuelle utilisation de la dernière utilisation,
- la fréquence d'utilisation,
- les relations sémantiques entre les concepts.

Cette accessibilité aux informations expliquerait deux phénomènes observés dans les dialogues étudiés : les explications implicites (le concepteur ne doit pas toujours décrire avec trop de détails un concept inconnu, puisqu'il peut supposer que l'utilisateur sera capable d'*inférer* l'explication de ce concept inconnu) et les discours redondants (il semblerait que le concepteur décrive certains concepts connus avec beaucoup de détails quand il suppose que l'utilisateur pourrait avoir des difficultés pour retrouver les concepts sémantiquement liés à celui-ci).

2.5.1 Questions et réponses en langue naturelle

Comme nous l'avons expliqué au chapitre précédent, de nombreux systèmes explicatifs *dialoguent* avec l'utilisateur en langage naturel. Les questions sont tapées par l'utilisateur puis le système analyse la question et répond en langue naturelle. On parle de « *dialogue explicatif* » durant lequel l'utilisateur n'est pas un simple récepteur mais un acteur pour le processus de génération d'explications [Gene95].

Moore parle d'« *explications réactives* », intégrées dans un processus interactif (en plusieurs échanges) [Moore et al.89]. Quatre caractéristiques, que doit vérifier une approche réactive de

l'explication, sont alors définies [Moore95] :

- accepter un retour de l'utilisateur ;
- modifier l'explication si l'utilisateur indique qu'il n'est pas satisfait avec la réponse ;
- répondre à des question précédentes (appelées « *follow-up question* ») ;
- offrir des explications complémentaires même si l'utilisateur ne pose pas une « *follow-up question* » bien formulée.

Le groupe de travail **GENE**, pour « Génération d'Explication NÉgociées », du PRC-IA, a introduit le terme d' « *explications négociées* », avec la définition suivante : « *des explications qui sont produites dans le but d'atteindre un accord par rapport à un ensemble d'enjeux donné, à partir d'un état initial problématique* » [Gene96].

L'objectif du groupe est « *de spécifier un système d'aide à la formulation du problème de l'usager d'un SBC documentaire, qui peut l'aider à identifier plus précisément sa demande par raffinements successifs obtenus par un jeu de négociations et d'explications des compétences du SBC* » [Gene96]. Un corpus commun de dialogue, recueilli par la technique du *magicien d'Oz*, que nous présenterons au paragraphe 4.2, mettant en jeu des explications dans le domaine médical a été créé (application du projet **SATIN** de l'U.T. de Compiègne). L'objectif actuel principal du groupe est de déterminer dans quelle mesure les fonctions des dialogues *Médecin expert/ Internes* en langage naturel peuvent être transposées dans une interface graphique interactive enrichie par une génération de texte limitée [Gene96].

Le système et l'utilisateur collaborent avec pour objectifs principaux

- une compréhension mutuelle,
- un accord mutuel sur la tâche à réaliser,
- une résolution des conflits.

Ces trois objectifs peuvent être réalisés par les trois fonctions : *explication*, *négociation* et *argumentation* qui interfèrent entre elles suivant le schéma figure 2.1.

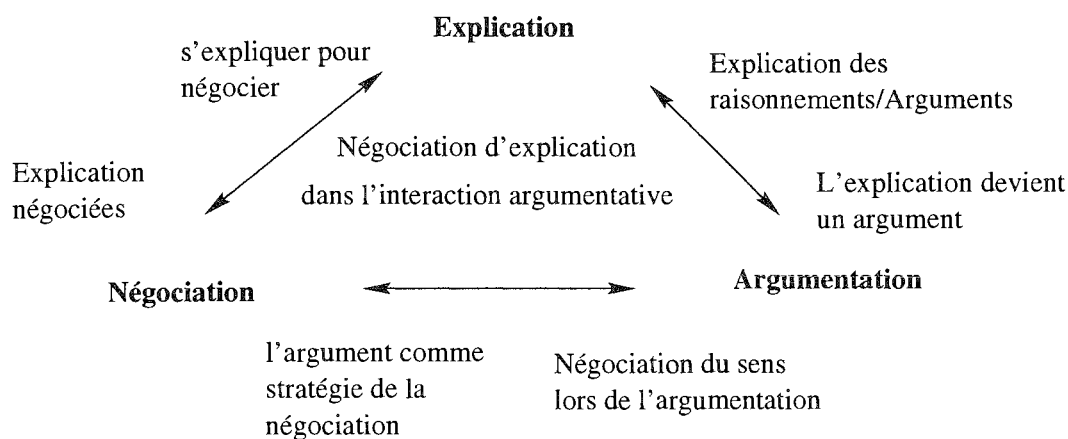


FIG. 2.1 – Le dialogue explicatif pour GENE (extrait de [Gene96])

De nombreuses études, comme le groupe GENE ou [Grize96] [Charnay96b] [Charnay96a] [Falzon96] [Flieller et al.96] [Gabriel96a] [Karsenty et al.95a] [Colby et al.69] [Cooke94], portent sur des dialogues explicatifs *théoriques*, c'est-à-dire des dialogues oraux non générés par un système et un utilisateur. Le but est alors d'étudier, dans l'absolu, le meilleur dialogue explicatif possible mais sans le programmer .

D'autres travaux cherchent à introduire réellement ces explications dans des systèmes explicatifs, ce sont par exemple les travaux déjà cités autour du projet AIDE [Kassel95] [Greboval96b] [Bourcier et al.94] [Bourcier96] [Barboux et al.90] et du système EES [Neches et al.84] [Paris92] [Moore95] ou encore [Frohlich88] [Sarantinos et al.91] [Suthers93] [Suthers et al.92] [Balacheff90b] [Zukerman et al.93] ...

Mais cette approche de dialogue explicatif est très lourde. D'après [Metzler et al.98], de telles approches sont essentiellement communes pour les personnes qui travaillent dans le domaine de la compréhension du langage naturel, mais elles impliquent, comme nous l'avons vu, des tâches complexes de modélisation de l'utilisateur, de raisonnement sur les besoins et les buts des utilisateurs, de structuration du dialogue, et de contrôle des buts du discours.

2.5.2 Explications interactives

Pour combler le problème de pauvreté des explications schématiques et ne pas avoir à régler le problème de la complexité des explications en langue naturelle, les chercheurs ont très vite cherché à produire des *explications interactives* [Carletta90]. Ils ont préféré s'orienter vers des explications graphiques plus compréhensibles et plus visuelles.

Les interactions ont lieu généralement via l'interface Homme-Machine (IHM) réalisée. Les explications peuvent prendre des formes très diverses comme des explications graphiques [Mittal et al.95a] [Maybury91] [Buchanan et al.95] [Cawsey88] [Cawsey91] [Jones93], des explications intégrant textes et graphiques, comme pour le système COMET²⁷, générant en parallèle ces deux types d'explications [Feiner et al.90] [McKeown et al.92], ou des explications multi-média [Maybury91] [Maybury95] [Rosis et al.95].

2.6 Utilisation d'un modèle de l'utilisateur

Comme nous l'avons déjà mentionné dans différents paragraphes de ce chapitre ou du chapitre précédent, de nombreux systèmes explicatifs, à la manière des systèmes d'EIAO, utilisent des modèles des utilisateurs. Ces modèles définissent des catégories d'utilisateurs type avec des compétences ou des connaissances de base et des connaissances sur l'utilisateur effectif. Par exemple, pour un utilisateur, nommé *Maxime*, de la catégorie *élève de troisième*, on pourra supposer connues toutes les notions de géométrie au programme de quatrième mais on vérifiera pour chaque nouvelle notion introduite que l'apprentissage est bien assimilé. Le système enregistrera l'historique des questions et des réponses pour ne pas donner à chaque fois les mêmes informations. Le système pourra également prendre en compte des préférences visuelles (de mise en page, de couleur, ou de forme) ou des préférences d'explications (toujours mettre des schémas, faire une conclusion synthétique, employer des exemples simples ...).

Ce genre de modèle est très complet et permet d'adapter les explications fournies aux utilisateurs, en revanche c'est un mécanisme très lourd à gérer.

Dans [Cawsey95], Alison Cawsey mentionne un problème des modèles de l'utilisateur : il peut y avoir plusieurs utilisateurs impliqués. Par exemple, dans [Rosis et al.95], l'explication dépend de deux utilisateurs. Un médecin est l'utilisateur du SBC réalisé. Il interagit avec le système pour déterminer les médicaments à prescrire à un patient. Le système génère alors une explication de cette prescription destinée au patient qui doit être appropriée au patient et refléter les préférences du médecin (c'est-à-dire ce qu'il est important d'inclure dans l'explication donnée). Il faudrait donc que le système ne s'adapte pas uniquement à l'utilisateur effectif.

27. COordinated Multimedia Explanation Testbed

Dans [Rulquin94], Virginie Rulquin distingue plusieurs catégories de connaissances qui peuvent être modélisées :

- les aptitudes de l'utilisateur : la capacité de l'utilisateur à comprendre les questions et à pouvoir y répondre ;
- les buts et les plans d'actions de l'utilisateur ;
- les goûts et les préférences de l'utilisateur ;
- les croyances et les connaissances de l'utilisateur.

Elle souligne que les difficultés viennent des mauvaises estimations du niveau de connaissance de l'utilisateur pouvant entraîner des réponses inadaptées, des catégorisations trop rapides d'un individu, de l'évolution des données et des connaissances, des différences d'interprétation d'un texte ou d'une image en fonction des référents culturels et personnels, du maintien de la cohérence des du modèle construit (problème de contradictions ou d'incorrections), des mauvaises descriptions obtenues par autodéfinition de l'utilisateur et de la définition des connaissances acquises (Quand sait-on si un fait est connu ou assimilé afin de ne plus le redéfinir ou le proposer?) [Rulquin94].

Dans le domaine des systèmes de recherche d'information, on utilise souvent un modèle de l'utilisateur établi suivant deux méthodes : un modèle établi grâce à des questionnaires et utilisé sous la forme de stéréotypes (acquisition explicite), ou un modèle construit incrémentalement par le système pendant les sessions de recherche d'un usager (acquisition implicite), ces deux méthodes n'étant pas incompatibles [Simonnot96].

Lorsqu'il est implanté sous la forme de stéréotypes, le modèle de l'utilisateur concerne le plus souvent [Simonnot96] :

- son niveau d'expérience vis-à-vis des systèmes de recherche d'information,
- son niveau d'expérience vis-à-vis du système concerné,
- son niveau d'expérience dans le domaine d'application concerné,
- ses préférences en terme de stratégies de recherche ou de genre de besoins habituels (techniques, artistiques, émotionnels ...).

Dans ses travaux sur les micromondes pour l'enseignement de la géométrie, Nicolas Van Labecke utilise quatre catégories de maîtrise d'une connaissance :

- information,
- opération,
- maîtrise,
- expertise.

Ces catégories peuvent servir à déterminer le niveau d'information que l'on peut transmettre à l'utilisateur.

Dans le système **ESMERALDA**, sur lequel nous reviendrons au paragraphe 6.1.2, B. Lemaire utilise un modèle d'utilisateur simple. « *Le modèle que nous utilisons est très simple, de type overlay model. Les concepts du domaine sont classés en trois catégories : ceux que l'utilisateur connaît (ou est censé connaître), ceux qu'il ne connaît pas et ceux pour lesquels on ne dispose pas d'information* » [Lemaire92c].

Le même genre de modèle est utilisé dans le système **EDGE** pour représenter les connaissances de l'utilisateur et ses mises à jour [Cawsey92]. Ce modèle se base sur les réponses de l'utilisateur aux questions du système pour évaluer le niveau d'expertise de l'utilisateur.

Néanmoins, il ne faut oublier que « *construire un modèle de l'utilisateur est difficile, voire coûteux par rapport au bénéfice que l'on peut en tirer* » [Giboin95]. De plus, « *un modèle de l'utilisateur n'est jamais complet, ni forcément correct* » [Paris92]. Il faut donc bien évaluer le coût et l'apport d'un tel modèle avant de prévoir sa réalisation.

2.7 Acquisition des connaissances explicatives

Précisons tout d'abord que « *l'acquisition des connaissances n'a pas pour objet la seule collecte de connaissances qui seraient déjà là. Elle est une entreprise de reconstruction rationnelle d'un savoir qui, le plus souvent, ne préexiste pas, comme tel, à son intervention* » [Roux94] (cité dans [Trichet98]). « *L'ingénieur de la connaissance ne doit pas se contenter de recueillir des règles de production, il doit amener les experts du domaine à identifier et structurer leurs savoirs et savoir-faire, à différencier les différents types de connaissances qu'ils manipulent et à expliciter les connaissances implicites* » [Trichet98].

La phase d'acquisition des connaissances explicatives emprunte beaucoup aux méthodes d'acquisition des connaissances du domaine. La plupart des méthodes classiques, comme celles décrites dans [Dieng90], peuvent être appliquées.

Certains travaux essaient de dégager les contraintes spécifiques dues à la tâche d'explications comme [Eva95], [AG et al.93] ou [Reynaud91].

La tâche d'acquisition des connaissances explicatives est difficile. Cette difficulté est, par exemple, mentionnée par Benoît Lemaire à propos des expérimentations autour du projet AIDE (dont une brève description est donnée au paragraphe 1.4.1): « *il est difficile d'extraire des connaissances à partir d'un discours en langage naturel, mais là, la tâche est rendue plus ardue encore par le fait que ce qu'il faut acquérir est confondu avec ce qui le véhicule : la connaissance d'explication est son propre moyen de communication* » [Lemaire92c]. Les expérimentations effectuées avaient lieu entre un expert, le chef du service de néonatalogie, et un utilisateur, un interne. La première expérimentation consistait en un discours sur un cas concret suivi par une étape d'analyse des explications produites. La deuxième expérimentation se déroulait dans le même contexte en restreignant le discours explicatif par l'intermédiaire d'un clavier-écran.

Des expérimentations du même type ont été faites au LRI²⁸ d'Orsay autour du système expert de diagnostic DIVA (décrit au paragraphe 1.4.3) en collaboration avec EDF. Les dialogues explicatifs avaient lieu entre un expert et un utilisateur avec, ou sans, le système de diagnostic.

On peut également ajouter, d'après [Swartout92], que l'acquisition des connaissances explicatives force le développement des systèmes à être plus explicite et dicté par des principes.

Nous reviendrons plus longuement sur cette étape d'acquisition des connaissances explicatives dans le chapitre 4, nous définirons les différents interlocuteurs de cette étape et une revue des méthodes classiques les plus utilisées. Ceci nous amènera à proposer d'effectuer l'étape d'acquisition des connaissances explicatives en cinq phases.

2.8 Représentation des connaissances explicatives

Les connaissances explicatives peuvent utiliser les mêmes formes de représentations que les connaissances en général. Néanmoins, la représentation sous forme de règles de production, qui était celle choisie au tout début, comporte de nombreux inconvénients, principalement parce qu'elle ne permet pas de d'avoir d'explications sur les stratégies de résolution [Clancey83] [Clancey93] [Chandrasekaran et al.89]. Cependant certains systèmes, comme SACS0 [Bayad et al.94], PROSE [JD90b] [JD92], C.Q.F.E [Kassel86b] ou SEPT [Brezillon89] [Brezillon92] utilisent encore ce type de représentation des connaissances.

Quelques auteurs s'inspirent des graphes conceptuels de M. Sowa [Sowa84] pour représenter des explications naturelles. Ainsi, dans [Bourcier et al.92], pour le système SATIN, les auteurs représentent les phrases à l'aide de graphes conceptuels reliés grâce à des relations issues de la

28. Laboratoire de Recherche en Informatique <http://www.lri.fr>

théories des structures rhétoriques (RST). Cette dernière théorie a été développée par Mann et Thompson, c'est une théorie fonctionnelle d'organisation de textes.

Dans le projet EES déjà mentionné, le module d'explication utilise « *plusieurs connaissances de nature diverses voire hétérogènes représentées de manière explicite et séparées [...] qui ne sont pas nécessaires au raisonnement proprement dit mais qui sont essentielles pour sa justification* » [Paris92] :

- une description de la terminologie du système : elle correspond à la définition des termes employés par le système ;
- le modèle du domaine : il fournit une description du monde dans lequel le système va raisonner ;
- les connaissances opératoires : ces connaissances portent sur les buts qui précisent ce que le système peut réaliser dans le domaine d'application du problème et sur les plans réalisant ces buts. Elles vont permettre au système de résoudre un problème ;
- les connaissances compilées : elles sont déduites par un traducteur automatique à partir des trois bases de connaissances précédentes ;
- la structure de la conception : elle décrit comment les connaissances opératoires ont été dérivées à partir des bases de connaissances déclaratives. Elle donne donc la justification des connaissances procédurales opératoires ;
- une trace de l'exécution.

2.9 Evaluation et validation des explications

D'après David B. Leake, le succès d'un système basé sur des explications dépend de ces explications [Schank et al.94].

Pour l'auteur, le fait qu'une explication puisse être une *bonne* explication, peut être jugé d'après deux éléments : ce que le constructeur de l'explication (en anglais *the explainer*) sait et ce qu'il est nécessaire de découvrir. Leake a établi une théorie de l'évaluation des explications dans le cadre des explications à partir de cas (*case-based explanation*, voir le paragraphe 2.10.2), basée sur les trois facteurs suivants [Schank et al.94] [Leake95] :

- l'adéquation entre l'explication candidate et les croyances ou attentes du constructeur de l'explication (qui détermine la plausibilité de l'explication),
- l'anomalie qui motive le système à expliquer (qui détermine le centre ou but initial de l'explication) et
- les buts du système au-delà de la compréhension (qui détermine les informations additionnelles que l'explication doit donner pour être utile).

Pour [Carcagno et al.92], « *d'une part, la valeur explicative d'un texte dépend non seulement des informations qu'il contient, mais encore de la manière dont ces informations sont structurées et présentées. D'autre part, la valeur explicative d'une réponse n'est pas une qualité intrinsèque au texte, mais accordée par l'interlocuteur en fonction de ses besoins et connaissances.* »

On peut alors identifier deux options principales [Carcagno et al.92] [Swartout92] :

- générer des explications supposés *bonnes* du premier coup. On utilisera cette méthode lorsque l'on dispose d'un modèle de l'utilisateur très précis qui permet d'adapter les explications ;
- améliorer les explications en fonction des réactions des utilisateurs. Cette approche correspond au dialogue explicatif aboutissant aux explications négociées, présentées au paragraphe 2.5.1. Dans ce cas, il faut accepter de remettre en cause les choix faits *a priori*

en fonction des réactions de l'utilisateur. D'après [Carcagno et al.92], « *cette approche se justifie lorsque le modèle de l'utilisateur est peu fiable* ».

Dans [Flieller et al.96], les auteurs ont étudié des explications orales et gestuelles pour analyser les caractéristiques des explications transmises. Ils se sont basés sur un problème de la vie quotidienne : la réalisation d'un nœud de cravate. Les explications étaient données par une personne à une femme (supposée ne pas connaître la manière de réaliser un nœud de cravate). Les auteurs ont identifié les caractéristiques formelles suivantes [Flieller et al.96] :

- structuration : la structuration est l'organisation de l'explication en parties explicitement indiquées, correspondant aux diverses opérations que l'explicataire²⁹ doit effectuer pour atteindre le but ;
- précision : la précision a été opérationnalisée dans cette étude par le nombre de termes vagues contenus dans les explications ;
- continuité : la continuité de l'explication s'oppose à ce que l'on pourrait appeler les *labyrinthes verbaux*, c'est-à-dire les faux départs, les arrêts, certaines répétitions, digressions, les retours en arrière motivés par un oubli ... ;
- redondance : il y a souvent peu de redondances dans les explications données par des systèmes, alors que des répétitions ou des reformulations paraissent s'imposer dans les explications orales dès que les informations sont nombreuses ou difficiles à intégrer.

D'après [Bourcier96], l'évaluation des explications peut se faire selon différents critères tels que la complexité de l'explication produite, sa longueur ou si le but intentionnel est atteint. L'évaluation des explications est intéressante pour choisir la meilleure explication mais aussi pour que le système puisse répondre « *Je n'ai pas d'explication* » plutôt que de fournir une explication jugée de mauvaise qualité [Bourcier et al.92]. On peut voir que l'idée de ces chercheurs est d'introduire l'évaluation des explications dans le processus de construction et de génération des explications. Le but est d'évaluer des explications candidates avant de les proposer aux utilisateurs.

L'approche multi-évaluateurs, développée par [Giboin et al.92], « *exploite l'idée que plusieurs acteurs peuvent, aux différentes phases du cycle de vie d'un SBC, seuls ou en interaction, évaluer les explications en réalisant une analyse dimensionnelle.* » Cette approche a été mise en place car les auteurs n'ont pas trouvé de méthode systématique d'évaluations des explications. Ils distinguent cinq types d'évaluateurs : le cogniticien, l'expert, l'utilisateur type (c'est-à-dire l'utilisateur potentiel du système), l'utilisateur réel et le système lui-même. Les neuf dimensions de l'évaluation des explications sont : l'auteur, le point de vue, l'objectif, le destinataire, le moment, l'objet de l'évaluation, le modèle de référence, le processus d'évaluation et le résultat de l'évaluation.

Cette approche est très intéressante, nos travaux à ce sujet, que ce soit les critères d'évaluation des explications, présentés au paragraphe 4.10 ou les fiches descriptives, présentés au paragraphe 8.4.6, vont dans le même sens.

Pour le système EES, les auteurs du système ont « *complété la base de connaissances par des connaissances nécessaires pour produire de bonnes explications* » [Paris92]. Cécile Paris décrit que pour être efficace et appropriée, une explication doit être :

- informative ;
- cohérente : les informations doivent être organisées et structurées ;
- compréhensible ;

29. Les auteurs de [Flieller et al.96] désignent ainsi le destinataire de l'explication

- pertinente : la réponse doit permettre à l'utilisateur de progresser vers la compréhension de ce qu'il posait comme question.

2.10 Construction des explications

Nous allons traiter dans ce paragraphe des mécanismes de construction des explications. Ce paragraphe commencera par une liste des techniques les plus utilisées et l'identification de trois phases principales pour la construction des explications. Nous verrons ensuite les mécanismes de construction des explications à partir de cas.

2.10.1 Les principes

Dans le contexte de la construction et production d'explications en langue naturelle, la phase de construction est précédée d'une phase de compréhension de la requête de l'utilisateur [Schank86]. Cette compréhension utilise par exemple dans le cas de MYCIN, une analyse par mots-clés, qui aboutit à cinq catégories pour les questions posées [Davis et al.77].

Les techniques les plus utilisées peuvent être qualifiées de « techniques en amont » ou « techniques en aval » [Barboux et al.90]. Les techniques en amont s'intéressent particulièrement à la représentation des connaissances dans les systèmes et à la mémorisation avant la fin de l'exécution du raisonnement, alors que les techniques en aval sont mises en œuvre après le raisonnement du système [Bouri90].

Parmi les techniques les plus utilisées, on peut citer :

- la mémorisation de la trace de raisonnement,
- la paraphrase de code [Swartout92],
- l'explicitation et l'organisation des connaissances de l'expertise,
- l'augmentation des connaissances en vue de l'explication par des informations relatives à l'expertise ou à un modèle de l'utilisateur,
- le filtrage de la trace,
- la reconstitution d'un raisonnement,
- l'analyse formelle du raisonnement du système.
- les explications calquées sur des schémas d'explication : l'approche consiste à associer des schémas d'explications à des types de questions prédéfinies. Ces schémas sont instanciés de manière contextuelle, mais ont une structure invariable. Les travaux, comme ESMERALDA [Lemaire92c] ou TAILOR [Paris88], se basent généralement sur le concept de « schémas rhétoriques », développés par McKeown dans le système Text [McKeown85]. Pour élaborer le schéma principal, nommé « *constituency schema* », Kathleen R. McKeown a remarqué que les explications humaines décrivent souvent les objets d'après les quatre étapes suivantes :
 1. identification de l'objet en tant que membre d'une classe générique ou présentation de ses attributs ;
 2. présentation de ses constituants ;
 3. description de chacun des constituants ;
 4. ajout d'informations attributives ou analogiques.

La principale critique de cette approche est qu'elle permet de connaître le *comment* de l'utilisation d'un schéma mais pas le *pourquoi* [Lemaire92c].

A partir de l'analyse des principales techniques de construction des explications et de leur emploi dans les systèmes explicatifs, nous pouvons distinguer trois phases principales pour la construction des explications :

1. interprétation de la demande : le but est de reconnaître et de comprendre le besoin. Dans le cas de question ouverte posée par l'utilisateur, il faut alors interpréter la requête ;
2. choix et définition d'une stratégie d'explication pour générer une structure d'explication (structure d'un texte, structure hiérarchique ou structure indépendante du média choisi pour transmettre l'explication) ;
3. génération de l'explication finale : génération du texte final en langue naturelle, transformation de la structure en explication, utilisation d'un média (texte, schéma, image ...) ou affichage de l'explication.

2.10.2 Une voie à explorer : l'explication à partir de cas

Le raisonnement humain est généralement basé sur l'analogie [Richard90]. L'homme analyse la situation actuelle et le problème posé, il la compare avec une situation analogue pour laquelle il avait su trouver une solution et adapte la solution. C'est sur ce type de raisonnement que se base le raisonnement à partir de cas. On parle d'un cas semblable que l'on se remémore et de l'adaptation de la solution en fonction du problème posé.

Dans le contexte de la génération de langage naturel (on parle de *NLP* pour *natural language processing*), on peut utiliser les techniques du raisonnement à partir de cas (RàPC) pour la construction et la génération d'explications, c'est ce que l'on nomme en anglais « *case-based explanation* »³⁰.

Cette technique repose sur le paradigme de raisonnement à partir de cas (remémoration puis adaptation) que l'on peut décrire en trois étapes pour le problème de la construction d'explications [Schank et al.94] :

- retrouver une explication qui semble être pertinente pour l'anomalie,
- évaluer si l'explication remémorée a un sens lorsqu'elle est appliquée à l'anomalie courante concernée,
- si l'explication remémorée n'est pas parfaitement adaptée à l'anomalie courante concernée, alors adapter l'explication par une tentative de production d'une nouvelle variante qui s'adapte mieux à l'anomalie.

Le processus d'explication est alors décrit ainsi [Schank et al.94] :

1. trouver une anomalie,
2. établir le but de l'explication qui correspond à cette l'anomalie,
3. établir la question d'explication qui est active,
4. trouver un modèle d'explication qui traite de la question,
5. vérifier la cohérence causale du modèle appliqué à l'anomalie :
 - s'il est cohérent -aller à l'étape 6.
 - s'il est incohérent, soit trouver un nouveau modèle, soit arranger le modèle courant,
6. prendre l'explication et vérifier si elle peut être généralisée au-delà du cas présent par remémoration,
7. si la remémoration est trouvée, trouver la largeur de la généralisation à former,
8. réorganiser la mémoire en utilisant la nouvelle règle généralisée.

30. Certains auteurs utilisent parfois le terme d'« explications à partir de cas », mais cette traduction ne nous satisfait pas.

2.11 Génération des explications

La génération ou la production des explications prend différentes formes suivant que l'on cherche à produire des explications en langue naturelle, du texte structurée ou des schémas explicatifs. La forme des explications influe beaucoup sur cette étape.

La génération d'explications en langue naturelle utilise habituellement la mise en œuvre de stratégies de rhétorique basées sur les discours humains [Bouri90] [McKeown85] [Weiner80] [Mittal et al.91] [Paris92] [Swartout92]. « *Pour produire un texte cohérent et naturel, le module d'explication doit posséder des connaissances linguistiques semblables à celle qu'une personne utilise dans la même situation. Il doit donc posséder des stratégies de discours* » [Paris92]. Ceci permet de définir des buts du discours qui aident à la génération du texte final.

Ainsi dans [Greboval96b], l'auteur distingue « *deux étapes importantes et complémentaires lors de la génération d'un texte explicatif. La première concerne la génération dite profonde du texte, le contenu et la structure du texte sont déterminés lors de cette dernière. La deuxième étape concerne la génération dite de surface du texte. La traduction en langue naturelle du résultat obtenu par la première étape est réalisée durant cette deuxième étape.* »

Conclusion

En matière de conclusion, on peut citer le dernier paragraphe de [Swartout92] qui positionne la fonction d'explication dans la construction d'un SBC : « *Prendre en compte tout ce qui concerne les explications pendant qu'un système est en construction peut avoir des bénéfices qui vont au delà des explications, ceci permet au système d'être plus facile à maintenir et à étendre. De plus, fournir des explications ne doit pas être vu comme quelque chose qui est ajouté à un système existant mais au contraire, tout ce qui concerne la génération d'explications doit être traité comme une partie intrinsèque de la construction du système.* ».

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à la réalisation de la tâche de construction d'un système explicatif. L'analyse de la littérature nous a permis en effet de conclure que cette tâche est un problème mal structuré et complexe. Nous avons pu voir au sein de ce chapitre que les problèmes d'interaction avec les utilisateurs, d'acquisition des connaissances explicatives, de validation des explications proposées et de construction de celles-ci étaient particulièrement délicats.

Après avoir analysé les principales techniques ou méthodes relatives à la construction des explications et identifié les différentes étapes pour la réalisation d'un système explicatif, nous allons nous intéresser au contexte particulier de l'aide à la conduite de procédés complexes. Ce contexte industriel a été peu abordé. Il est fortement contraint et ne permet malheureusement pas d'appliquer les mécanismes relatifs aux discours explicatifs communément utilisés pour les applications médicales ou la formation et largement décrits par la communauté des chercheurs (par exemple par les anciens groupes français *Explication* et *GENE Génération d'explications négociées* du PRC-IA).

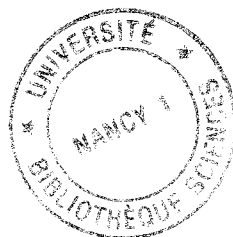
Dans les chapitres de la partie suivante, nous analyserons soigneusement ce contexte pour proposer des solutions acceptables.

Conclusion

Nous avons pu voir dans cette partie la diversité des explications introduites dans les systèmes explicatifs. Les explications étaient au départ destinées aux concepteurs des systèmes à bases de connaissances. Elles sont, maintenant, de plus en plus destinées aux utilisateurs. Elles prennent des formes variées suivant les destinataires, les possibilités de dialogue du système, l'objectif des explications ou le domaine d'application du système. Les nombreux travaux, commencés il y a vingt ans avec MYCIN, le plus connu des premiers systèmes experts, sont nombreux ; néanmoins, ils se concentrent plutôt sur les applications médicales et le contexte de la formation.

Nous pouvons constater que les systèmes explicatifs sont rarement utilisés dans un contexte industriel. Les explications sont généralement destinées aux utilisateurs des systèmes à bases de connaissances dans un souci de compréhension ou de formation. Les utilisateurs se consacrent alors entièrement à la lecture des explications proposées et peuvent interagir sur celles-ci. On peut ainsi parler d'explications négociées entre le système et l'utilisateur comportant jusqu'à vingt interactions possibles.

Nous verrons dans la partie suivante que le contexte de l'aide à la conduite de procédés complexes ne permet pas l'utilisation d'explications négociées mais impose des contraintes fortes tant pour les interactions possibles avec les utilisateurs que pour la forme ou le but des explications. Nous proposerons dans la partie II des mécanismes permettant de mener à bien les tâches d'acquisition et de construction des explications.



Deuxième partie

Développement de systèmes explicatifs pour l'aide à la conduite de procédés complexes

Introduction

D'après [Wick92], les méthodes traditionnelles des systèmes explicatifs permettent en général de s'adresser à deux catégories précises d'utilisateurs des systèmes experts : les cognitivistes et les experts du domaine. L'auteur mentionne également que la tendance actuelle est de destiner les explications à des utilisateurs novices. Ces utilisateurs ont des besoins nouveaux en terme d'explications auxquels les méthodes classiques des SBC explicatifs ne peuvent pas toujours répondre [Wick92].

De même, ainsi que l'avaient mentionné les auteurs du dossier spécial sur les explications dans les SBC du bulletin de l'AFIA³¹ « *il est sans doute utopique de penser que l'on aboutira à une conception unique de l'explication mais que l'on tendra plutôt vers des conceptions situées ou contextuelles* » [Giboin95].

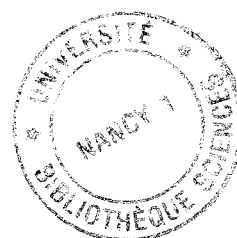
Dans la même idée, nous pensons que les techniques de construction et de production d'explications en langue naturelle à partir de requêtes formulées également en langue naturelle ne peuvent pas être appliquées directement pour des applications d'aide à la conduite de procédés complexes. Les explications générées dans les deux cas sont très différentes ; elles font appel à des méthodes de construction et de production distinctes mais surtout à des méthodes d'acquisition, de modélisation, d'évaluation très différentes et ne prennent pas les mêmes formes.

Nous pensons, contrairement à [Metzler et al.98], qu'il n'est pas possible de créer un système explicatif *parfait* qui soit indépendant du SBC, du domaine traité et de l'application. Aussi le but de cette partie est-il de proposer des techniques de construction et de production d'explications adaptées au contexte de la conduite de procédés industriels complexes. Nous allons décrire toutes les étapes du cycle de développement d'un système explicatif à intégrer dans un système d'aide à la conduite destiné à des opérateurs de conduite.

Nous préciserons tout d'abord dans cette partie le contexte d'application et les contraintes liées à ce contexte (chapitre 3). Nous utiliserons pour cela un modèle simplifié du raisonnement des opérateurs de conduite puis nous détaillerons la phase d'acquisition des connaissances explicatives, dans le chapitre 4, avant de proposer des modèles d'explications, adaptés à la conduite de procédés complexes et de détailler l'intégration du système explicatif au sein du SBC (chapitre 5). Nous nous servirons pour cela d'une architecture utilisant le paradigme multi-agents, détaillée dans le chapitre 6. Enfin nous préciserons pourquoi la fonction d'explication peut s'intégrer dans la démarche de capitalisation des connaissances et comment faire de cette fonction un outil pour la capitalisation des connaissances (chapitre 7).

Les différentes étapes du cycle de développement d'un système explicatif décrites dans cette partie seront reprises ensuite dans la troisième partie pour l'application à la conduite de hauts-fourneaux.

31. Association Française d'Intelligence Artificielle



Chapitre 3

Systèmes d'aide à la conduite de procédés complexes

Sommaire

3.1	Caractéristiques des systèmes d'aide à la conduite de procédés complexes	58
3.2	Raisonnements pour la conduite de procédés complexes	60
3.2.1	Les principales architectures de raisonnement	60
3.2.2	Proposition de modèle de raisonnement tenu par les opérateurs de conduite	63
3.3	Modèle de raisonnement et fonctions du SBC d'aide à la conduite	66
3.3.1	La fonction de détection	67
3.3.2	La fonction état courant du procédé	67
3.3.3	La fonction de diagnostic	67
3.3.4	La fonction de conseil d'action	68
3.4	Construction du système explicatif et construction du SBC . .	68

Introduction

Les systèmes d'aide à la conduite de procédés complexes présentent des spécificités dépendant du procédé, des utilisateurs, du système, ou des impératifs de commande, qui ne permettent pas d'utiliser les techniques classiques. Ces techniques sont utilisées pour la phase d'acquisition de connaissances, ou de construction de système explicatifs, par exemple dans un contexte d'apprentissage ou dans un contexte non industriel.

Les procédés traités sont dynamiques. Selon la définition de Basseville et Cordier : « *Un système dynamique est un système dans lequel les grandeurs qui interviennent (variables d'états X , entrées U , sorties Y) sont liées par des relations temporelles. Au contraire, dans un système statique, les liaisons entre variables sont exclusivement instantanées* » [Basseville et al.96]. Dans cette définition, « système » désigne des machines, des structures ou des procédés.

On peut trouver une définition différente : « *on qualifera de statique un environnement qui ne change que sous l'effet des actions du sujet* » alors que « *On qualifera de dynamique un environnement qui peut évoluer sans que le sujet, qui a pour tâche de le contrôler, n'intervienne* » [Richard et al.90a].

On peut utiliser la définition de Karsenty et Brézillon pour le terme *complexe* tiré de la définition de *problèmes complexes* que l'on applique ici aux procédés : « *par problèmes complexes, nous*

entendons des problèmes pour lesquels il n'est pas possible de spécifier tous les états possibles du domaine de tâches, et des problèmes pour lesquels le nombre de solutions possibles n'est pas prévisible (par exemple diagnostic dans les systèmes complexes, conception, recherche d'information dans un espace documentaire vaste) » [Karsenty et al.95a].

Le terme « conduite » est le terme habituellement employé, mais on peut trouver parfois à la place les termes moins adéquats de « surveillance », ou « contrôle ». En anglais on utilise « *monitoring* », ou « *control* ».

D'après Basseville et Cordier, les principales raisons qui conduisent à surveiller un système sont [Basseville et al.96] :

- La *conduite*, qu'il s'agit d'optimiser et qui est une tâche en ligne ; par exemple, l'aide à la conduite d'un haut-fourneau doit fournir à l'opérateur de conduite les outils nécessaires à la prise de décision d'actions visant à faire fonctionner le procédé au mieux (production optimale, sécurité, non-dégradation des équipements). Ceci passe par la surveillance du procédé afin de détecter toute anomalie de fonctionnement et l'identifier aussi bien que possible.
- Un *service*, qu'il faut assurer ; c'est le cas d'un réseau de télécommunications, par exemple. Là aussi, la capacité à détecter, localiser et diagnostiquer les événements indésirables, et à y réagir, est un enjeu crucial.
- La *maintenance*, qui a pour objet le remplacement ou la réparation d'équipements usés ou défectueux et que l'on souhaite optimiser. Elle s'effectue hors ligne : la maintenance corrective intervient après la détection et la localisation d'un défaut ; la maintenance préventive est, elle, le plus souvent systématique. Cependant la maintenance conditionnelle, qui est une alternative à la maintenance systématique, fait l'objet d'une demande croissante dans un grand nombre d'applications industrielles, par exemple pour les machines de production d'énergie. Cette maintenance est basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive. Elle impose donc des traitements en ligne, au moins en partie.

Nous nous situons, bien sûr, dans le premier cas : « la conduite ». C'est ainsi pour un « *système de surveillance en ligne* » que nous allons prioritairement définir un système explicatif. Ce contexte impose des contraintes fortes du fait de la connexion permanente avec le procédé ou de l'obligation de décision rapide (un procédé lent comme le haut-fourneau permet des prises de décision moins rapides que pour un procédé rapide comme le laminoir). Néanmoins, nous n'excluons pas pour autant un système hors ligne complétant un système en ligne réalisé dans un objectif d'apprentissage. Un système hors ligne comporte moins de contraintes sur l'analyse des données, il peut également être réalisé avant un système en ligne pour tester les techniques ou évaluer l'utilité d'un tel système. Il nous faudra dans la suite étudier également les explications générées dans un système hors ligne.

3.1 Caractéristiques des systèmes d'aide à la conduite de procédés complexes

Nous allons détailler dans la suite les contraintes imposées au système explicatif, adjoint au système d'aide à la conduite, suivant trois axes : caractéristiques du procédé, caractéristiques du SBC et caractéristiques du système explicatif.

1. caractéristiques du procédé :

- le procédé est fortement instrumenté,

- les données sont nombreuses, elles sont souvent bruitées, incertaines et peuvent comporter des invalidations (capteur invalide, valeur hors norme, donnée qui n'est plus valable, ...),
- les informations sont indirectes ; les variables cruciales ne peuvent pas être évaluées directement mais à partir de données plus périphériques [Hoc91],
- le procédé est continu, la plupart du temps 24h/24,
- le procédé nécessite une surveillance permanente et permet peu de temps morts dans l'activité de conduite,
- la connaissance du procédé est difficile et longue à acquérir, l'expérience est indispensable,
- une bonne connaissance du procédé est indispensable pour utiliser le système (le système ne s'adresse donc pas prioritairement aux débutants),
- la conduite est parfois collective,
- l'intégration de symptômes multiples est difficile,
- l'anticipation est une activité complexe,
- il y a une grande panoplie d'actions possibles, ces actions peuvent être simples, c'est ce que l'on appelle des actions réflexes, ou complexes, élaborées après réflexion,
- le contrôle est distant, l'effet dû à une action n'est pas toujours immédiat. D'après [Hoc91], ceci implique la mise en œuvre d'activités de planification et de pronostic ;

2. caractéristiques du SBC :

- les interactions entre le système et l'utilisateur doivent être minimales, il n'est pas possible d'envisager de questions textuelles tapées par les utilisateurs,
- le temps de consultation est limité, la consultation est souvent interruptible du fait d'autres activités de conduite,
- l'accès aux informations doit être simple et clair, les informations doivent être structurées de façon évidente,
- le système comporte plusieurs utilisateurs potentiels de niveaux de compétence différents, il peut parfois être même multi-utilisateurs,
- le système ne permet habituellement pas de savoir qui est l'utilisateur effectif (du fait de la conduite collective et des différents utilisateurs potentiels) ;

3. caractéristiques du système explicatif :

- le système explicatif est souvent très lié au système d'aide,
- il accède aux données issues du système de raisonnement,
- l'accès au système explicatif se fait habituellement depuis le système de raisonnement,
- la consultation de ce système explicatif empêche souvent la consultation du SBC, ce qui pose des problèmes lors de la surveillance en continue.

Certaines contraintes particulières peuvent également être ajoutées en fonction des contraintes dues au type de procédé. Par exemple, un procédé rapide comme le laminoir nécessite des explications courtes mais surtout très rapides. En revanche, pour un procédé lent et difficile comme le haut-fourneau, l'opérateur de conduite a besoin d'explications approfondies ou de rappels de connaissances pouvant nécessiter plus de temps de calcul.

Les contraintes détaillées ci-dessus imposent au système explicatif une forme particulière (en terme d'accès aux informations, d'interaction avec l'utilisateur, de connaissances des utilisateurs ou de point d'entrée des explications) comme nous le verrons au chapitre 5.

Par exemple, regardons les deux options, décrites au paragraphe 2.9, qui sont, (1) soit de générer des explications supposées *bonnes* du premier coup, qui suppose que l'on dispose d'un modèle de l'utilisateur très précis, (2) soit d'améliorer les explications en fonction des réactions de l'utilisateur par un mécanisme de négociation [Carcagno et al.92]. Nous pouvons constater qu'il semble très difficile d'introduire un dialogue explicatif en vue de l'amélioration des explications. Néanmoins, il est rare de pouvoir mettre en place un modèle de l'utilisateur, car le système ne permet habituellement pas de savoir qui est l'utilisateur effectif. Aussi il paraît évident que dans le contexte de la conduite de procédés complexes, nous ne pourrions pas utiliser les techniques habituellement mises en place et qu'il va falloir proposer de nouvelles formes d'explications. C'est ce que nous ferons dans les chapitres suivants.

3.2 Raisonnements pour la conduite de procédés complexes

3.2.1 Les principales architectures de raisonnement

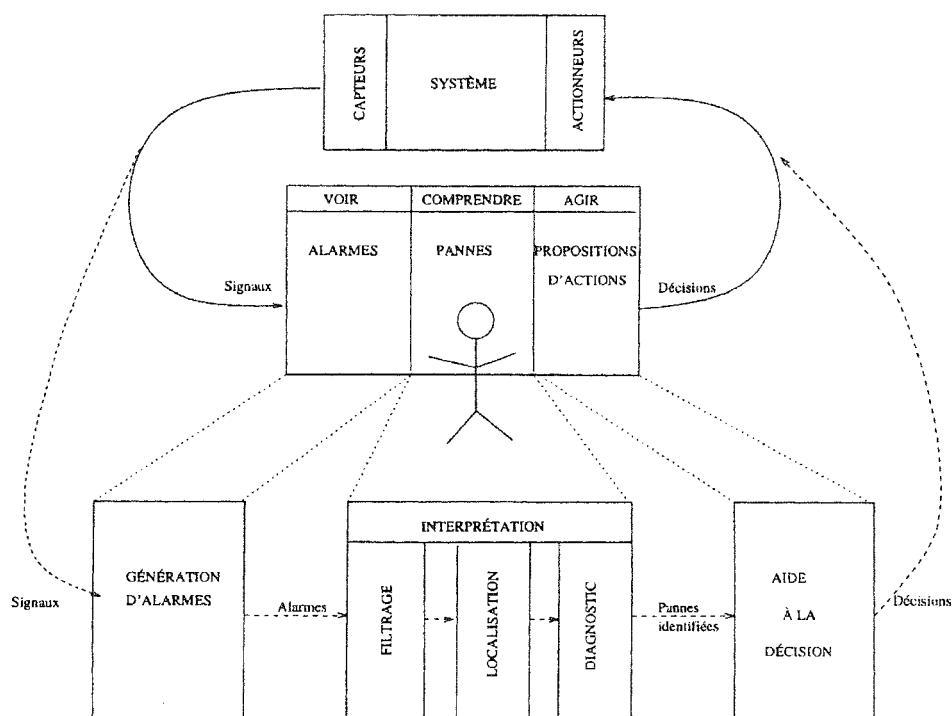


FIG. 3.1 – Architecture générale d'un système de surveillance en ligne (extrait de [Basseville et al.96])

La figure 3.1 présente l'architecture générale d'un système de surveillance en ligne. « On y retrouve les trois grandes fonctions Voir, Comprendre, Agir, nécessaires à une bonne surveillance. La fonction de perception s'appuie sur les données acquises par les capteurs du système à surveiller et transmet à l'opérateur des informations plus ou moins élaborées. L'opérateur analyse les informations reçues et décide des actions à entreprendre au travers d'actionneurs qui permettent d'agir sur le système » [Basseville et al.96].

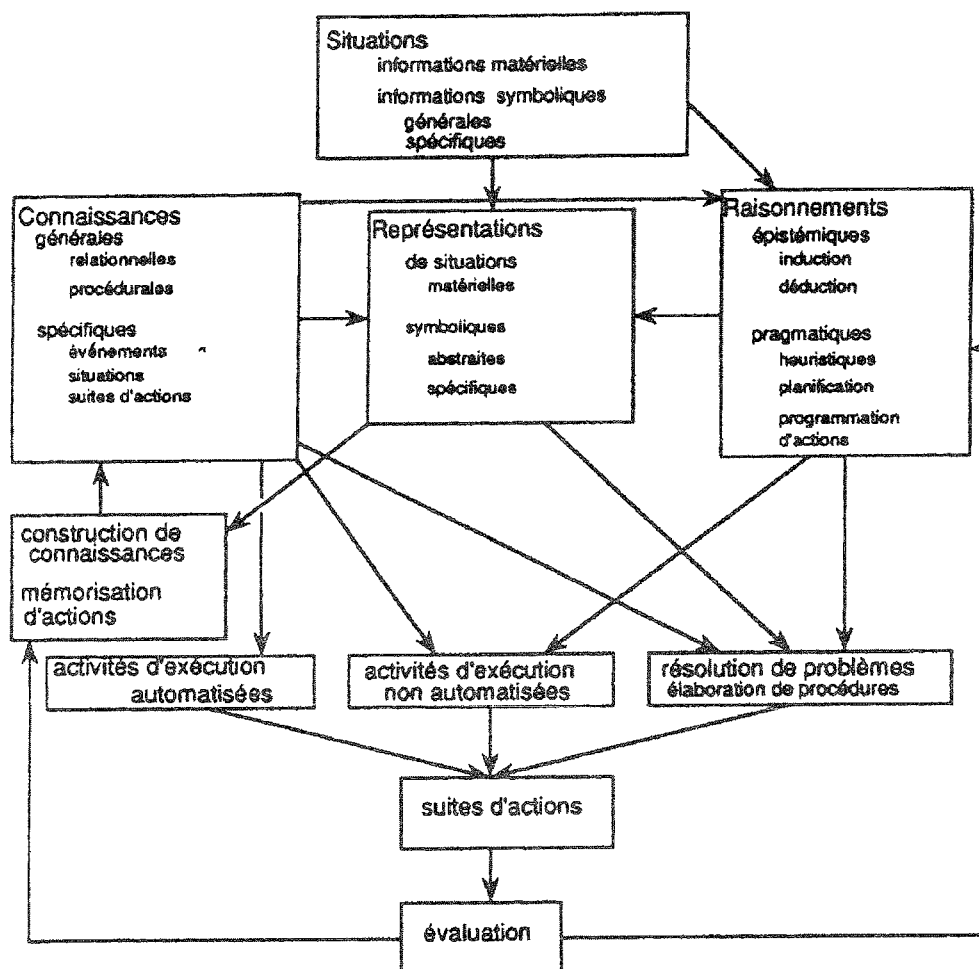


FIG. 3.2 – Architecture cognitive humaine (extrait de [Richard90])

Par ailleurs en étudiant les travaux de spécialistes de psychologie cognitive, on peut trouver le schéma de l'architecture cognitive humaine suivant [Richard90] (figure 3.2). L'architecture cognitive humaine proposée identifie l'analyse de la situation au point de départ et la construction de suites d'actions à l'objectif final.

Ce schéma (figure 3.2) se base sur les six grandes fonctions du système cognitif distinguées par l'auteur [Richard90]

- conservation des structures cognitives permanentes : connaissances et croyances ;
- élaboration des décisions d'action pour des tâches ;
- construction des représentations (structures cognitives transitoires) ;
- production d'inférences à finalité épistémique (représentations) ou pragmatiques (décisions d'action) ;
- construction de connaissances ;
- régulation et contrôle de l'activité (non représenté par une boîte sur le schéma car c'est une partie intégrante des autres fonctions).

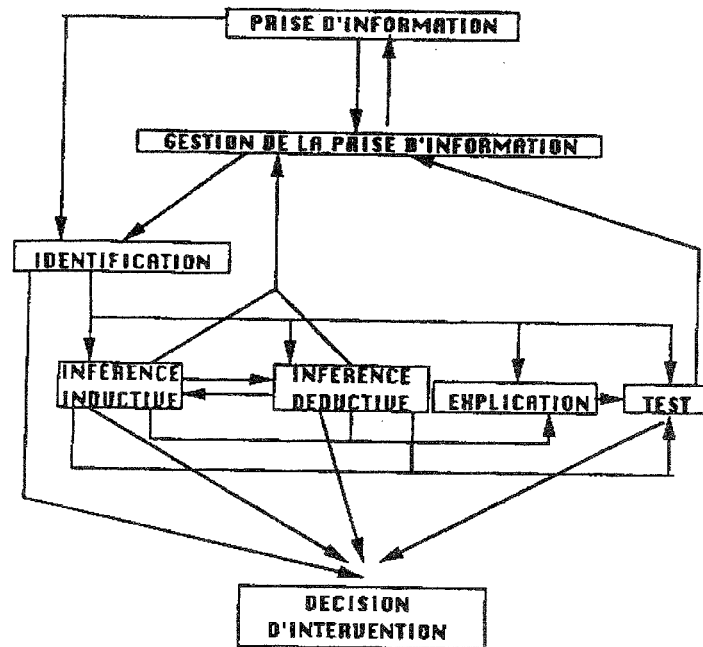


FIG. 3.3 – Architecture fonctionnelle des traitements (extrait de [Hoc91])

Dans [Hoc89a] J.M. Hoc a analysé la conduite de quatre conducteurs de haut-fourneau de Sollac-Dunkerque. Dans [Hoc91], il a complété cette étude par l'analyse de la conduite de cinq conducteurs et de cinq programmeurs de haut-fourneau de Sollac-Dunkerque. Par ailleurs, trois conducteurs et quatre programmeurs de Sollac-Dunkerque ont participé à une autre simulation décrite dans [Delsart95].

Les auteurs ont distingué trois types de traitements élémentaires [Hoc91] [Delsart95] :

- la gestion de la prise d'information : il s'agit de buts, exprimés préalablement à une éventuelle prise d'information effective
 - le test d'hypothèse : l'opérateur se propose de consulter une information, en étant guidé par une hypothèse que cette information sera susceptible de mettre à l'épreuve ;
 - la recherche de cause : après avoir identifié un phénomène, l'opérateur se propose de consulter une information en étant guidé par la recherche d'une cause à ce phénomène (il peut ne pas trouver cette cause) ;
 - la surveillance : après avoir identifié un phénomène qui, à lui seul, ne conduit pas à l'action, le conducteur décide de surveiller certains paramètres ;
 - le scénario : l'opérateur exprime plusieurs paramètres, qu'il souhaite consulter et qui constituent un scénario de prise d'information systématique, donc assez indépendant d'une situation particulière ;
 - le suivi de la mise en œuvre d'action : en prenant une décision d'action, l'opérateur souhaite quelquefois consulter une information pour vérifier qu'il n'y a pas d'empêchements (il s'agit souvent d'états matériels) ou, après que l'action ait été lancée, l'opérateur souhaite vérifier son bon déroulement ;

- l'intervention
 - la recherche de justification d'une action de l'opérateur en poste : l'opérateur en simulation cherche ce qui a pu conduire l'opérateur en poste à décider d'une action ;
 - l'évaluation d'action : les actions de l'opérateur en poste sont évaluées par l'opérateur en simulation, par rapport à son propre diagnostic ; cette comparaison aboutit à une évaluation positive ou négative ;
 - la décision : il s'agit des décisions prises par l'opérateur en simulation ;
- le raisonnement
 - l'inférence inductive : c'est la construction d'une hypothèse portant sur les causes d'un phénomène identifié. Ce type d'inférence remonte la chaîne causale de l'effet vers la cause. Elle traduit une activité de compréhension de la situation ;
 - l'inférence déductive : c'est la construction d'une hypothèse portant sur les conséquences d'un phénomène identifié. Ce type d'inférence descend la chaîne causale de la cause vers l'effet. Elle relève de l'anticipation et du contrôle de la situation ;
 - l'explication a posteriori : suite à l'identification d'un phénomène, l'opérateur en attribue la cause à un autre phénomène préalablement identifié. Il s'agit, en fait, de l'établissement d'une relation causale, postérieurement à l'identification des phénomènes. Elle traduit une économie d'anticipation ;
 - la confirmation ou l'infirmerie d'hypothèse : il s'agit du résultat du test d'hypothèse qui peut venir confirmer ou infirmer l'hypothèse.

« Dans l'ensemble des traitements, les raisonnements proprement dit prennent une place importante et sont essentiellement constitués par les hypothèses, la gestion de la prise d'information se manifeste surtout par les tests, elle est donc guidée par les hypothèses. Le rôle central des élaborations d'hypothèses est donc de nouveau souligné ici : il s'agit bien là du point le plus crucial du diagnostic, par conséquent c'est la clé de voute de toute conception d'une aide au diagnostic en conduite de HF » [Delsart95].

La figure 3.3 présente l'organisation fonctionnelle des traitements distingués. « Chaque module correspond à la réalisation d'un traitement élémentaire. Les flèches entre les modules représentent des transferts d'information entre modules. Le module « Décision d'intervention » retourne des informations à tous les autres modules » [Hoc91]. Nous pouvons observer dans cette architecture fonctionnelle que la décision d'intervention est prise après un raisonnement complexe. Cette décision est en bout de la chaîne de raisonnement.

On peut également trouver le modèle de raisonnement général présenté par Rasmussen. Ce schéma de raisonnement des opérateurs selon Rasmussen, va de la perception jusqu'à l'action. Il est présenté figure 3.4, extrait de [Damme et al.92].

3.2.2 Proposition de modèle de raisonnement tenu par les opérateurs de conduite

A partir des trois fonctions *Voir*, *Comprendre*, *Agir* présentées sur la figure 3.1, de l'architecture cognitive de l'Homme proposée par Richard (figure 3.2) et de l'architecture des traitements des opérateurs de conduite proposée par JM Hoc (figure 3.3), nous avons pu identifier une chronologie de raisonnement d'un opérateur en situation de conduite. Nous avons adapté cette chronologie de raisonnement à l'aide de notre expérience dans le domaine de la conduite de hauts-fourneaux et de nos connaissances de la conduite de procédés en général (procédés sidérurgiques, électriques, réseaux d'irrigation ...). Le raisonnement d'un opérateur de conduite suit

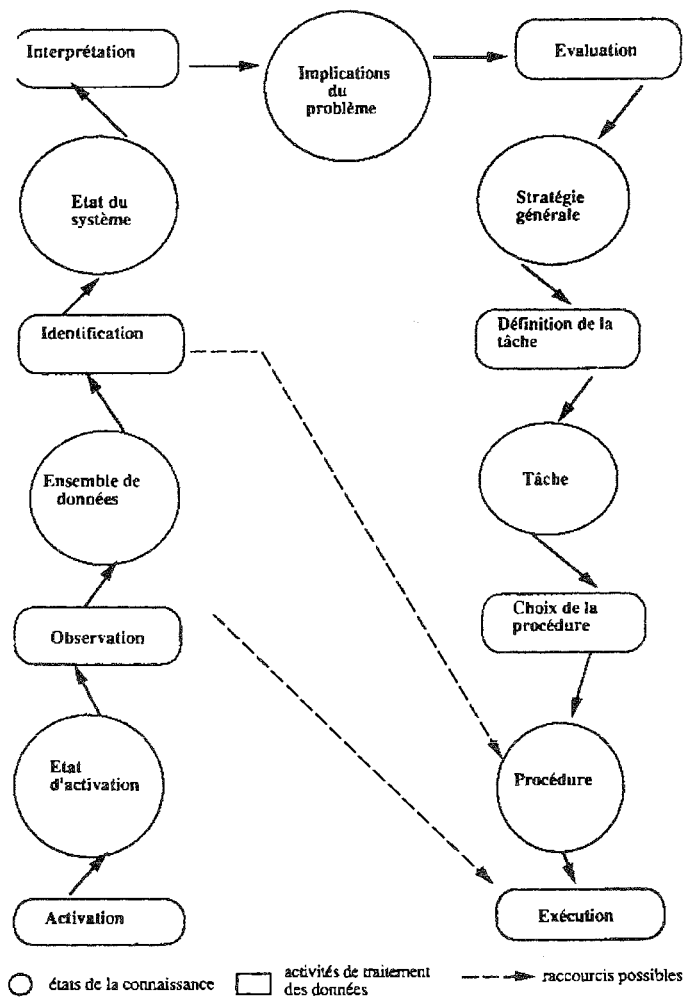


FIG. 3.4 – Modèle du raisonnement tenu par les opérateurs selon Rasmussen (extrait de [Damme et al.92])

alors une chronologie en quatre étapes depuis l'analyse des données jusqu'au choix de l'action à entreprendre :

1. l'opérateur de conduite lit et analyse les données numériques ou symboliques extraites des capteurs,
2. il interprète ces données pour se faire un modèle ou une évaluation de l'état présent et des éventuels problèmes en cours (c'est-à-dire des déviations par rapport à un comportement de référence),
3. il élabore un diagnostic, éventuellement à l'aide d'analyses complémentaires,
4. il décide d'une ou plusieurs actions à entreprendre au travers d'actionneurs qui permettent d'agir sur le système

Bien sûr, ce raisonnement n'est pas linéaire, puisqu'un diagnostic, par exemple, est souvent difficile à établir et qu'il peut nécessiter plusieurs actions simples pour parer au plus pressé, le temps d'élaborer le diagnostic complet. Ce raisonnement est permanent, puisque l'opérateur de

conduite doit en permanence surveiller le procédé, même quand tout se passe bien. L'analyse et l'interprétation de graves problèmes sur le procédé se déroulent souvent en parallèle de l'analyse, de l'interprétation et de la résolution de problèmes locaux. L'action globale résultante devra, en revanche, prendre en compte les différentes actions locales effectuées qui pourraient modifier le comportement général du procédé. Le modèle présenté a donc une forme linéaire, mais les activités des opérateurs de conduite ne suivent pas forcément cette progression linéaire de la perception jusqu'à l'action. L'expérience propre de l'opérateur, ses buts, le contexte de marche et de conduite dans lequel il se trouve, la conduite collective sont des facteurs influençant et perturbant cette progression linéaire.

Les étapes « élaboration d'un diagnostic » et « choix d'une action à effectuer sur le procédé » sont de haut niveau d'abstraction et souvent difficiles, nécessitant une grande expertise du procédé. Pourtant, les étapes d'« analyse des données » et d'« évaluation de l'état présent » ne sont pas pour autant des étapes faciles, faisables par des novices. Toutes ces étapes de raisonnement effectuées par un opérateur ou un expert peuvent donc demander à être expliquées. C'est ce que nous verrons au chapitre 5.

La proposition de modèle de raisonnement des opérateurs de conduite reprend les différentes activités ou tâches qu'un opérateur de conduite doit effectuer. Ce descriptif est tiré des observations effectuées sur le terrain, par exemple en salle de contrôle de haut-fourneau.

Cette proposition correspond à la définition de « *modèle de l'opérateur* » donnée dans [Samurçay91]: « *La conception des systèmes artificiels s'appuie sur des modèles (physiques, chimiques, électroniques, ...) calculables qui réalisent les buts et les fonctions désirés. Le plus souvent, ces modèles décrivent un fonctionnement théorique normal du système. En fonctionnement réel, l'opérateur contrôle et corrige les écarts à ce fonctionnement théorique. L'opérateur qui interagit avec un tel système ne manipule pas directement ces modèles de conception; il se construit un ensemble de modèles opérationnels pour son activité à travers des situations de formation et des situations de travail. C'est cet ensemble que nous désignons par « modèle de l'opérateur » qui, dans la littérature, rencontre d'autres appellations comme modèle de l'utilisateur, modèle descriptif, représentation interne, etc.* »

On peut néanmoins ajouter quelques tâches moins importantes qui sont généralement également confiées aux opérateurs de conduite:

- initialisation ou entretien du système informatique d'aide à la conduite, voire aussi mise à jour des données (par exemple mise à jour des nouvelles consignes);
- communication avec les équipes qui prennent la relève dans le cas d'un procédé continu, ou avec les responsables de l'exploitation. La communication dans le cadre de la résolution d'un problème détecté est, quant à elle, intégrée dans cette résolution, par exemple lors de l'« analyse des données » par la demande d'un examen complémentaire, ou lors du « choix d'une action à effectuer sur le procédé » par une demande de modification d'un des actionneurs disponibles.



3.3 Modèle de raisonnement et fonctions du SBC d'aide à la conduite

Nous allons utiliser ce schéma du raisonnement tenu par les opérateurs de conduite pour généraliser la structure et les principales fonctions d'un système d'aide à la conduite de procédés.

Nous avons identifié quatre principales étapes du raisonnement des opérateurs de conduite et des experts. Les systèmes d'aide à la conduite sont basés essentiellement sur les modèles de raisonnement des experts et les activités des opérateurs, aussi, paraît-il raisonnable de supposer que les principales fonctions du système s'intéresseront particulièrement à ces quatre points identifiés.

Nous supposons donc dans la suite de cette thèse qu'un système d'aide à la conduite de procédés (auquel on souhaite adjoindre des capacités explicatives) est structuré autour de quatre fonctions principales :

1. Détection,
2. Etat Courant,
3. Diagnostic,
4. Conseil d'action.

Le schéma de la figure 3.5 résume cette hypothèse : à partir des quatre activités d'un opérateur de conduite identifiées au paragraphe précédent, nous avons élaboré un modèle de raisonnement des opérateurs qui sert de base aux principales fonctions du SBC d'aide à la conduite. Nous décrirons ensuite dans les paragraphes suivants les quatre fonctions mentionnées.

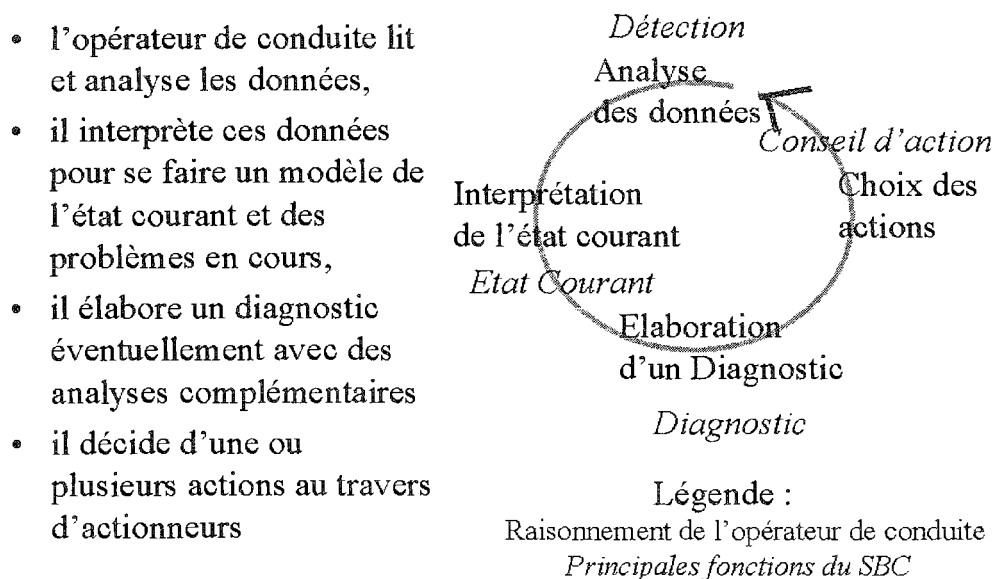


FIG. 3.5 – Le raisonnement de conduite et les quatre fonctions du SBC

3.3.1 La fonction de détection

La fonction de détection traite habituellement des résultats concernant les données (lecture, analyse, agrégation en problèmes locaux ou en phénomènes locaux). Nous considérons que la fonction de détection synthétise les données traitées. Elle consiste souvent en un passage des informations numériques (par exemple: *température corporelle de l'enfant = 39,5° C*) vers des informations symboliques (par exemple: *température corporelle de l'enfant beaucoup trop élevée*).

Nous pouvons considérer que les résultats produits sont des problèmes locaux qui, d'après [Basseville et al.96], sont des déviations par rapport à un comportement de référence.

Dans le cas des hauts-fourneaux présenté en partie III, il y a plus de cent cinquante problèmes locaux appelés « phénomènes HF ». Les explications demandées concerneront dans ce cas les problèmes locaux détectés et leur environnement.

3.3.2 La fonction état courant du procédé

La fonction « état courant du procédé » (que nous appellerons plus simplement « état courant » ou encore « état présent ») correspond, pour l'opérateur, à la phase d'interprétation des problèmes en cours sur le procédé. L'opérateur doit prendre du recul par rapport à la détection. Cette fonction traite les résultats produits par la fonction de détection (alarme, valeurs symboliques, problèmes locaux détectés ...) correspondant à tous les aspects du procédé suivi. Elle a pour objectif de donner une évaluation de l'état courant du procédé.

La fonction produit alors des résultats correspondant à des synthèses locales ou attribue une valeur à de nouveaux paramètres synthétiques.

Les résultats concernant l'état courant du procédé peuvent, par exemple, prendre les formes suivantes: « *Pas de problème de niveau des eaux sur le bassin Saint_Emilien au point 13* », « *Perturbations débit vent = NEANT* », « *Descente des charges = OK* », « *Capacité de sockage courante : Bourran = 57% (soit 65000m³)* ».

Si le procédé le permet, la fonction peut même donner des résultats encore plus synthétiques comme: « *haut-fourneau 2 perturbé, Evolution = amélioration rapide* ». L'expertise correspondant à ce type de résultats est difficile mais c'est surtout la mise en place de cette expertise qui est délicate. C'est pourquoi, il est rare qu'un système d'aide à la conduite de procédé puisse fournir un résultat aussi synthétique.

3.3.3 La fonction de diagnostic

La fonction de diagnostic a pour but de proposer un ou plusieurs diagnostics possibles des problèmes en cours. Pour cela, elle se base sur les résultats de détection et les résultats de la fonction d'état courant du procédé. Les diagnostics peuvent nécessiter des analyses complémentaires à effectuer ou des vérifications par rapport à l'état du procédé.

Voici deux exemples de diagnostics: « *A conditionnement du vent et débit constants, une baisse de la teneur en azote localisée signifie une baisse de débit de gaz provoquée par une baisse de perméabilité locale* », ou « *Le problème de baisse de la température de fonte est peut-être dû à un problème de garni* ». Les résultats de diagnostic prennent également la forme de graphes causaux (graphes d'états reliés entre eux par des liens de causes à effets) ou de graphes d'influence (graphes de dépendances entre les variables, comportant des variables et des fonctions de transfert décrivant l'influence entre les variables).

On pourra, par exemple, s'orienter vers les congrès DX³² pour trouver plus de détails sur les

32. International Workshop on Principles of Diagnosis

travaux relatifs aux raisonnements de diagnostic (diagnostic à base de modèles, modèle de panne, modèle de bon fonctionnement, graphes causaux temporels, raisonnement abductif, formalismes de représentation ...).

3.3.4 La fonction de conseil d'action

Ainsi que nous l'avons mentionné précédemment, le but de l'opérateur est de choisir les actions nécessaires à entreprendre pour améliorer le procédé. La fonction de conseil d'action ou de recommandation d'action est donc la plus importante au vu de cet objectif. Néanmoins, c'est aussi habituellement la plus difficile, tant à modéliser à partir de l'expertise du domaine, qu'à réaliser, pratiquement, au sein du SBC.

Le système se base sur les résultats des trois autres fonctions pour proposer des « conseils d'action » à l'opérateur. Ces conseils peuvent correspondre à des actions locales sur une partie du procédé ou à des actions globales prenant en compte tous les problèmes en cours.

Le champ d'application de cette fonction peut être le procédé dans son intégralité. La fonction peut également être restreinte à une partie du procédé, c'est généralement la partie centrale (la plus importante) ou une partie pour laquelle l'expertise est bien définie. Par exemple, il est plus facile (mais pas pour autant évident) de déterminer le bilan thermique d'un haut-fourneau à partir des matières enfournées, de leur influence, et des matières sorties, que d'établir un modèle du comportement des matières dans le haut-fourneau. Il sera donc moins difficile de proposer des conseils concernant le bilan thermique complet que des conseils relatifs à l'emplacement des matières à enfourner.

Les résultats concernant le conseil d'action peuvent, par exemple, prendre les formes suivantes: « *Mise au mille coke = + 4 kg de coke/tonne de fonte* », ou « *Vidanger le bassin Maginot* ».

3.4 Construction du système explicatif et construction du SBC

Le système explicatif utilise les données et la structure du SBC d'aide à la conduite. Nous détaillerons les principaux aspects de ce système explicatif dans les chapitres 4, 5 et 6. Néanmoins, la construction de ce système n'est pas indépendante de l'état de développement du SBC d'aide à la conduite. On peut distinguer deux grandes catégories, selon que le SBC est en cours de développement ou qu'il est achevé et une troisième catégorie pour traduire l'état intermédiaire :

- **SBC et système explicatif réalisés en même temps :** les fonctions principales sur lesquelles se basent les explications ne sont pas encore réalisées, l'acquisition des connaissances expertes est en cours, de même que la définition des données.

Avantages : il est facile de créer les données ou canaux d'informations utiles pour les explications en même temps que les autres données, l'acquisition des connaissances explicatives se passe en même temps que l'acquisition des connaissances expertes.

Inconvénients : il est difficile de bien identifier les interactions entre le SBC et le système explicatif, voire parfois de séparer ces deux systèmes ; il n'est pas possible de baser la structure du système explicatif sur celle, temporaire, du SBC ; il est difficile de proposer des explications de résultats dont la forme n'est pas définitive ; il est difficile de valider les explications (comment être sûr que les explications permettent bien de comprendre un

résultat qui peut évoluer?).

- **SBC en cours de développement** : le SBC est démarré, ou déjà bien avancé et l'on amorce la réalisation du système explicatif. Ce cas intermédiaire permet d'avoir des avantages de chacun des autres cas, mais ce n'est pas pour autant la solution idéale.

Avantages : il est encore facile de créer les données ou canaux d'informations utiles pour les explications ; l'acquisition des connaissances explicatives se passe en même temps que l'acquisition des connaissances expertes pour les fonctions pas encore réalisées ; on peut identifier les manques du SBC relatives aux parties déjà réalisées et proposer que ces manques soient pris en compte par le système explicatif.

Inconvénients : il peut être difficile de bien identifier les interactions entre le SBC et le système explicatif ; il n'est pas possible de baser la structure du système explicatif sur celle du SBC qui n'est pas encore définitive ; il est difficile de proposer des explications de résultats dont la forme n'est pas définitive et de valider les explications proposées.

- **SBC terminé** : la réalisation du système explicatif démarre lorsque le SBC est terminé. Cependant, il est possible que les quatre fonctions ne soient pas toutes développées du fait d'une impossibilité pratique ou d'un choix de gestion de projet, par exemple à cause d'un rapport « *intérêt/coût de réalisation* » défavorable. En revanche le SBC n'évoluera pas radicalement.

Avantages : il est possible d'utiliser la structure ou l'architecture du SBC pour adapter celle du système explicatif, on peut identifier les manques du SBC et proposer qu'ils soient pris en compte par le système explicatif.

Inconvénients : l'acquisition des connaissances explicatives est plus difficile, elle a lieu bien ultérieurement à l'acquisition des connaissances expertes (qui est une des premières phases du développement du SBC). Certains besoins habituellement traités par le système explicatif ont sûrement été comblés par des fonctions du SBC, il faut donc éviter les doublons. Il est difficile de créer de nouveaux canaux d'informations utiles pour les explications car il faudrait alors modifier toutes les étapes de traitement de ces nouveaux canaux.

Chaque catégorie identifiée présente donc des avantages et des inconvénients. Il n'existe donc pas de solution meilleure *a priori*. Le choix entre ces différentes options est plutôt imposé par la vie du projet informatique correspondant au SBC et au système explicatif.

Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre au contexte particulier de la conduite de procédés complexes et aux systèmes d'aide implantés dans ce contexte pour aider les opérateurs de conduite dans leur activité.

Nous avons tout d'abord identifié les caractéristiques principales des systèmes industriels d'aide à la conduite de procédés. Puis, en identifiant les tâches des opérateurs de conduite et leurs activités, et en nous appuyant sur des travaux relatifs à ce contexte particulier ou plus généralement en décrivant les activités humaines, nous avons identifié un modèle simplifié de

raisonnement des opérateurs de conduite en quatre phases : « analyse des données », « évaluation de l'état présent », « élaboration d'un diagnostic » et « choix d'une action à effectuer sur le procédé ».

A partir de l'hypothèse justifiée que ce modèle est assez général pour s'appliquer à tout système d'aide à la conduite de procédés complexes, nous avons identifié les quatre fonctions principales de tels systèmes : « détection », « état du procédé », « diagnostic » et « conseil d'action ». Le schéma synthétique (figure 3.5) page 66 permet de voir à la fois le raisonnement des opérateurs de conduite, les étapes de leur raisonnement et la transposition aux fonctions du système d'aide. Ce découpage nous servira notamment lors de la construction d'explications qui sera détaillée au paragraphe 5.3.4.

L'analyse du problème de construction du système explicatif par rapport à la construction du SBC nous a permis d'identifier trois situations standard : (1) SBC et système explicatif réalisés en même temps, (2) une situation intermédiaire où le SBC est déjà démarré lorsque l'on amorce la réalisation du système explicatif, (3) le système explicatif est réalisé alors que le SBC est terminé. Mais aucune d'entre elles n'est parfaitement satisfaisante.

Ce chapitre introductif au contexte de la conduite de procédés complexes nous a permis de mettre en relief les contraintes et les impératifs que les systèmes explicatifs devront respecter. Ces contraintes concernent principalement les interactions avec les utilisateurs, ses moyens d'accès aux explications et les liens entre le système explicatif et le SBC, par exemple la restriction à des interactions brèves et simples avec l'utilisateur ou la difficulté voire l'impossibilité d'utiliser un modèle de l'utilisateur. Elles auront une forte influence tant sur la phase d'acquisition des connaissances explicatives que nous détaillerons au chapitre suivant, que sur la réalisation effective de la fonction d'explication décrite au chapitre 5.

Chapitre 4

Acquisition des connaissances explicatives

Sommaire

4.1	Les interlocuteurs	72
4.1.1	L'expert en explication	72
4.1.2	L'utilisateur lambda	73
4.1.3	Le cogniticien	74
4.2	Différentes méthodes de recueil des connaissances explicatives .	74
4.3	Méthodes retenues	77
4.4	Analyse de la documentation technique	78
4.5	Analyse approfondie de documents experts	78
4.6	Observation des utilisateurs et des experts en situation réelle .	79
4.7	Interviews des utilisateurs et des experts en situation réelle . .	80
4.8	Analyse des discussions et des interviews	81
4.9	Synthèse : cinq phases pour l'acquisition des connaissances explicatives	81
4.10	Evaluation des explications	82
4.11	Structuration et modélisation des connaissances explicatives . .	84

Introduction

Le but de ce chapitre n'est pas de définir le processus d'acquisition de connaissances, largement décrit et utilisé en Intelligence Artificielle. Il cherche, d'une part, à identifier les contraintes, dues à la spécificité de la tâche d'explication et imposées à cette étape d'acquisition des connaissances et, d'autre part, à dégager une ou plusieurs méthodes qui permettront de réussir au mieux cette étape dans la construction d'un système explicatif. Pour plus de détail sur le domaine de l'acquisition des connaissances, le lecteur pourra se référer à [Haton et al.91], à [Musen93] ou [Dieng90] ou aux actes des congrès KAW³³, RFIA³⁴, ECAI³⁵ et IJCAI³⁶ essentiellement.

Dans ce chapitre, nous définirons tout d'abord quels sont les divers interlocuteurs de cette phase d'acquisition des connaissances, c'est-à-dire l'expert, l'utilisateur et le cogniticien. Nous

33. Knowledge Acquisition Workshop

34. Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle

35. European Conference on Artificial Intelligence

36. International Joint Conference on Artificial Intelligence

décrivons ensuite brièvement, au paragraphe 4.2, les méthodes les plus utilisées de recueil de connaissances explicatives (destinées aux explications et non à la base de connaissance pour le raisonnement) inspirées des méthodes classiques d'acquisition de connaissances. Nous proposerons ensuite d'effectuer la phase d'acquisition des connaissances explicatives en cinq phases (paragraphe 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8). Les deux premières concernent l'analyse de documents, une analyse générale puis une analyse approfondie de documents d'expertise contenant des raisonnements experts à l'aide d'une typologie des concepts employés. Les trois dernières sont relatives à une mise en situation réelle : une observation, une interview de mise en situation, puis une analyse des observations (cette dernière phase peut être appelée *debriefing* ou autoconfrontation). Nous nous baserons pour cela sur notre expérience et sur les conclusions des autres expérimentations mentionnées, notamment autour du projet AIDE. Le problème de l'évaluation des connaissances explicatives sera ensuite abordé : nous proposerons dans ce paragraphe 4.10 des critères qui peuvent être appliqués aux explications. Enfin, nous aborderons rapidement le problème de la modélisation des connaissances explicatives sur lequel nous reviendrons au chapitre suivant.

4.1 Les interlocuteurs

4.1.1 L'expert en explication

Nous utilisons le terme d'« expert » pour désigner une personne qui possède une compétence particulière sur le domaine particulier d'application du SBC. Cette personne est *la référence* (ou une des personnes de référence) sur ce domaine, c'est elle qui connaît le mieux le domaine d'expertise.

L'expertise est difficile : l'expert doit non seulement connaître les connaissances de surface et les connaissances profondes, mais aussi les comprendre, connaître les mécanismes mis en jeu et être capable de les appliquer à un problème nouveau. Cet expert doit être un ancien du métier qui possède une grande expérience et une grande *base de cas*. Ce n'est donc pas seulement sur un savoir-faire théorique mais aussi sur un savoir-faire pratique que se base l'expert. « *L'expert est entendu dans le sens de l'acteur et non du juge. La dimension considérée est donc celle d'une acquisition des connaissances opérationnelles (pertinente à l'action) sur de très longues périodes d'exercice de l'activité* » [Hoc91].

Notre but n'est pas de chercher à définir explicitement la notion d'expertise, mais comme l'expert est un des acteurs majeurs pour le recueil de connaissances explicatives, il nous a paru important de rappeler les qualités habituellement reconnues à un expert.

Pour la conduite de procédés, on appelle « expert », une personne :

- spécialiste du métier,
- ayant une grande ancienneté, l'ancienneté habituelle la plus mentionnée est de dix ans,
- reconnue au niveau national voire international (c'est par exemple la différence entre un spécialiste et un expert),
- ayant la capacité de rayonnement et d'innovation,
- qui entraînerait une perte de compétitivité de l'entreprise en cas de départ.

On peut noter que certains problèmes se posent quant à cette notion d'expert : peut-on considérer comme expert une personne qui ne pratique plus le métier depuis quelques années ? Quelles sont la place et la reconnaissance d'un expert dans la hiérarchie de l'entreprise ? Quelle est la part du savoir-faire pratique par rapport au savoir-faire théorique dans le savoir de l'expert ? Comment apporter le savoir-faire des experts aux non-experts ? Comment capitaliser les connaissances des experts pour que celles-ci restent au sein de l'entreprise après leur départ ? ...

C'est, entre autres motivations, pour répondre aux deux dernières questions que l'on peut réaliser un SBC, et c'est souvent pour que le transfert des connaissances des experts vers les utilisateurs soit optimal que l'on adjoint la capacité d'explication à ces systèmes.

« *Un expert est, par définition, une personne capable de résoudre un problème particulier. Il ne faudrait pas en déduire hâtivement qu'il est aussi capable d'expliquer comment il le fait* » [Chouvet92]. Un gros problème de cette phase d'acquisition des connaissances explicatives est qu'il n'existe pas d'« expert en explication ». Un « bon expert en explication » doit avoir des connaissances théoriques et pratiques du domaine, mais aussi des connaissances de psychologie, de didactique, d'écoute ... Il faut pouvoir expliquer, un peu à la manière d'un enseignant, or les meilleurs enseignants, en mathématiques par exemple, (au sens : ceux qui enseignent bien) ne sont pas forcément les meilleurs mathématiciens (au sens : ceux qui sont des experts dans le domaine des mathématiques).

Pour des domaines peu complexes, où la connaissance est assez limitée, il est possible d'obtenir de très bonnes explications auprès de personnes n'étant pas forcément des experts du domaine mais étant également les concepteurs du système. C'est le cas de cours de mathématiques du collège [Nicaud et al.90], des jeux de tarot [Nigro95], ou de bridge [AG et al.96] [Lemaire92c], d'exemples de problèmes classiques d'intelligence artificielle comme les tours de Hanoi [Labat et al.96] ou le voyageur de commerce, des procédés chimiques simples, des procédés industriels bien maîtrisés ... Par exemple, pour le bridge, les annonces sont très codifiées. Dans tout manuel de base décrivant la majeure cinquième, il est possible de trouver précisément, en fonction du nombre de points total, de la longueur et de la force de chaque couleur, l'annonce à faire ou la réponse à donner à son partenaire. L'expertise est claire et codifiée, il n'est pas utile d'être un grand expert du domaine (un des meilleurs joueurs régionaux ou nationaux) pour expliquer les choix du système à bases de connaissances. En revanche, pour des procédés complexes, il est indispensable d'avoir une grande expérience théorique et pratique du domaine pour fournir de bonnes explications. L'expertise de conduite de procédés complexes est longue et difficile. Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, les experts sont reconnus régionalement ou nationalement et ont plus de dix ans d'ancienneté dans le métier. Ils sont capables de justifier clairement les choix faits dans la conduite quotidienne et de réfléchir à des stratégies à plus long terme. Dans ce cas, les meilleurs experts en explication seront choisis parmi les experts du domaine. Néanmoins, les explications recueillies pourront être complétées ou améliorées avec l'aide de psychologues, de didacticiens ou d'ergonomes.

4.1.2 L'utilisateur lambda

Lorsque nous chercherons à identifier les besoins des utilisateurs en terme d'explications, à simuler le système explicatif, à vérifier le caractère compréhensible d'une explication, ou à valider les explications proposées à l'aide des critères que nous verrons au paragraphe 4.10, nous aurons besoin d'un « utilisateur lambda ». Ce doit être un utilisateur type qui a des connaissances moyennes par rapport aux autres utilisateurs. Il peut être utile alors de définir le destinataire cible du futur système explicatif (voir le paragraphe 5.1.2) pour avoir une idée précise d'un utilisateur moyen.

Dans tous ces cas où nous aurons besoin d'un utilisateur, nous chercherons toujours à améliorer la couverture des réponses en demandant à plusieurs utilisateurs de se livrer aux mêmes exercices. Ces utilisateurs seront choisis selon leurs connaissances du métier, leur expérience, leurs qualités ou défauts pour avoir des réponses correspondant au maximum d'utilisateurs possibles.

4.1.3 Le cogniticien

Le recueil des connaissances, que ce soit des connaissances du domaine ou des connaissances explicatives, est généralement dirigé ou effectué par un « cogniticien ». Ce cogniticien ou « ingénieur de la connaissance » est un expert de la tâche d'acquisition de connaissances. Il doit donc posséder la faculté de pratiquer cette tâche. En dehors de quelques qualités naturelles, cette faculté a besoin, pour se développer, de solides bases en matière de psychologie cognitive et d'ergonomie et de beaucoup de pratique. Le cogniticien a pour mission d'aider l'expert à exprimer ce qu'il veut dire et de trouver les moyens de savoir ce qui est nécessaire à la construction du SBC [Chouvet92]. En revanche, le cogniticien n'est pas un expert du domaine, c'est le « *paradoxe de l'acquisition* » : il est incompétent sur le domaine de l'expert, il ne sait pas, au début, distinguer entre l'utile et l'accessoire, et n'a que peu de moyens de juger la complétude et la validité des connaissances acquises [Ferraris92].

4.2 Différentes méthodes de recueil des connaissances explicatives

Il existe différentes techniques utilisées pour recueillir des connaissances explicatives (destinées aux explications et non à la base de connaissance pour le raisonnement) inspirées des méthodes classiques d'acquisition de connaissances. Voici celles qui sont le plus souvent citées, dont certaines présentent de nombreux points communs ; nous essayerons d'en dégager les avantages et les inconvénients majeurs :

1. analyse de protocoles verbaux

Méthode : l'expert réfléchit à haute voix sur un cas réel,

Avantages : bon suivi du cheminement de raisonnement de l'expert, permet souvent d'analyser des erreurs ou des modifications de raisonnement de l'expert, permet de se placer en situation sur un cas réel,

Inconvénients : la structure du raisonnement dépend du mode de travail de l'expert, doit souvent être doublée par le même exercice avec un autre expert, soit en même temps en situation réelle, ce qui est lourd à gérer, soit sur une situation réelle simulée, ce qui est un peu moins intéressant;

2. observation directe filmée

Méthode : on filme l'expert en situation de travail, similaire à l'analyse de protocoles verbaux,

Avantages : bon suivi du cheminement de raisonnement de l'expert, permet souvent d'analyser des erreurs ou des modifications de raisonnement de l'expert, permet de se placer en situation sur un cas réel,

Inconvénients : la structure du raisonnement dépend du mode de travail de l'expert, doit souvent être doublée par le même exercice avec un autre expert, soit en même temps en situation réelle, ce qui est lourd à gérer, soit sur une situation réelle simulée, ce qui est un peu moins intéressant;

3. introspection

Méthode : l'expert explique comment il résoudrait un cas imaginaire typique,

Avantages : bon suivi du cheminement de raisonnement de l'expert, permet d'avoir un raisonnement structuré en plusieurs étapes,

Inconvénients : le raisonnement est souvent *trop* parfait, ne comportant pas d'erreurs, les explications sont donc souvent trop simples, ce n'est pas une situation réelle, difficile pour l'expert, d'après [Chouvet92], bon nombre de psychologues cognitifs mettent en doute la faculté des experts à l'introspection ;

4. interview non dirigé de l'expert

Méthode : l'expert explique sur un cas réel sa manière de résoudre le problème,

Avantages : bon suivi du cheminement de raisonnement de l'expert, assez prospectif,

permet d'identifier les principales explications et leurs caractéristiques essentielles, le cas réel permet de vérifier l'utilisation des informations indispensables à la résolution,

Inconvénients : permet plutôt d'obtenir une expertise de résolution de problème que de véritables explications ;

5. interview dirigé de l'expert

Méthode : on questionne l'expert sur sa façon de résoudre un cas réel, ou sur un point particulier de l'expertise,

Avantages : bon suivi du cheminement de raisonnement de l'expert, permet de restructurer le raisonnement de l'expert en fonction de la modélisation choisie, permet de vérifier des propositions d'explications, permet de restreindre le champ de l'expertise,

Inconvénients : peut inclure des explications artificielles ne correspondant pas à des besoins réels du fait de la « direction » de l'interview ;

6. interview dirigé de l'utilisateur futur du système

Méthode : on questionne l'utilisateur futur sur ce qu'il pourrait être nécessaire d'expliquer,

Avantages : permet de se rendre compte des « besoins » principaux des utilisateurs, c'est un bon complément des interviews de l'expert, permet évaluer la compréhension des utilisateurs et les manques principaux,

Inconvénients : les utilisateurs ont souvent peu de recul sur les éléments à expliquer, les questions posées sont généralement orientées en fonction de ce que l'on cherche, on risque alors de ne pas être complet ou d'introduire des besoins artificiels ;

7. autoconfrontation (ou *debriefing*) à la suite d'une séance d'interview filmée

Méthode : on questionne le ou les intervenants de la séance d'interview (l'expert et éventuellement un non expert) à propos de phrases ou morceaux choisis de la séance d'interview, on parle d'« autoconfrontation » puisque les intervenants sont confrontés à des séquences filmées dans lesquelles ils apparaissent

Avantages : la méthode est souvent très intéressante pour obtenir des explications/justifications des choix faits pour la résolution lors de l'interview, est souvent plus intéressante pour les explications que la séance d'interview initiale, permet de vérifier que les explications données ont été comprises par le non expert, permet de vérifier l'importance des différents problèmes identifiés, peut permettre l'identification de stratégies d'explication de l'expert,

Inconvénients : est difficile à mettre en place et assez lourde à gérer, puisqu'il faut

sélectionner dans le film de la séance d'interview toutes les hésitations, les changements dans la manière d'expliquer, le choix des exemples, la structure des explications orales, les gestes ou les attitudes de tous les intervenants ... ,
est éprouvante pour l'expert qui peut avoir à justifier ses paroles, une hésitation, le choix d'un exemple, ou une modification dans son exemple ;

8. tri par l'expert des problèmes suivant des caractéristiques communes

Méthode : On peut utiliser les caractéristiques suivantes : degré de difficulté, importance du problème, type de résolution attaché, type des connaissances utiles, liens avec les autres problèmes ...

Avantages : permet de mettre en commun des éléments d'explications, permet de compléter la base de connaissances du métier, permet d'identifier les problèmes importants ou difficiles qui nécessiteront des explications plus complètes que les autres,

Inconvénients : il est difficile d'être exhaustif, dépend beaucoup de la correction et de la complétude de la phase d'identification des problèmes ;

9. simulation du fonctionnement du système explicatif par l'expert,

Méthode : on simule le fonctionnement du futur système explicatif avec l'aide d'un expert sur les données réelles provenant du procédé (souvent en ligne),

Avantages : permet à l'utilisateur de bien comprendre ce que lui proposera le système, aide beaucoup pour la définition du besoin en explications, permet de vérifier assez finement la compréhension des utilisateurs et de choisir le niveau des explications à donner,

Inconvénients : il n'est pas facile de faire un « bon système virtuel » (c'est-à-dire un système simulé qui corresponde exactement à ce que pourrait être le système réel), l'expert a tendance à en dire plus que ce que pourrait faire le système, une fonction d'explication semble alors inutile puisque l'expert a tout expliqué, dépend beaucoup de l'expert, de sa connaissance et de son respect du cahier des charges du système à simuler ;

10. magicien d'Oz

Méthode : version améliorée de la méthode précédente : on simule complètement le fonctionnement du futur système explicatif en faisant croire à un utilisateur (un utilisateur final) que le système existe réellement ; un expert simule les réponses du système par le biais d'un clavier, il ne donne les réponses du système qu'à des problèmes que le système est supposé pouvoir résoudre,

Avantages : permet de vérifier ce que comprend exactement l'utilisateur, plus fin que la méthode précédente puisque l'interface est celle du futur système, aide beaucoup pour la définition du besoin en explications, permet de vérifier assez finement la compréhension des utilisateurs et de choisir le niveau des explications à donner, donne souvent des résultats inattendus (les utilisateurs sont vraiment persuadés que le système existe),

Inconvénients : encore plus difficile à réaliser que la méthode précédente (modéliser complètement l'interface est très difficile),

dépend beaucoup de l'expert, de sa connaissance et de son respect du cahier des charges du système à simuler ;

11. brainwriting

Méthode : chacun enrichit les idées des autres en les commentant par écrit,

Avantages : est simple à réaliser,

permet d'avoir une vision complète et presque exhaustive des idées de chacun,

Inconvénients : n'est pas facile à mettre en place pour les explications (chacun a sa façon d'expliquer),

ne converge pas souvent vers une synthèse ;

12. revue générale de l'état du travail

Méthode : on aide l'expert à se recentrer sur la tâche d'acquisition des connaissances par quelques rappels sur le sujet et une revue complète de l'état du travail,

Avantages : c'est la phase initiale de presque toute séance de travail,

permet de recentrer l'expert et d'évoquer les problèmes encore à résoudre, facile et pas très long,

permet de s'assurer de l'interprétation d'une explication,

Inconvénients : n'apporte souvent rien de neuf ;

13. reformulation

Méthode : le cogniticien reformule le raisonnement de l'expert, soit en triant les idées et le raisonnement pour que cela soit plus synthétique, soit simplement avec ses propres mots pour provoquer des réactions chez l'expert,

Avantages : permet de remettre en forme un raisonnement qui n'était pas forcément très structuré (par exemple en utilisant les quatre fonctions *analyse des données* jusqu'à *choix d'une action sur le procédé* identifiées au chapitre précédent au paragraphe 3.3),

l'expression avec ses propres mots par le cogniticien de ce qu'il a compris permet de vérifier l'exactitude de son contenu,

la sélection d'un concept particulier dans le discours de l'expert permet une bonne étude de ce concept ou la clarification de contradictions,

la déformation volontaire par le cogniticien des propos de l'expert permet d'étudier ses réactions et la façon dont il vérifie les éléments donnés,

Inconvénients : la reformulation et la restructuration du raisonnement dissimulent le raisonnement de l'expert avec ses essais et ses erreurs, son cheminement souvent non rectiligne.

4.3 Méthodes retenues

Parmi toutes ces méthodes, nous en avons identifié certaines, que l'on peut qualifier d'indispensables. Dans les cinq paragraphes suivants, nous allons présenter les cinq méthodes de recueil choisies qui permettent d'effectuer convenablement la tâche d'acquisition des connaissances explicatives. Ces méthodes se basent, d'une part sur l'analyse de la documentation technique et experte pour les deux premières et d'autre part sur l'observation des utilisateurs ou des experts en situation réelle, sur des interviews non dirigés avec des experts et, si possible, des utilisateurs et enfin sur l'analyse détaillée de ces interviews avec les différents intervenants pour les trois dernières méthodes.

4.4 Analyse de la documentation technique

L'analyse de la documentation technique est la première étape obligatoire de la phase d'acquisition des connaissances, elle permet de se faire une idée assez fine des types de connaissances manipulées, des types de raisonnements utilisés et souvent du besoin des utilisateurs d'acquérir ces connaissances.

Il faut essayer de trouver des exemples d'explications, c'est-à-dire des documents de description de raisonnement face à un problème quelconque, des ordres de consigne de marche, des documents qui décrivent la marche à suivre pour analyser une situation difficile et expliquent les raisons des choix. Les descriptions peuvent être regroupées par rapport aux grandes fonctions identifiées (paragraphe 3.3) : « analyse des données », « évaluation de l'état présent », « élaboration d'un diagnostic » et « choix d'une action à effectuer sur le procédé ».

Il faut se focaliser sur les documents du niveau des utilisateurs, c'est-à-dire les documents permettant aux utilisateurs cibles de la future fonction d'explication d'apprendre quelque chose et non sur les documents de base.

4.5 Analyse approfondie de documents experts

Une fois quelques exemples concrets d'explications identifiés dans la documentation technique, il est possible d'affiner le besoin en explications et d'avoir une idée plus précise des éléments à chercher.

Pour cela, il est utile de faire une analyse en profondeur de la documentation technique ou plutôt de quelques documents clés qui décrivent par exemple le raisonnement de l'expert et comportent de *bonnes* justifications ou explications des choix effectués. Le terme « *bonne* explication » concerne l'évaluation des explications traitée au paragraphe 4.10, et doit être interprété ici en tant qu'explication aussi correcte et complète que possible et correspondant au besoin identifié.

Nous proposons une grille d'analyse qui permet d'identifier, en fonction des grandes fonctions de la conduite de procédés, détaillées dans le chapitre précédent, les concepts traités pour identifier les explications données. Cette grille a été élaborée grâce à notre expérience d'analyse approfondie de documents faite pour l'application sur le haut-fourneau décrite dans la partie suivante. Elle permet l'identification des connaissances qui pourront être données par le système explicatif à l'utilisateur en se basant sur la catégorie de la connaissance de métier (c'est-à-dire Description statique, Conduite, Détection, Diagnostic, Action).

Typologie des concepts

1. description d'un concept (Description statique)
 - (a) description générale,
 - (b) description des données utilisées (données utilisées, conditions d'application, but, importance pour la conduite)
 - (c) description de l'importance du concept,
 - (d) description des risques pour la conduite liés au concept,
 - (e) éléments de diagnostic liés au concept,
 - (f) description des liens avec les autres concepts,
 - (g) description des actions possibles liés au concept;
2. analyse du comportement des opérateurs de conduite (Conduite),
 - (a) raisonnement des opérateurs à propos d'un concept,

- (b) raisonnement des opérateurs pour la conduite,
 - (c) raisonnement des opérateurs à propos des courbes et de l'analyse des signaux,
 - (d) mode opératoire habituel des opérateurs,
 - (e) critique d'une action des opérateurs;
3. description du cas présent (Détection),
- (a) description de l'état (chiffré) des différents concepts (température fonte = 1480 degré C ...),
 - (b) évaluation du niveau des concepts et synthèse d'un concept (bien, stable, relativement stable, pas de problème, OK, faible, équilibré, plutôt équilibré, grave, subissant des aléas important ...),
 - (c) description des déductions faites à partir du cas présent pour l'état général du procédé,
 - (d) description des déductions faites à partir du cas présent pour les analyses complémentaires à effectuer,
 - (e) analyse critique des données traitées (c'est manifestement faux ...);
4. description du diagnostic des problèmes en cours (Diagnostic),
- (a) description (statique) d'un diagnostic associé à un concept,
 - (b) description des différents diagnostics possibles suite à la détection des problèmes survenus,
 - (c) description des critères de choix du diagnostic,
 - (d) description des déductions faites pour le diagnostic négatif des problèmes (ce n'est pas ...),
 - (e) description des analyses complémentaires à effectuer pour établir le diagnostic,
 - (f) description du diagnostic final établi à partir des problèmes en cours au vu des éventuelles analyses complémentaires effectuées.
5. description des actions à effectuer (Action),
- (a) description (statique) d'une action associée à un concept, (contexte d'application de l'action, objectif de l'action, effet attendu suite à l'action, description des éléments à surveiller pour vérifier les effets de l'action, par exemple conducteur à suivre),
 - (b) description des différentes actions possibles suite à l'identification du problème courant,
 - (c) description des analyses complémentaires à effectuer pour aider au choix de l'action cible,
 - (d) description des critères de choix de l'action cible et description de l'action cible, (contexte d'application de l'action, objectif de l'action, effet attendu suite à l'action, description des éléments à surveiller pour vérifier les effets de l'action).

4.6 Observation des utilisateurs et des experts en situation réelle

En plus des premières phases d'analyse de la documentation technique et d'analyse approfondie de documents, il est indispensable d'effectuer plusieurs recueils. Les méthodes présentées au paragraphe 4.2 ne sont pas au même niveau et n'apportent pas les mêmes éléments, aussi est-il utile de croiser plusieurs méthodes.

Nous proposons ainsi d'observer tout d'abord des utilisateurs ou des experts, puis d'interviewer les experts avec des utilisateurs et enfin d'analyser les interviews avec les différents intervenants.

La première phase de ce processus de recueil est d'observer les utilisateurs et les experts en situation réelle. Ce peut être fait sur un cas réel traité par le système en consultant le SBC si celui-ci est déjà réalisé, ou directement sur les données extraites du procédé dans le cas contraire.

- ce peut être l'observation des utilisateurs en situation réelle ; on cherchera alors à déterminer les éléments utilisés, les connaissances bien ou mal connues, la méthode de raisonnement utilisée . . . ,
- de même, on peut observer des experts en situation réelle ; dans ce cas, les éléments recherchés seront également les éléments utilisés, la méthode de raisonnement utilisée, mais aussi les connaissances employées, les changements de stratégie, ou l'importance du contexte par rapport au problème étudié,
- de manière similaire, on peut prévoir un interview non dirigé pour vérifier le niveau de compréhension des utilisateurs et la place des explications.

4.7 Interviews des utilisateurs et des experts en situation réelle

Après la phase d'observation, plusieurs interviews des experts et des utilisateurs en situation réelle vont être réalisés. Cette phase est très importante, elle sera généralement plus longue que la première et doit être bien préparée :

- ce peut être des interviews non dirigés, ou peu dirigés, pour recueillir les explications de la part de l'expert. Il faut néanmoins être vigilant dans le choix de l'expert puisque l'expert ne donnera que les éléments qu'il suppose importants pour l'utilisateur et nécessitant des explications. Pour ne pas oublier d'éléments, on effectuera plusieurs interviews avec des experts différents. On cherchera également à croiser les explications données par les experts avec les besoins identifiés lors de la phase d'observation. Il est assez facile de savoir ce que souhaitent les utilisateurs et d'obtenir des explications répondant à ce besoin, mais il est plus difficile d'identifier ce que l'on pourrait leur proposer en terme d'explications. C'est pourquoi il est important que ces interviews soient réalisés en situation réelle. On utilisera le SBC en ligne si celui-ci existe, ou hors ligne sur des données rejouées, ce qui permet alors de choisir des moments importants ou typiques d'événements survenus sur le procédé, voire avec un système simulé si le système explicatif est réalisé en même temps que le SBC (ces situations sont décrites au paragraphe 3.4) ;
- ces séances d'interviews peuvent se faire, dans l'idéal, en faisant dialoguer ensemble un expert et un utilisateur. Les explications se font alors en direct à partir des données réelles sur le système en ligne, hors ligne ou simulé. Cette solution permet d'obtenir des explications orales plus nombreuses et de réelles discussions entre un expert qui cherche à expliquer et un utilisateur qui cherche à comprendre. On ne cherchera pas à diriger l'interview pour ne pas fausser les échanges. On interviendra éventuellement pour repositionner des discussions trop longues pour couvrir tout le domaine d'application des explications. En revanche, on reviendra sur ces interviews lors de la phase suivante. Pour être complets et obtenir plusieurs stratégies d'explications, différents besoins, différents manières d'expliquer et de comprendre, ces interviews doivent être répétées avec plusieurs experts et plusieurs utilisateurs. Ainsi deux experts différents et trois utilisateurs nous permettront d'obtenir six interviews riches d'explications différentes.

4.8 Analyse des discussions et des interviews

A la suite des observations et des interviews, on fait suivre une phase de *debriefing* ou d'analyse des discussions. Cette dernière phase est une séance, ou une série de séances, complémentaire pour analyser les différents propos et comportements. Ce peut être une autoconfrontation (présentée précédemment au paragraphe 4.2), ou une simple séance de debriefing avec le ou les intervenants. Bien préparée, cette phase est très riche et peut apporter beaucoup d'exemples, d'éclaircissements ou de justifications. Cependant la préparation, qui consiste en un dépouillage des films pris lors des séances d'interviews (soit six longs interviews si l'on a réuni deux experts et trois utilisateurs), est assez longue. Bien évidemment, cette phase de discussion ou d'autoconfrontation doit elle-même être analysée.

On doit ajouter que la préparation détaillée de chacune de ces trois phases (observations, interviews et analyses) est importante. Il faut choisir les moments intéressants en ce qui concerne le procédé si l'on se place dans un contexte hors ligne, préparer des questions qui permettront de relancer la discussion et préparer avec précision les points qui méritent éclaircissement ou justification.

De même, chaque phase doit être analysée. Les différentes phases sont généralement filmées ou enregistrées. Il faut analyser précisément les manques du système en terme d'explications, les besoins des utilisateurs pour la première phase. Dans la deuxième phase, il faut vérifier ou compléter les exemples d'explications, dégager des stratégies d'explication, voire identifier tous les moments qui seront visionnés pour la phase d'autoconfrontation. La troisième étant généralement riche, elle vient compléter les zones d'ombres des deux premières et permet d'affiner les exemples. Elle doit également être dépouillée avec attention.

Cette proposition de recueil en trois phases permet, grâce à la première, de bien analyser le besoin des utilisateurs, leur compréhension des mécanismes de raisonnement et les manques en matière d'explication tant à propos du SBC que du procédé. La seconde phase permet si l'expert ou les experts sont bien choisis, d'obtenir un large panel d'exemples d'explications qui d'après les experts devraient convenir aux utilisateurs. Lors de la troisième phase, nous pouvons vérifier les explications données par rapport aux besoins des futurs destinataires de la fonction d'explication, dégager les principaux problèmes, éclaircir les explications données et dégager des techniques ou stratégies d'explications.

4.9 Synthèse : cinq phases pour l'acquisition des connaissances explicatives

Nous pensons donc qu'une acquisition des connaissances explicatives comportant les cinq phases d'analyse de documents et de mise en situation réelle décrites ci-dessus permet d'obtenir suffisamment d'informations, d'exemples et de connaissances nécessaires à la réalisation du système explicatif. Bien sûr, ce n'est pas la seule succession de ces cinq étapes mais une itération sur celles-ci qui permet d'obtenir une base riche de connaissances explicatives. Il faut, en effet, reprendre les exemples obtenus pour les améliorer avec les connaissances des documents d'expertises et compléter avec d'autres interviews en situation réelle.

La figure 4.1 reprend les cinq phases décrites dans les paragraphes précédents en mentionnant les informations qui peuvent particulièrement être obtenues au cours de chaque phase.

Nous décrirons dans la partie III comment nous avons réalisé cette acquisition des connaissances explicatives pour la conduite de hauts-fourneaux dans le cadre du projet SACHEM.

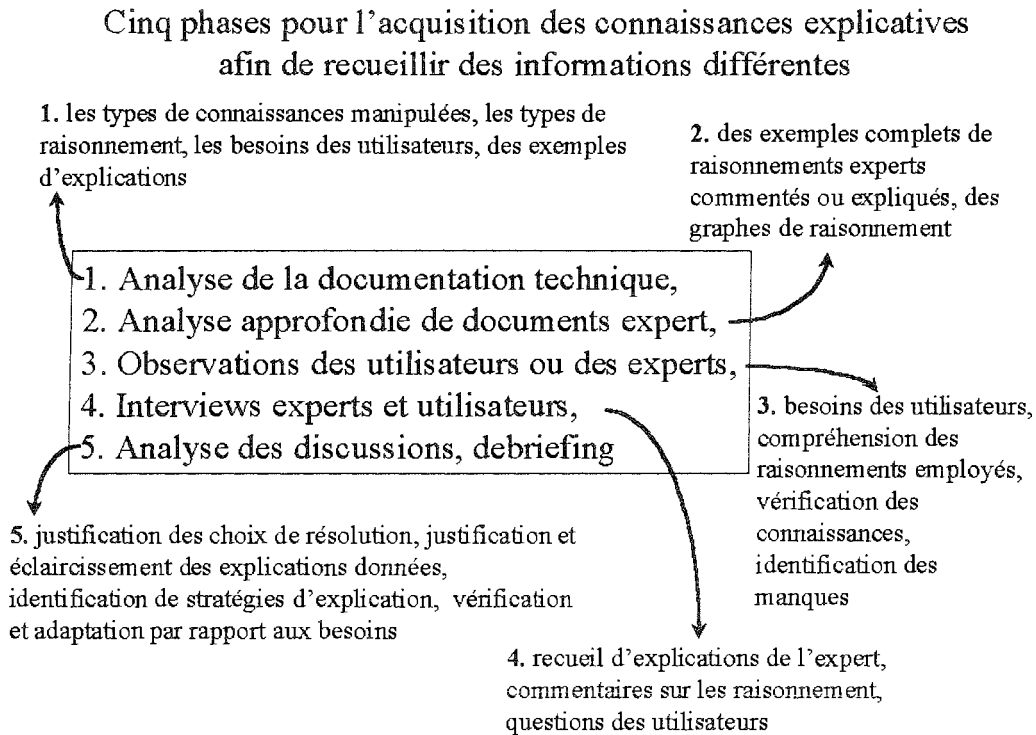


FIG. 4.1 – Les cinq phases de notre proposition d'acquisition des connaissances explicatives

Néanmoins l'étape d'acquisition des connaissances explicatives n'est pas complètement terminée, puisqu'il faut encore évaluer les explications et chercher le moyen le plus adapté de les représenter ou de les modéliser.

4.10 Evaluation des explications

Le problème de l'évaluation des explications est crucial. Si les explications données ne sont pas *bonnes*, c'est-à-dire pas tout à fait correctes du point de vue du métier, ou encore pas au bon niveau pour l'utilisateur, elles ne l'intéresseront pas. L'utilisateur n'en aura pas l'utilité, il ne consultera jamais les explications. Ainsi que l'a mentionné J. D. Moore dans [Moore95] : « *Producing good explanations is a complex problem requiring its own body of expertise, in addition to knowledge used by the expert system in solving a domain problem* » (que l'on peut traduire par « *Produire de bonnes explications est un problème complexe nécessitant sa propre expertise, qui s'ajoute aux connaissances utilisées par le système expert pour la résolution d'un problème du domaine* »). Ce problème complexe est donc à traiter avec attention.

L'intérêt de la fonction d'explications est de mettre au niveau de l'utilisateur les concepts ou raisonnements utilisés sur le procédé. Si les explications qui lui sont données sont trop difficiles à comprendre ou donnent des informations triviales, elles n'ont plus aucune utilité.

Ce sont les « experts en explications » (voir paragraphe 4.1.1), les autres experts ou les utilisateurs, qui peuvent valider les explications données. De même qu'il est difficile de trouver un bon « expert en explications », il est difficile de décider si une explication est une « bonne

explication ». Le problème sera d'autant plus simple que la phase d'acquisition des connaissances explicatives aura été plus riche et proche des besoins des utilisateurs pour la fonction d'explication. A l'inverse, si la phase d'acquisition des connaissances explicatives a été menée de façon rapide ou peu focalisée sur les problèmes majeurs, il faudra faire un gros travail « d'épuration » et de recentrage des exemples avant d'obtenir des explications correctes pour les utilisateurs.

Il est utopique de croire qu'il existe une méthode parfaite pour définir de « bonnes explications ». Nous allons donc simplement essayer de proposer des critères qui permettent de s'approcher des « bonnes explications », ou tout au moins de « s'éloigner des mauvaises » ! Ces critères sont nombreux et parfois contradictoires, il ne faut donc pas les utiliser tous ensemble. En fonction du contexte, du problème traité, et du type d'explication proposée, on sélectionnera un certain nombre de ces critères qui serviront pour l'évaluation des explications. Nous essayerons ensuite de proposer un exemple d'utilisation de ces critères pour juger une explication donnée.

- concision : d'après la définition du Petit Larousse, « concis », signifie « *qui exprime beaucoup de chose en peu de mots ; bref et dense* » [Larousse86]. Il faut s'efforcer d'être concis ;
- précision : il est préférable de donner explicitement les résultats du système ou les données du procédé sur lesquelles s'appuie l'explication, on cherchera donc à être précis ;
- informative : l'explication doit contenir des informations que l'utilisateur ne connaît pas encore [Paris92] ;
- simplicité : mais tout en restant simple (ce qui est un peu contradictoire) ;
- cohérente : les informations doivent être organisées et structurées [Paris92] ;
- synthèse : une « bonne » explication permet de se faire rapidement une bonne idée complète, l'explication doit donc être synthétique ;
- illustration : « un bon dessin vaut mieux qu'un long discours », dit le proverbe. Les schémas permettent souvent d'être synthétique et clair ;
- redondance : il y a souvent peu de redondances dans les explications données par des systèmes, alors que des répétitions ou reformulations paraissent s'imposer dans les explications orales dès que les informations sont nombreuses ou difficiles à intégrer [Flieller et al.96]. Cet avis extrait de l'analyse des explications orales est néanmoins difficile à concrétiser dans des explications produites par un système. On préfère généralement ne pas introduire explicitement de redondance sachant que les utilisateurs vont parfois consulter plusieurs fois des explications similaires contenant des informations en commun ;
- facilité : l'explication doit être simple, claire, facile ;
- compréhensible : l'utilisateur doit obtenir les informations dans un langage accessible et acceptable [Paris92] ;
- structuration : la structuration est l'organisation de l'explication en parties explicitement indiquées [Flieller et al.96] ;
- continuité : la continuité de l'explication s'oppose à ce que l'on pourrait appeler les *labyrinthes verbaux*, c'est-à-dire les faux départs, les arrêts, certaines répétitions, digressions, les retours en arrière motivés par un oubli ... [Flieller et al.96] ;
- pertinence : la réponse doit permettre à l'utilisateur de progresser vers la compréhension de ce qu'il posait comme question [Paris92] ;
- cohérence : l'explication doit avoir une cohérence globale ;
- caractère naturel : une explication doit pouvoir être comprise facilement, elle doit être naturelle ou intuitive. Dans [Moore95], l'auteur mentionne également les qualités suivantes

d'une bonne explication : interactivité, flexibilité, sensibilité, fidélité, suffisance et extensibilité. Mais ces qualités s'appliquent plus à la fonction d'explication de manière générale que directement à une explication recueillie.

Les qualités exprimées ci-dessus permettent de juger une explication donnée. Elles sont nombreuses et comportent des antagonismes : il est assez facile de créer une explication simple et synthétique, mais si cette explication doit également être précise et complète, le problème est plus compliqué.

Pour utiliser ces critères de qualité des explications, nous proposons d'en sélectionner quelques-uns pour avoir des précisions sur le caractère des explications. Par exemple, on peut choisir *concision*, *synthèse*, *simplicité*, *précision*, *compréhension*. Pour chaque explication, un comité d'utilisateurs et d'experts attribuera une note pour chaque critère d'évaluation : *Explication A* : *concision* 3/5, *synthèse* 3/5, *simplicité* 4/5, *précision* 1/5, *compréhension* 2/5.

On essayera ensuite de définir l'importance de chaque critère pour l'évaluation globale de l'explication, par exemple *concision* = facteur 2, *synthèse* = facteur 2, *simplicité* = facteur 1, *précision* = facteur 2, *compréhension* = facteur 3. Ainsi on obtiendra la note globale suivante : $2.4/5$ car $(3*2+3*2+4+1*2+2*3)/50$. Cette évaluation globale est beaucoup plus délicate que l'évaluation de chacun des critères. Il faut donc l'utiliser plutôt comme une indication plutôt que comme une note stricte.

En résumé, on utilisera des critères d'évaluation des explications que l'on sélectionnera en fonction du contexte d'application, du problème traité et des types d'explications proposées. Ces critères évalués par les futurs utilisateurs ou les experts ainsi qu'une évaluation globale indicative, établie à partir de ces critères, permettront de visualiser précisément les points forts et les points faibles de chaque explication. Cette phase d'évaluation sera donc suivie par une phase d'amélioration des explications en utilisant les indications et les évaluations effectuées.

Cette évaluation peut être effectuée une fois que toute l'acquisition a été faite ou en parallèle. La meilleure solution est sûrement d'évaluer des explications quasi-définitives, donc plutôt à la fin de l'acquisition. Mais il faut aussi permettre que les explications soient facilement remaniées et améliorées ; il est donc intéressant que cette évaluation ait lieu au sein du processus d'acquisition des connaissances explicatives et non *a posteriori*. Cette nouvelle étape du processus d'acquisition des connaissances explicatives se situe donc à la suite des cinq étapes proposées mais elle ne pas doit être reléguée complètement à la fin de ce processus puisqu'elle aboutira sûrement sur des propositions d'amélioration des explications analysées (sur lesquelles ont portées les évaluations).

4.11 Structuration et modélisation des connaissances explicatives

Depuis l'apparition de travaux récents et notamment de la méthode KADS, la tendance est à modéliser rapidement les connaissances acquises. Pour cela, on peut utiliser la méthode KADS de modélisation à quatre niveaux (Domaine, Inférence, Tâches, et Stratégie) pour modéliser les connaissances explicatives. Dans ce cas, une bonne étude a été faite par Ph. Martin de l'INRIA Sophia-Antipolis à laquelle le lecteur intéressé pourra se référer [Martin93, Martin94].

Cependant, pour le cas particulier des explications, nous considérons qu'il est trop tôt, dans la progression de cette thèse, pour définir une modélisation définitive des connaissances explicatives. Les explications doivent être en adéquation parfaite avec les connaissances à transmettre aux utilisateurs pour satisfaire leurs besoins. Dans le contexte de l'aide à la conduite de procédés complexes, les modèles d'explication sont donc établis en réponses aux besoins des utilisateurs durant la phase de construction des explications comme nous le décrivons à la fin du chapitre suivant au paragraphe 5.3.4.

Néanmoins, cela n'empêche pas d'effectuer une modélisation préalable. Nous pouvons pour cela utiliser la méthode KADS, la typologie décrite au paragraphe 4.5, ou celle en trois types, largement utilisée, de [Chandrasekaran et al.89], dont nous présentons une version un peu plus détaillée au paragraphe 5.2.1.

Cette modélisation préalable permet de préparer la modélisation finale en structurant et regroupant les connaissances explicatives en fonction du sujet traité.

Conclusion

Alors que l'acquisition de connaissances du métier est maintenant bien maîtrisée, le recueil des connaissances explicatives est un problème encore peu abordé et pour lequel il n'existe pas de solution performante. Les connaissances traitées sont complexes et s'appuient sur des connaissances théoriques et pratiques du domaine, mais aussi sur des compétences de psychologie, de didactique et d'écoute.

Le but de ce chapitre n'était pas de définir le processus d'acquisition de connaissances, largement décrit et utilisé en Intelligence Artificielle, mais d'identifier les contraintes, dues à la spécificité de la tâche d'explication, imposées à cette étape d'acquisition des connaissances explicatives et de dégager une ou plusieurs méthodes permettant de réussir au mieux cette étape dans la construction d'un système explicatif.

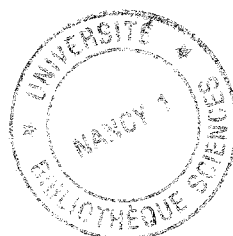
Le problème majeur est qu'il n'y a pas d'expert en explication. Il faut chercher ces connaissances explicatives auprès des experts du domaine et les compléter grâce aux connaissances des psychologues, des didacticiens ou des ergonomes.

Après avoir identifié et défini quels étaient les différents intervenants de cette étape, nous avons ainsi effectué une revue des différentes méthodes les plus utilisées pour le recueil de connaissances explicatives.

Nous avons alors choisi parmi ces méthodes celles qui nous paraissaient les mieux adaptées au contexte applicatif et retenu cinq phases pour cette étape cruciale. Dans un premier temps, nous proposons une analyse de la documentation technique, puis une analyse approfondie de documents d'expertise contenant des raisonnements experts. Pour cette analyse, nous proposons d'utiliser une typologie des concepts étudiés fondée sur la structuration détaillée au chapitre précédent. Les trois dernières phases concernent une mise en situation réelle : une observation suivie d'une séquence d'interviews filmés permettant d'obtenir un large panel d'exemples d'explications. Ces exemples sont ensuite analysés, détaillés et décortiqués lors de la dernière phase.

Puis nous avons abordé le délicat problème de l'évaluation des connaissances explicatives, en proposant une liste de critères (comme la structuration, la précision ou le caractère naturel des explications) avec lesquels on peut qualifier des explications données.

L'étape d'acquisition des connaissances est la première étape de la construction d'une fonction d'explication. Elle doit être menée en parallèle avec l'analyse du besoin des utilisateurs et la définition du cadre de cette fonction. Nous reviendrons sur ces deux idées dans le chapitre suivant, consacré à la réalisation et à l'intégration d'un système explicatif au sein d'un SBC d'aide à la conduite de procédés.



Chapitre 5

Réalisation et intégration de systèmes explicatifs

Sommaire

5.1 Des explications : A qui? Pourquoi?	89
5.1.1 Finalité de la fonction	89
5.1.2 Destinataire cible	89
5.1.3 Interactivité avec l'utilisateur	90
5.2 Des explications : Quoi? Sous quelle forme?	92
5.2.1 Contenu des explications	92
5.2.2 Niveau des explications	93
5.2.3 Forme des explications	94
5.3 Des explications : Comment les créer?	95
5.3.1 Liens avec les autres fonctions d'aide et d'apprentissage	95
5.3.2 Point d'entrée des explications	96
5.3.3 Comprendre ou prolonger le raisonnement	97
5.3.4 Construction des explications	98
5.3.5 Production des explications	102
5.3.6 Interactions de la fonction d'explication avec le SBC	102
5.4 Des explications : Et après?	103
5.4.1 Evolution des utilisateurs ou de leurs besoins	103
5.4.2 Evolution des connaissances	104
5.4.3 Evolution du système	104
5.4.4 Evolution et mise à jour de la fonction d'explication	104
5.4.5 Retour d'expérience sur la mise en place de la fonction d'explication	106

Introduction

Nous traiterons dans ce chapitre tout ce qui concerne la réalisation effective du système explicatif, son intégration et ses liens avec le système à bases de connaissances. Nous supposons que la phase d'acquisition des connaissances décrite dans le chapitre précédent a été réalisée.

Pour réaliser une fonction d'explication, il faut d'abord définir un cahier des charges qui fixe la finalité de la fonction et le futur utilisateur de cette fonction, mais aussi le type d'explications qui seront proposées, les différentes possibilités de forme (schéma ou texte, essentiellement), et le niveau de ce qui doit être expliqué. L'analyse des besoins et la rédaction d'un cahier des

charges est normalement la toute première étape de réalisation d'un système explicatif, avant même l'acquisition des connaissances explicatives. Néanmoins, nous avons souhaité regrouper dans ce chapitre toutes les questions importantes qu'il fallait se poser pour réaliser effectivement le système, y compris celles concernant la définition du besoin.

Puis il faut définir la façon dont les utilisateurs accéderont aux explications avant de réfléchir aux moyens de construire puis de transmettre ces explications. Ce cahier des charges est généralement effectué en parallèle avec la phase d'acquisition des connaissances explicatives décrite au chapitre précédent. Le devenir de la fonction peut alors être évoqué, tant pour l'évolution de la fonction dans son ensemble que pour l'évolution des connaissances ou des informations transmises. La fonction doit alors être validée par les utilisateurs pour pouvoir leur être livrée et intégrée au système. C'est donc dans cet ordre que nous aborderons ce chapitre en détaillant les questions « à qui », et « pourquoi » peuvent être données des explications, « sous quelle forme » elles peuvent être transmises, « comment » elles peuvent être construites, « Et après », que vont-elles devenir ?

Les propositions les plus originales de ce chapitre concernent la construction des explications à transmettre à l'utilisateur et leur évolution et sont présentées aux paragraphes 5.3.3, 5.3.4 et 5.4 [Lejeune et al.99].

L'architecture du système explicatif sera présentée au chapitre 6. Une architecture à base d'agents explicatifs sera proposée.

La figure numéro 5.1 présente notre vision du cadre de la fonction d'explication : une fonction d'explication ajoutée à un SBC pour l'aide à la conduite d'un procédé complexe et à destination, essentiellement, d'un opérateur de conduite.

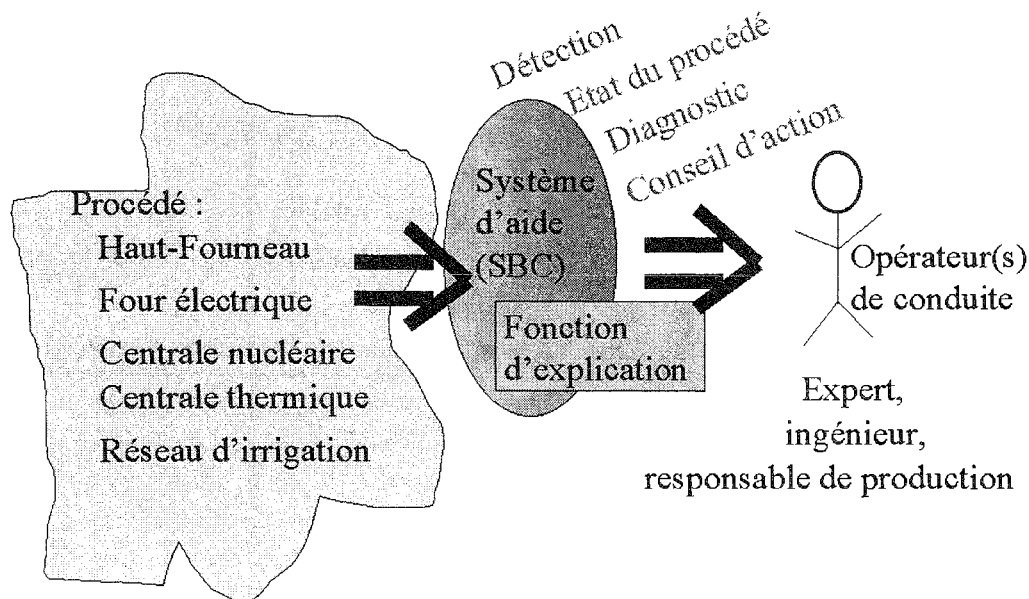


FIG. 5.1 – Le cadre de la fonction d'explication

5.1 Des explications : A qui? Pourquoi?

Les explications pour l'aide à la conduite de procédés complexes sont externes (c'est-à-dire destinées aux utilisateurs du système).

Bien que le contexte de notre travail ne soit pas celui de la génération d'explications négociées en langue naturelle, la première étape est la même : « *le premier problème de la production d'explications est de reconnaître et de comprendre le besoin d'information de l'utilisateur* » [Swartout92].

Bien sûr la résolution de ce problème ne va pas consister, dans notre cadre de travail, à analyser une question tapée par l'utilisateur et chercher à comprendre son besoin profond au travers des mots employés. En revanche, en identifiant l'utilisateur cible, la finalité des explications et les moyens d'accéder à ces explications, nous allons réduire le champ de ce problème difficile. Puis en détaillant les différentes explications possibles par rapport à un besoin prioritaire, nous décrirons dans les paragraphes 5.2 et suivants comment nous pensons qu'il est possible de répondre aux besoins d'information de l'utilisateur.

5.1.1 Finalité de la fonction

L'explication peut être donnée pour les questions :

- Pourquoi le SBC fait-il X?
- Comment le SBC a-t-il détecté X?
- Pourquoi fallait-il que le SBC détecte X?
- Pourquoi le SBC dit-il X?
- Pourquoi le SBC recommande-t-il X?
- Pourquoi le SBC propose-t-il X?
- Pourquoi le SBC n'a-t-il pas proposé Y?
- Comment le SBC est-il arrivé à proposer X?
- Pourquoi fallait-il que le SBC propose X?
- Pourquoi, en la situation hypothétique X, le SBC propose-t-il l'enchaînement Y?

Toutes ces questions dépendent du contexte dans lequel elles sont posées.

Les questions types sont souvent « Quoi, Comment, Pourquoi, Pourquoi pas » [Giboin95] (voir le paragraphe 1.3.3). La première de ces questions est souvent traitée directement par le SBC, alors que les trois autres sont du registre de la fonction d'explication.

Il faut définir, par exemple lors d'un cahier des charges, la finalité précise de la fonction d'explication. Les explications sont souvent données, de façon générale,

- pour faire comprendre,
- pour faire accepter un résultat,
- pour faire partager un raisonnement,
- pour apprendre et faire apprendre.

5.1.2 Destinataire cible

Bien que les explications soient destinées de toute façon aux utilisateurs, il faut clairement définir le type d'utilisateur de cette fonction spécifique et son niveau technique pour que les explications données correspondent vraiment à son besoin et lui apprennent quelque chose.

D'après de nombreux auteurs, l'importance du destinataire (ou utilisateur) est reconnu, c'est le primat de l'utilisateur sur le concepteur : « *Un énoncé ne devient explication que lorsqu'il est reconnu comme tel par le destinataire* ».

Les explications peuvent être destinées à :

- un opérateur de conduite de plus ou moins haut niveau (remplaçant, débutant, de bon niveau, confirmé, expert). Dans le cas où les opérateurs ont le même niveau initial, on peut se baser sur leur formation (de niveau CAP, BEP, Baccalauréat Professionnel, BTS ...) et leur expérience du métier ;
- un expert. Ce peut alors être pour la conduite, pour le diagnostic à plus long terme, ou encore pour l'étude du procédé ;
- un ingénieur, ou un responsable qui analyse la conduite à plus long terme que les opérateurs, mais n'a pas à gérer les problèmes sur le procédé au quotidien ;
- voire éventuellement une personne de l'équipe technique qui s'occupe de l'instrumentation du procédé ou de l'entretien du système mais pas de la conduite.

A priori, les explications sont destinées à la conduite et donc prioritairement aux opérateurs de conduite (au sens large).

Si plusieurs catégories de personnes, ou une seule catégorie mais regroupant des individus de niveaux très disparates, peuvent être amenées à consulter les explications, il est préférable de définir finement le destinataire cible puis de proposer des explications un peu *plus larges* qui pourraient aussi intéresser les autres utilisateurs.

On utilisera alors plusieurs niveaux d'explications pour permettre à chaque utilisateur de trouver des réponses à son besoin d'explication (voir le paragraphe 5.2.2).

On peut également se baser sur des compétences requises ou des compétences minimales qui permettent de comprendre les explications sous la forme où elles sont données. On utilise souvent dans ce cas des notions de *Savoir*, *Savoir-faire* et *Savoir-être*.

Le *Savoir* est décrit comme la connaissance que doit posséder une personne du niveau décrit. Par exemple : « *un opérateur confirmé doit posséder les connaissances théoriques de l'installation, des principes de marche (importance des matières dans chaque accus, les deux modes de marche des coupers), il doit connaître les moyens possibles de mener une action (choix de moyens) et les impacts des actions engagées ou possibles, ou de l'absence d'action* » [gO92].

Le *Savoir-faire* est décrit en terme de compétences que possède ou doit posséder une personne. Par exemple : « *un opérateur confirmé doit avoir la maîtrise de la sécurité concernant les risques gaz, fluides, électricité, charbon, fonte et laitier, il doit savoir combiner injection, broyage amont, gestion de ses stocks (stocks tampons en cas de panne)* » [gO92].

Le *Savoir-être* est plus difficile, il traite de compétences personnelles plutôt que de compétences techniques. Par exemple : « *un opérateur confirmé doit savoir anticiper et doit avoir la capacité d'initiative et de décision* » [gO92].

5.1.3 Interactivité avec l'utilisateur

La façon dont se traiteront les interactions entre l'utilisateur et la fonction d'explication dépend souvent des contraintes sur les interactions entre l'utilisateur et le SBC.

Pour la conduite de procédés industriels complexes, les contraintes imposées par le procédé (procédé continu, temps de réaction court, interruption possible à tout moment, activité complexe, anticipation difficile, conduite collectivee ...) sont souvent telles que le temps d'interaction doit être réduit au minimum. Il est donc illusoire de prévoir des questions et des réponses en langage naturel avec reformulation des explications données (voir le paragraphe 1.3.3). Le choix

de l'explication à donner se fait de préférence par simple « click » à la souris. Ce qui n'exclut pas les réponses sous forme de textes en langue naturelle.

Cette contrainte est très forte pour la conception de systèmes explicatifs, mais c'est une contrainte habituelle qui se justifie bien dans le contexte industriel, fortement contraint, de l'aide à la conduite de procédés. Cette contrainte est par exemple appliquée également pour la gestion de réseaux d'eau pluviale dans le projet Tap-Extra, ou pour la conduite de centrales thermiques classiques pour le projet SACS0 (voir le paragraphe 1.4.7 pour la description de ces projets).

Un des éléments de justification de ce choix peut être les études de la coopération Homme-Homme mentionnées dans [Karsenty et al.95b] qui aboutissent à l'observation suivante : « *l'utilisateur ne sait pas toujours poser la question la plus appropriée* ». Les conclusions tirées de ces études défendent la nécessité des explications négociées. Notre conclusion, basée sur l'observation du contexte de l'aide à la conduite qui interdit les dialogues explicatifs trop longs et trop prenants (pour l'utilisateur), est toute autre : puisque l'utilisateur ne sait pas toujours poser la question appropriée et qu'il n'est pas possible d'introduire de dialogue explicatif, l'utilisateur doit pouvoir trouver facilement et rapidement l'explication répondant à son besoin. C'est donc à nous (concepteurs) de trouver les moyens de préciser son besoin, en utilisant, par exemple, le point d'entrée de la demande d'explication (c.f. 5.3.2).

L'accès à des explications peut donc être sous la forme d'un menu déroulant présentant les différents types d'explications possibles, ou plusieurs types de questions portant sur le sujet. Ce peut être aussi des boutons à cliquer qui, en fonction du contexte, font apparaître de nouvelles fenêtres dédiées aux explications. On peut également imaginer, bien que cela soit difficile à réaliser pour des explications dynamiques liées à l'évolution du procédé, un mécanisme proche des fonctions d'aide classique, par exemple une bulle d'aide ou « point d'interrogation » à placer sur le concept ou le problème que l'on souhaite voir expliquer.

L'accès peut également se faire par une recherche par mot clé dans une base de données pour des explications statiques, la production d'une ou plusieurs vues enchaînées ou par zoom, avec du texte indenté, imbriqué, pour les autres types d'explications.

A priori, les explications sont données en réponse à un besoin de l'utilisateur à sa demande, mais il ne faut négliger pour autant d'envisager des explications spontanées générées du fait d'un événement particulier.

De nombreuses possibilités existent, inspirées principalement par les fonctions d'aide classiques des logiciels mais il ne faut surtout pas oublier que les contraintes fortes imposées par le procédé impliquent de choisir une solution simple, efficace et facile à réaliser. On s'orientera donc plutôt vers une solution soit avec un petit menu déroulant, soit un ou plusieurs boutons d'accès à des vues d'explications.

L'activité de conduite est souvent collective, ou tout du moins rapidement interruptible et changeante. Il est donc pratiquement toujours impossible d'utiliser des mécanismes de modèle de l'utilisateur. Ce type de modèle est pourtant fort utile et permet d'adapter l'explication aux besoins spécifiques et à l'évolution des connaissances de l'utilisateur. Aussi, autant que possible, on essaiera de proposer un modèle de l'utilisateur très simple inspiré des travaux en EIAO, par exemple comportant des informations de type :

- catégorie de l'utilisateur (opérateur, expert, ingénieur, débutant, voire opérateur de niveau 1, 2, 3 ...). Pour chaque catégorie d'utilisateur, on définira un stéréotype avec des connaissances, des tâches, des buts spécifiques ;
- but de l'utilisateur effectif ;
- connaissances de l'utilisateur effectif ;
- besoins prioritaires de l'utilisateur effectif et préférences personnelles (couleurs, formes,

arrangements des vues d'explications, type de capteur d'information préféré, besoin spécifique, mécanismes pas encore compris ...) ;

- si possible, parties des explications à cacher ou au contraire à décrire plus précisément.

En conclusion, on peut rappeler [Giboin95] : « *construire un modèle de l'utilisateur est difficile, voire coûteux par rapport au bénéfice que l'on peut en tirer* ». Avant de prévoir la réalisation d'un modèle de l'utilisateur, il est donc important d'évaluer exactement les apports d'un tel modèle : explications adaptées aux connaissances actuelles de l'utilisateur, suivi de l'évolution de l'utilisateur, explications adaptées aux préférences de l'utilisateur. Mais il faut évaluer également le coût et les problèmes posés par ce modèle, comme l'intégration des nouvelles connaissances dans les bases de connaissances, l'utilisation de ces connaissances, la gestion du modèle, ou le danger d'enfermer l'utilisateur dans un moule ou dans un stéréotype.

5.2 Des explications : Quoi? Sous quelle forme?

Les explications transmises doivent répondre à une attente et un besoin des utilisateurs identifiés au paragraphe précédent et correspondre autant que possible à leur façon de travailler. Nous allons nous intéresser dans ce paragraphe au contenu des explications ainsi qu'à une caractérisation possible en trois types, puis au niveau et enfin à la forme des explications.

5.2.1 Contenu des explications

Le contenu des explications transmises sera adapté au besoin des utilisateurs. Il faut définir le type d'information que l'on présentera ainsi que le niveau de profondeur de ces explications (voir le paragraphe suivant). On peut pour cela se baser sur un document synthétique bien connu. Par exemple «*Pour les experts, une explication dont le contenu est au bon niveau est une des descriptions de XPERDOC*», où le document XPERDOC est un document hypertexte résumant les connaissances de métier.

On peut également se baser sur une typologie ou un classement des explications. La typologie la plus reconnue est celle de Chandrasekaran, Tanner et Josephson [Chandrasekaran et al.89] en trois niveaux (connaissances, lien entre données et résultats et méthode de résolution) présentée au paragraphe 2.4. A partir de celle-ci, nous proposons une typologie un peu plus détaillée :

- Type 1 - Explications des connaissances,
 - Type 1.1 - Explications statiques des connaissances : ce sont les explications des connaissances de métier ;
 - Type 1.2 - Explications des liens statiques entre les connaissances : ces explications portent sur les imbrications, et les liens sur les connaissances de métier ;
- Type 2 - Explications du lien entre données et résultats. Ces explications générales du lien entre données et résultats comprennent les explications relatives à tous les pas intermédiaires de raisonnement (c'est-à-dire explications des liens élémentaires),
 - Type 2.1 - Justifications de la détection ;
 - Type 2.2 - Explications simples de cause d'apparition d'un signal, ou d'un événement. Ce peut être un graphe de relation de cause à effet entre une cause primaire et une anomalie ;
 - Type 2.3 - Explications plus évoluées décrivant les causes d'apparition d'un problème en référence à d'autres problèmes (on peut avoir besoin dans ce cas de l'élaboration d'un diagnostic), ou explication des résultats de type état courant du procédé ;

- Type 2.4 - Explications de résultats complexes comprenant des éléments de diagnostic ou de conseil pour l'action à effectuer sur le procédé ;
- Type 3 - Présentation de la méthode de résolution,
 - Type 3.1 - Présentation de la méthode générale de résolution mise en œuvre ;
 - Type 3.2 - Présentation de la stratégie contextuelle de résolution mise en œuvre ;
 - Type 3.3 - Présentation de la ou des méthodes de discrimination et des explications négatives (question POURQUOI PAS). Ce type d'explications contient des informations permettant à un utilisateur de comprendre pourquoi sa solution n'a pas été retenue par le système.

Bien sûr, ce classement n'est pas parfait ni exhaustif, la meilleure solution étant de proposer une typologie des explications à produire en fonction du procédé et des conditions particulières d'utilisation de la future fonction d'explication.

Dans cette typologie, on ne peut pas distinguer les explications en fonction de leur caractère, de leur forme ou de la stratégie explicative suivie. On aurait envie de « typer » les explications en fonction :

- du style de l'explication. L'explication peut être technique, chimique, pragmatique, théorique ... ,
- des caractéristiques de l'explication : précision, concision, redondance,
- des stratégies d'explication (structure ou plan de l'explication) : du général au particulier, du particulier au général, en entonnoir, avec aparté, bifurcation ...

ou en fonction des critères énoncés au paragraphe 4.10.

Néanmoins, on ne cherchera pas à établir de typologie *parfaite*, puisque cela nous paraît impossible. En revanche, nous chercherons, dans la suite, à compléter cette typologie présentée à l'aide d'autres typologies. En croisant les critères d'analyse, nous pourrions donc espérer obtenir une catégorisation optimale (même si elle n'est pas parfaite) des différentes explications.

5.2.2 Niveau des explications

On utilise le terme de « niveau des explications » pour décrire la profondeur des éléments décrits. Dit autrement, c'est le problème posé par la question : « Que peut-on supposer connu ? » ou encore par celle-ci « Jusqu'à quel point doit-on expliquer ? ».

Par exemple, lorsque qu'un professeur de français explique une règle de grammaire à ses élèves de 4^e, il peut supposer globalement connues les grandes règles définissant l'orthographe : accord des pluriels, conjugaison des verbes ...

De même, lorsque son collègue de mathématiques explique les mécanismes de résolution des équations du second degré aux lycéens, il s'appuie sur les mécanismes de résolution des équations du premier degré, mais ne décrira plus les mécanismes de mise en facteur commun, la multiplication par un nombre négatif, les règles de multiplication, d'addition, de soustraction ...

Comme ces enseignants, il faut s'assurer que les règles sur lesquelles s'appuie l'argumentaire sont bien assimilées mais ne pas enseigner tous les mécanismes vus lors des cours précédents.

Le niveau auquel les explications doivent s'arrêter est déterminé en fonction du niveau global des utilisateurs cibles, c'est pourquoi l'évaluation fine des compétences et connaissances de ces utilisateurs est importante.

Cependant pour s'adapter à l'hétérogénéité des utilisateurs d'une même catégorie ou pour prendre en compte plusieurs catégories possibles d'utilisateurs, on emploie généralement plusieurs

niveaux d'explication [Trichet98]. Nous proposons les trois niveaux suivants éventuellement complétés par un quatrième :

- un niveau principal correspondant aux besoins des utilisateurs cibles ; c'est celui que l'on présentera en premier, et c'est le plus important ;
- un ou plusieurs niveaux plus simples et plus détaillés pour des utilisateurs plus novices ;
- un ou plusieurs niveaux plus synthétiques où les raisonnements sont moins décrits pour les utilisateurs experts ;
- éventuellement un niveau plus riche ou plus complet dans lequel on mettra beaucoup plus d'informations (une liste quasi exhaustive des points d'entrée possibles) pour qu'une demande d'explication un peu originale puisse être satisfaite.

5.2.3 Forme des explications

La forme que peuvent prendre les explications est très variable. On trouve souvent :

- du texte : ce type d'explication est bien adapté aux questions/réponses en langue naturelle (c'est-à-dire lorsque l'opérateur a du temps). C'est aussi une forme souvent utilisée pour que les utilisateurs se focalisent sur le fond et non sur la forme lorsque l'on réalise un prototype de la fonction (on évite ainsi les remarques inutiles comme « *Tu l'as fait avec PowerPoint ?* », « *J'aurais préféré en vert, en plus gros et plus haut ...* ») ;
- du texte schématisé ;
- des schémas ;
- des diagrammes ;
- des graphiques ;
- des images ;
- des films ;
- des bandes-sons.

Il faut adapter la forme des explications à la finalité, aux besoins, aux utilisateurs et à la forme des autres résultats transmis par le SBC.

Il n'y a donc pas de forme parfaite. Si l'on souhaite être plus synthétique ou que l'utilisateur voie plus vite les éléments clé, on utilisera plutôt des schémas ou des diagrammes ; en revanche si l'on souhaite être plus précis, ou plus complet, on adoptera plutôt du texte. Enfin, si l'on ambitionne d'être aussi parfait que possible, on utilisera une méthode mixte avec du texte, des schémas, des diagrammes, des images, et du son pour utiliser les avantages de chaque forme (on évitera alors de trop charger les vues d'explications).

Il est souvent intéressant de varier les supports (texte, image, son) pour que chaque utilisateur puisse trouver la forme qu'il préfère. On reproche souvent aux systèmes explicatifs de ne pas faire de redondance, ce qu'un enseignant ou un expert fait très souvent à l'oral. En variant les supports de communication, on a ainsi la possibilité d'exprimer de plusieurs manières la même information sans pour autant faire de redites qui pourraient lasser les utilisateurs.

Afin d'être efficace, il faut veiller à respecter les *bons principes* de définition d'une interface Homme-Machine. On pourra par exemple consulter un des ouvrages de référence comme [Helander et al.97] ou les recommandations de l'AFNOR [Afnor88], l'une des nombreuses thèses sur le sujet [Berger90], ou encore les cours disponibles sur Internet comme à l'URL

http://www.hds.utc.fr/~ptrigano/lo18_index.html.

Voici quelques exemples de principes à respecter : mettre au maximum sept parties différentes sur un écran, garder une cohérence sur tous les écrans, définir des zones et des couleurs standard,

utiliser des icônes représentatives et toujours à la même place, limiter le nombre de fenêtres ouvertes à cinq, limiter le nombre de choix proposés dans un menu à sept plus ou moins deux choix, avoir des temps de réponse courts (au maximum quatre secondes, sinon mettre un sablier ou un message pour indiquer que le traitement est en cours) ...

5.3 Des explications : Comment les créer ?

La fonction d'explication doit s'intégrer dans l'environnement du SBC, avec les différentes fonctions principales correspondant aux activités des utilisateurs et les fonctions d'aide. Nous détaillerons également ici les propositions d'explications en terme d'informations à transmettre. Nous nous appuierons, pour cela, sur le modèle de raisonnement simplifié des opérateurs de conduite présenté au chapitre 3.

5.3.1 Liens avec les autres fonctions d'aide et d'apprentissage

Les explications ont pour finalité générale (voir le paragraphe 5.1.1) de :

- faire comprendre,
- faire accepter un résultat,
- faire partager un raisonnement,
- apprendre et faire apprendre.

C'est donc assez spécifique, mais il peut néanmoins y avoir certains recoupements avec les autres fonctions d'aide que sont les fonctions classiques (toutes ne sont pas toujours mises en place) : didacticiel, manuel utilisateur, aide en ligne et formation des utilisateurs.

Ces fonctions devraient être mises en place très tôt, mais elles sont souvent réalisées après la mise en place du système et souvent en même temps que la fonction d'explication.

Pour beaucoup d'utilisateurs, le mot « expliquer » regroupe à peu près tous les objectifs des fonctions ci-dessus, il faut donc faire un effort pour bien distinguer les buts et la forme des différentes fonctions d'aide. Les différentes fonctions d'aide sont :

- la formation des utilisateurs : elle a pour but de former à l'utilisation du système par une formation spécifique faite habituellement (et de préférence) par des non-informaticiens (souvent des utilisateurs ayant défini le cahier des charges, ou membres d'un comité d'évaluation, ou encore des experts). Cette formation comporte un descriptif des grandes fonctionnalités du système et de la façon dont celui-ci doit être utilisé. Elle se fait sur le système réel, plutôt avec des données réelles ;
- le didacticiel : il a pour but de former à l'utilisation du système en présentant les grandes fonctionnalités du système et des exemples d'utilisation. C'est une aide déconnectée du système, didactique et utilisée en complément de la formation ;
- le manuel utilisateur : c'est un ouvrage décrivant précisément les différentes fonctions, les possibilités de navigation dans le système et les interactions possibles avec l'utilisateur. Il est destiné aux utilisateurs pour les aider à utiliser le système ;
- l'aide en ligne : c'est une aide accessible depuis le système, soit reprenant les informations du manuel utilisateur, soit les complétant. Elle est également destinée aux utilisateurs pour les aider à utiliser le système. Elle est souvent accessible soit par un index (comme une encyclopédie), soit par un « point d'interrogation » que l'on place sur l'élément sur lequel on souhaite des renseignements.

La fonction d'explication doit être positionnée vis-à-vis de chacune des fonctions d'aide du système. Elle peut être complètement indépendante, compléter certaines informations, reprendre des éléments de description ou comporter un lien direct vers une de ces fonctions.

Par exemple, la fonction d'explication n'a pas pour but de décrire le fonctionnement du système mais le procédé et les liens entre les résultats du système et le procédé. Aussi, pour des informations concernant l'élaboration d'un résultat, renverra-t-elle directement sur l'aide en ligne correspondante ou, pour des informations concernant l'utilisation d'une fonction difficile, sur un exemple du didacticiel.

5.3.2 Point d'entrée des explications

La façon dont les utilisateurs accéderont aux explications n'est pas sans influence sur la construction de ces explications.

Si le système ne comporte qu'une seule fenêtre avec un seul bouton « explication », il faudra structurer fortement les explications à donner, ou permettre à l'utilisateur de choisir ce qu'il cherche à savoir. Si le système est constitué de nombreuses fenêtres correspondant à chaque résultat du système et que chacune permet d'accéder à des explications, les explications données correspondront au résultat accédé. Si enfin, l'accès ne dépend pas des résultats du système mais se fait, par exemple, par un menu spécifique comportant différents types d'explications, un choix de l'utilisateur conditionnera les informations à donner.

Ainsi qu'on peut le voir dans les exemples ci-dessus, on peut distinguer deux grandes catégories d'explications : des explications locales et des explications globales.

La description de ces deux catégories d'explications, ainsi que les paragraphes suivants se baseront sur l'hypothèse présentée au chapitre 3 de structuration d'un système d'aide à la conduite de procédés autour de quatre fonctions principales : Détection, Etat Courant, Diagnostic et Conseil d'action.

D'après les travaux de Pierre Falzon, l'explication en situation de travail a prioritairement une visée pragmatique ; l'explication vise alors à permettre d'agir [Falzon89].

Nous présentons dans les deux paragraphes suivants ce que nous appelons « *explication locale* » et « *explication globale* ». La figure 5.2 décrit brièvement les distinctions entre ces deux types d'explications que nous détaillerons plus précisément au paragraphe 5.3.4.

5.3.2.1 Explication locale

On appelle « *explication locale* », une explication attachée à une fonction du système ou à un type de résultat. L'explication donnée concernera majoritairement la fonction ou le résultat qui a servi de point d'entrée.

Les résultats principaux auxquels se rattachent les explications locales correspondent aux grands résultats du SBC : la détection, l'interprétation de l'état présent, le diagnostic et l'action à entreprendre (voir le chapitre 3 et la description des principales fonctions d'un SBC d'aide à la conduite au paragraphe 3.3). L'utilisateur accédera par exemple à l'explication de la détection, qui éventuellement comportera quelques éléments concernant l'état présent. On utilisera le même principe pour des fonctions complémentaires. Par exemple, les principales invalidations, accessibles par une fonction « Invalidation », peuvent être expliquées.

5.3.2.2 Explication globale

On appelle « *explication globale* » une explication qui s'intéresse à tous les aspects de l'explication. Elle reprendra donc les différentes explications locales des différents résultats pour en

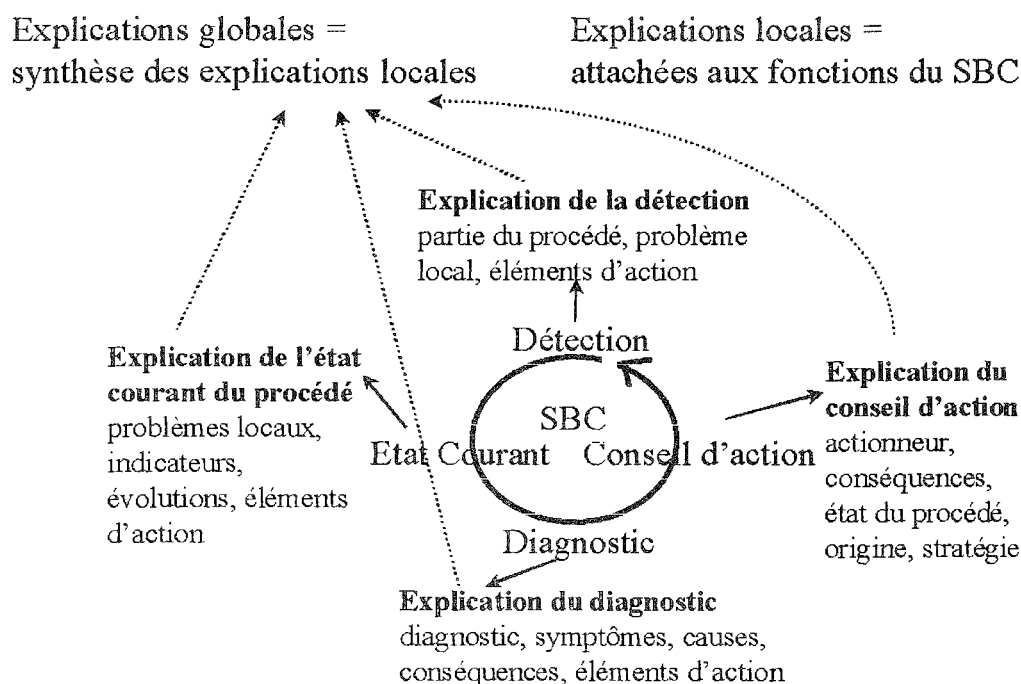


FIG. 5.2 – La distinction entre explications globales et locales

extraire une synthèse.

Cette explication doit être accessible à partir de la ou des principales vues du système. Elle peut être utilisée seule, comme fonction d'explication unique, ce qui se fera plutôt dans les cas où le procédé n'est pas trop complexe, ou dans les cas où il est particulièrement important d'avoir une vision synthétique du procédé mais pas forcément de chaque résultat. Dans les cas où il est utile d'expliquer chaque type de résultat, l'explication globale peut être utilisée en complément des explications locales. On aura alors plusieurs fonctions d'explication décrivant chacune un aspect particulier des résultats du système.

5.3.3 Comprendre ou prolonger le raisonnement

En fonction du type de résultat fourni par le système, il peut être utile de « dérouler » le raisonnement suivi pour le comprendre. C'est le cas, par exemple, des résultats qui permettent directement de choisir une action à entreprendre sur le procédé. A l'inverse, lorsque ce résultat ne permet pas directement de prendre une décision, ou souhaitera « prolonger » le raisonnement.

En fonction des résultats du système et de l'orientation de l'explication par rapport au raisonnement (« dérouler » ou « prolonger » le raisonnement), nous proposons de distinguer les quatre types d'explications suivants :

1. **explications de résultats intermédiaires** : des résultats, comme des résultats de détection, ne permettent pas de prendre une décision, c'est pour cela qu'ils sont qualifiés d'intermédiaires dans le raisonnement de l'opérateur de conduite qui doit aboutir à une

action. Dans ce cas, il faut essayer de « convaincre durablement » l'utilisateur de la validité de ces résultats, même s'ils ne constituent pas des éléments achevés pour l'aide à la conduite ;

2. **explications de résultats finaux** : ces résultats sont considérés comme finaux car ils permettent, sans ambiguïté, de prendre une décision d'action à entreprendre sur le procédé. Ce sont donc des résultats comportant des recommandations d'action ou des aides à l'action ;
3. **explications de résultats en cours ou de résultats terminés mais non finalisés** : on présente des explications concernant un résultat en cours ou des explications concernant un résultat terminé ou abouti compte tenu de la connaissance incluse mais ne permettant pas directement de prendre une décision d'action à entreprendre sur le procédé. L'appel à ce type d'explications correspond à la pratique courante de transmission d'informations entre opérateurs de conduite. Il invite l'utilisateur à poursuivre le raisonnement selon la logique entamée par le système et l'aide à raisonner aussi efficacement que l'expert ;
4. **présentation ciblée d'informations** : ces informations n'ont pas été intégrées dans le système, mais elles correspondent à du savoir-faire. Parmi elles, peuvent apparaître des informations évidentes, comme les actions réflexes (un problème égale une action) ou des connaissances parcellaires relatives à la culture locale ou au contexte d'instrumentation.

5.3.4 Construction des explications

Si les phases d'acquisition des connaissances explicatives, puis de modélisation des explications en fonction des besoins précis des utilisateurs cibles ont été complètement réalisées, la construction d'explications pour l'aide à la conduite de procédés complexes n'est pas très compliquée. Elle est beaucoup plus simple que la construction d'explications négociées en langue naturelle comme pour le projet AIDE [Bourcier et al.94] [Kassel95] (décrit par ailleurs au paragraphe 1.4.1), puisque celles-ci nécessitaient à la fois compréhension des questions et construction d'une explication syntaxiquement et sémantiquement correcte.

La difficulté dans l'absolu n'est pas diminuée, en revanche, le maximum de difficulté ne réside plus dans la phase de construction des explications comme dans le cas des explications négociées produites en langue naturelle et répondant à des questions elles-mêmes en langue naturelle.

Nous verrons dans les paragraphes suivants, qui complètent ce que nous avons déjà vu précédemment, les propositions que nous faisons pour construire et produire des explications répondant aux contraintes et aux besoins des opérateurs de conduite. Nous avons toujours cherché à proposer des solutions simples et adaptées au contexte particulier de nos travaux.

La construction d'une explication répondant à la demande de l'utilisateur dépend des paramètres suivants :

- le point d'appel ou point d'entrée de la fonction d'explication : ce peut être un résultat ou une fonction particulière. Dans le cas d'une explication locale à un résultat (par exemple un résultat de diagnostic), on construira l'explication de ce résultat (l'explication du diagnostic) ;
- le type d'explication : il complète l'information correspondant au point d'entrée ;
- les données traitées : certains résultats peuvent, par exemple, ne pas être disponibles.

A noter, qu'il peut être utile, pour éviter des explications complexes contenant peu d'informations, de donner une explication du type « *Jusqu'à l'obtention des résultats X ou Y (ou valeur, signal ...), je ne peux rien dire* ». C'est aussi une manière de fixer les conditions de production de l'explication et les limites du système explicatif.

Cette remarque n'est pas bénigne, puisqu'il ne faut pas oublier qu'« *il n'est pas possible de tout expliquer* », ainsi que l'ont mentionné de nombreux auteurs cités dans les chapitres 1 et 2, par exemple les auteurs du dossier [Giboin95].

5.3.4.1 Propositions

Il est difficile de proposer une explication standard s'adaptant à tout système d'aide à la conduite. Dans le cas de systèmes complexes, le procédé, son instrumentation, le niveau et les habitudes des opérateurs de conduite ont une influence très forte sur le contenu de la fonction d'explication. Cependant, pour aider à la construction des explications, nous allons essayer de proposer dans les paragraphes suivants plusieurs explications locales aux différents résultats ou globales. Nous verrons ainsi, tout d'abord, les explications locales aux résultats de détection, les explications des résultats concernant l'état présent du procédé, puis les explications des résultats de diagnostic et enfin les explications des résultats concernant l'action à entreprendre. Nous verrons de même les propositions concernant les explications globales.

L'ordre des propositions est indicatif. En fonction de la présentation de ces informations, il faut veiller à garder une structure d'ensemble et une mise en exergue des points les plus importants pour la conduite (par exemple mettre en premier ou au centre l'information essentielle).

5.3.4.2 Explications des résultats de détection

Ainsi que nous l'avons vu au chapitre 3 au paragraphe 3.3.1, la fonction de détection traite habituellement des résultats concernant les données (lecture, analyse, agrégation en problèmes ou phénomènes locaux).

Cette fonction de détection synthétise les données traitées pour produire des problèmes locaux qui sont des déviations par rapport à un comportement de référence [Basseville et al.96].

Pour ce type de résultat, on peut présenter :

1. des rappels sur la partie du procédé concerné par le problème local détecté : l'objectif de cette partie ou rubrique, les principes généraux, les différents types de données traitées et les différents types de problème local possibles ;
2. l'origine du problème local étudié : la présentation des données (extraites des capteurs) qui ont permis de détecter ce problème, éventuellement une description des capteurs utilisés, les mesures utilisées, les principales données invalidées utilisées pour la détection de ce problème ;
3. le problème local étudié : le type du problème, une description rapide de ce problème si nécessaire ;
4. des éléments concernant l'action : les liens avec les autres problèmes locaux, des idées de raisonnement ou de diagnostic concernant le problème local, l'utilisation possible du problème local pour le choix de l'action à entreprendre ;
5. des liens pour trouver plus d'informations, concernant l'instrumentation du procédé, l'utilisation du système, des rappels sur la conduite du procédé provenant des autres fonctions d'aide : formation, didacticiel, manuel utilisateur ou aide en ligne.

5.3.4.3 Explications des résultats concernant l'état présent du procédé

On suppose que le système peut produire des résultats décrivant l'état présent du procédé (voir le paragraphe 3.3.2).

Pour ce type de résultat, on peut présenter :

1. les problèmes locaux détectés : la liste des problèmes locaux, leur gravité, leur impact et leurs conséquences sur le procédé ;
2. les principaux indicateurs de l'état du procédé : si la fonction « état du procédé » peut se baser sur des indicateurs généraux reflétant l'état du procédé, la description de ces indicateurs principaux, les liens entre eux, les conséquences des évolutions de chacun d'eux ;
3. les évolutions possibles : suivant la logique « *il vaut mieux un procédé qui est dans un état perturbé mais qui s'améliore, plutôt qu'un procédé dans un état satisfaisant mais qui se détériore* », il faudrait pouvoir présenter les liens entre les différents problèmes et leurs impacts sur le procédé temporellement et quantitativement et les prévisions d'évolution ;
4. des éléments pour l'action : les éléments à suivre prioritairement pour étudier l'évolution du procédé, des bons conseils d'action en fonction des différentes situations possibles.

5.3.4.4 Explications des résultats de diagnostic

A partir des premiers résultats et éventuellement à l'aide d'analyses complémentaires à effectuer, le système peut proposer un résultat de type diagnostic (c'est-à-dire un ou plusieurs diagnostics possibles). Dans ce cas, les explications se baseront sur ces résultats de diagnostic (voir le paragraphe 3.3.3).

Pour ce type de résultat, on peut présenter :

1. le ou les diagnostics possibles : présentation et description du ou des diagnostics possibles et éventuellement (si nécessaire et si possible) des éléments de choix entre ces diagnostics ;
2. les autres possibilités de diagnostic écartées : description des autres diagnostics écartés et des motivations qui ont fait écarter ces possibilités non retenues ;
3. les symptômes : présentation des principaux symptômes ;
4. les causes primaires : présentation des principales causes primaires à partir de graphes causaux ;
5. les conséquences possibles : description des conséquences possibles des problèmes diagnostiqués et de leur influence sur le procédé ;
6. des éléments concernant l'action : des conseils ou des consignes à appliquer en fonction de chaque problème diagnostiqué, des éléments de liens entre les diagnostics à partir de graphes d'influence ;
7. la marche à suivre : les éléments ou capteurs à suivre de près pour confirmer un diagnostic ou pour établir un choix entre plusieurs diagnostics possibles. Ce peut être aussi les éléments ou capteurs à suivre de près pour suivre l'évolution d'un problème diagnostiqué, ou son impact sur le procédé, ou encore les éléments ou capteurs à suivre de près qui permettent de vérifier l'effet attendu suite à l'action entreprise pour résoudre ce problème.

5.3.4.5 Explications des résultats concernant l'action à entreprendre

A partir des autres résultats, le système peut proposer des résultats de « conseils d'action » ou « recommandation d'action » restreints sur une partie ou sur tout le procédé. Nous postulons ici que les explications concernant l'action à entreprendre se basent sur un ou plusieurs conseils d'action (voir le paragraphe 3.3.4).

Pour ce type de résultat, on peut présenter :

1. l'actionneur choisi : une description de l'actionneur choisi et de la quantification proposée, une description des autres actionneurs et, si nécessaire (et si possible), pourquoi l'actionneur prioritaire n'a pas été choisi (voire tous les actionneurs) ;

2. les conséquences attendues de l'action : les conséquences qualitativement et temporellement attendues sur le procédé. On peut par exemple présenter une courbe d'action de l'actionneur choisi, ou une courbe traduisant l'augmentation ou la diminution d'une ou plusieurs valeurs d'un capteur dans le temps ;
3. les conseils d'action écartés : pourquoi d'autres conseils n'ont pas été choisis, la description des critères de choix et des autres actions possibles,
4. l'état du procédé qui a conduit à ce conseil d'action ;
5. l'origine de la dégradation qui a conduit à ce conseil d'action : graphe causal, diagnostic, problèmes locaux détectés et agrégés ;
6. la stratégie employée.

5.3.4.6 Explications globales

L'explication globale doit reprendre les résultats des différentes fonctions : détection des problèmes locaux, interprétation pour l'état présent du procédé, diagnostic, et conseil d'action. Il y a deux façons possibles de présenter ces résultats :

1. soit simplement une agrégation des résultats les plus représentatifs des quatre propositions ci-dessus,
2. soit l'introduction d'un niveau supplémentaire plus synthétique.

La première solution sera mise en œuvre lorsque les résultats actuels sont suffisamment synthétiques et clairs. La deuxième peut être réalisée par l'introduction de problèmes généraux (une dizaine au maximum sur le procédé) qui font la synthèse des problèmes locaux lorsque ceux-ci sont nombreux. Ces problèmes permettent donc de s'intéresser à une partie complète du procédé sans pour autant considérer le procédé dans son ensemble.

Pour la deuxième solution, on a choisi d'introduire un niveau supplémentaire plus synthétique de description des problèmes en cours. Pour cette solution, on peut présenter :

1. l'origine du problème : les éléments déclencheurs (plusieurs problèmes locaux par exemple), le positionnement géographique du problème sur le procédé, l'état actuel du problème (qui peut être « Rien A Signaler actuellement ») ;
2. en quoi c'est un problème : l'objectif général concernant le problème, l'état de référence, l'importance relative du problème pour la conduite ;
3. le contexte de marche ou état de criticité du procédé ;
4. les conséquences du problème, les liens avec les autres problèmes ou les influences sur les autres problèmes ;
5. des éléments pour l'action : soit sous forme de conseil d'action lorsque un tel conseil existe (c'est-à-dire un résultat de la fonction de conseil d'action), soit, dans le cas contraire, sous forme d'un conseil à suivre dans l'absolu. C'est ce que l'on peut appeler un *bon conseil*, par exemple « En présence d'un problème de garnissage, deux types d'action sont possibles, soit une action sur la répartition gazeuse, soit une charge dégarnissante ». Ce bon conseil est construit de manière statique mais appliqué au contexte. C'est l'opérateur qui vérifie la validité du conseil et qui choisit l'action à entreprendre ;
6. le suivi du problème : la description des capteurs à suivre qui permettent de détecter au plus tôt le problème, ceux qui permettent de suivre l'évolution de problème et ceux qui permettent de vérifier l'effet attendu d'une action effectuée sur le procédé ;

7. une synthèse des problèmes : la liste des plus importants, ou de leur importance sur le procédé, un récapitulatif du passé par la présentation des problèmes rencontrés, une brève synthèse de chaque problème (à partir des informations précédentes), les liens ou influences entre les problèmes.

5.3.5 Production des explications

Une fois la demande d'explication clairement identifiée et l'explication répondant au besoin construite, il faut produire l'explication correspondante en respectant les contraintes d'interface.

Si la structuration et la construction des explications ont été correctement faites, la production est assez simple : c'est une mise en place complète des différentes parties de l'explication construite. La forme de l'explication finale est définie par le cahier des charges, c'est souvent un assemblage de textes, schémas, images et éventuellement de bandes-son. La production de l'explication respecte les contraintes imposées à l'interface utilisateur. Ces contraintes peuvent être spécifiées et rassemblées dans un fichier de paramétrage des fenêtres (ou vues) d'explications.

La production des explications correspond alors à la construction des fenêtres d'explications à afficher.

La production d'explication peut être faite à la suite de la demande de l'utilisateur (par exemple une demande d'explication locale aux résultats de détection), ou de manière spontanée lors de la survenue d'un événement particulier (par exemple une proposition d'explication globale faite à l'heure du changement d'opérateur, ou à une heure précise juste avant une réunion de suivi du procédé). Néanmoins, cette dernière possibilité doit être envisagée avec parcimonie pour ne pas perturber l'utilisateur dans sa consultation du système à bases de connaissances.

5.3.6 Interactions de la fonction d'explication avec le SBC

Les interactions avec le SBC sont nombreuses ; elles ont lieu tant au niveau des données, des résultats transmis que de l'accès à des fonctions.

Nous allons essayer de mentionner les interactions possibles, mais cette liste ne peut pas être exhaustive, elle dépend de la manière dont le SBC et le système explicatif seront réalisés :

- accès aux données des bases de données numériques et symboliques, et à la base des connaissances explicatives ;
- accès aux résultats des principales fonctions : détection des problèmes locaux, état des principaux indicateurs de l'état du procédé, élaboration de diagnostic, de conseil d'action. On peut accéder à ces résultats alors qu'ils sont sous une forme finie mais aussi au cours de leur élaboration : état d'avancement, données utilisées, données en attente, problèmes rencontrés ... ;
- accès aux résultats d'autres fonctions : ce peut être la liste des invalidations, la liste des problèmes locaux présents et passés, la liste des diagnostics et conseils d'actions passés ... ;
- accès à une des principales fonctions pour plus de détails ;
- accès à une des fonctions d'aide : didacticiel, manuel utilisateur, documents de synthèse d'expertise, aide en ligne ;
- accès à une des autres fonctions.

Les interactions mentionnées ci-dessus sont effectuées depuis la fonction d'explication. A l'inverse, l'appel à la fonction d'explication se fait depuis les différentes fonctions du système, ce qui a déjà été décrit dans les paragraphes « 5.3.2 Point d'entrée des explications », « 5.3.2.1 Explication locale », « 5.3.2.2 Explication globale » et suivants du paragraphe « 5.3 Des explications : Comment ? ».

5.4 Des explications : Et après ?

Les explications devant répondre au maximum aux besoins précis des utilisateurs, il faut penser dès le début de la conception du système explicatif à son évolution possible pour qu'il évolue avec les utilisateurs. Cette évolution sera simplifiée si un modèle de l'utilisateur a pu être mis en place. Dans le cas contraire il faudra être particulièrement vigilant et prévoir des mécanismes et des personnes permettant l'évolution.

Ces modifications doivent permettre à la fonction de ne pas rester figée et participent au but de capitalisation des connaissances de l'entreprise (voir le chapitre 7 pour plus de détails).

Nous détaillerons premièrement dans ce paragraphe les évolutions possibles, en ce qui concerne les besoins, les connaissances et le système, qui doivent être prises en compte. Puis nous montrerons par quels mécanismes il est possible d'intégrer ces évolutions au sein du système explicatif. Enfin, nous préciserons comment généraliser la procédure de mise en place d'un système explicatif en utilisant un *retour d'expérience* et en définissant des mécanismes associés.

5.4.1 Evolution des utilisateurs ou de leurs besoins

Le terme évolution des besoins n'est peut-être pas très bien choisi, c'est tout ce qui concerne les évolutions dues aux utilisateurs que nous avons voulu mentionner ici.

A priori, le besoin en terme d'explications évolue très peu, c'est plutôt la réponse à ce besoin qui évolue en fonction des modifications des connaissances, du système, des utilisateurs ou des nouvelles possibilités d'expliquer le procédé. Cependant, les éléments devant être expliqués en priorité dans le système en général ou au sein d'une explication peuvent changer. Il faudra alors prévoir la modification de l'explication correspondante.

Pour faire face à un besoin spécifique, il peut être utile également, même si ce n'est pas la finalité première de la fonction d'explication, de donner des explications à durée limitée qui devront disparaître lorsque ce besoin n'existera plus. Ce peut être le cas, par exemple, pour

- l'utilisation d'une nouvelle donnée synthétique importante pour la conduite : par exemple, au lieu d'utiliser plusieurs capteurs, on introduit une moyenne des capteurs non invalidés avec des mécanismes de vérification de la cohérence,
- la modification des attributions des utilisateurs cibles : les opérateurs de conduite voient leur champ d'application élargi et doivent faire face à de nouveaux problèmes en appliquant des consignes ou des raisonnements peu utilisés,
- l'introduction d'un nouveau modèle de calcul qui modifie les raisonnements habituels,
- l'ajout d'une nouvelle fonction importante au système,
- l'installation réelle du SBC au sein de l'environnement des utilisateurs : on cherchera alors à expliquer comment utiliser le système, ce qui est normalement plutôt du ressort d'un didacticiel (voir le paragraphe 5.3.1 pour la description des buts du didacticiel),
- la détection d'un manque de compétence des utilisateurs sur un point précis du procédé : en rappelant les grandes lignes du raisonnement, les idées principales, les schémas de raisonnement ou les consignes à suivre, on peut aider les utilisateurs à progresser sur un point précis.

Certains des cas présentés ci-dessus correspondent à des modifications des connaissances ou du système d'aide. C'est pourquoi ils pourront apparaître également dans les deux paragraphes suivants. Ils correspondent alors à des évolutions des besoins à la suite d'évolutions des connaissances ou du SBC, alors que les points qui n'apparaissent que dans ce paragraphe correspondent à des évolutions des besoins à connaissances constantes et système constant.

5.4.2 Evolution des connaissances

L'évolution des connaissances peut se faire par une modification de la base des connaissances du métier, parce que la base n'était pas complète ou que les connaissances ont effectivement évolué (amélioration ou affinement de la conduite à tenir en cas d'apparition d'un problème, validation par les experts d'un raisonnement de diagnostic, ...).

Voici quelques exemples d'évolution des connaissances :

- modification d'un raisonnement (abaissement d'un seuil de détection, mise en corrélation de plusieurs données, augmentation de la tranche horaire pour la prise en compte d'une anomalie sur le procédé ...),
- amélioration de la conduite à tenir en cas d'apparition d'un problème,
- validation par les experts d'un raisonnement de diagnostic,
- introduction d'un nouveau modèle de calcul qui modifie les raisonnements habituels.

5.4.3 Evolution du système

Le système, qui n'est pas forcément complet lors de sa première mise en service (voir le paragraphe 3.4), peut évoluer quant aux fonctionnalités (par exemple : ajout, ou modification d'une fonction) mais aussi en complément des éléments traités (par exemple traitement de nouveaux types de problèmes, extension du champ d'action du système).

Voici quelques exemples d'évolutions du SBC :

- l'ajout d'une nouvelle fonction importante au système,
- l'installation réelle du SBC au sein de l'environnement des utilisateurs : on cherchera alors à expliquer comment utiliser le système, ce qui est normalement plutôt du ressort du didacticiel (voir le paragraphe 5.3.1 pour la description des buts du didacticiel),
- la modification du champ d'une fonction (par exemple : la fonction de diagnostic s'appuiera sur un modèle de panne ou de bon fonctionnement élargi),
- l'utilisation d'une nouvelle donnée synthétique, importante pour la conduite : par exemple, au lieu d'utiliser plusieurs capteurs, on introduit une moyenne des capteurs non invalidés avec des mécanismes de vérification de la cohérence.

5.4.4 Evolution et mise à jour de la fonction d'explication

Nous avons décrit dans les trois paragraphes précédents les évolutions possibles relatives aux utilisateurs ou à leurs besoins, aux connaissances et au système. Une fois ces évolutions possibles identifiées, nous pouvons maintenant réfléchir à des propositions de mécanismes permettant de prendre en compte ces évolutions possibles au sein du système explicatif.

Afin de permettre une évolution simple de la fonction d'explication, nous avons regroupé les modifications possibles sous forme de trois possibilités. Ces possibilités sont « naturelles », en ce sens qu'elles correspondent à des besoins classiques non spécifiques du domaine de la conduite de procédé.

Nous détaillons dans la suite ces trois possibilités : en savoir plus, en présenter moins, et en ajouter.

5.4.4.1 En savoir plus

L'idée est de concrétiser la notion de niveau d'explication (voir paragraphe 5.2.2) en permettant à l'utilisateur d'aller voir plus d'informations sur un point précis.

Ainsi, chaque rubrique ou chaque thème présenté devrait comporter la possibilité d'« en savoir plus » sur ce sujet. Cela peut être réalisé pratiquement par un « bouton » à cliquer pour « en savoir plus » sur ce sujet. On présentera alors une fenêtre spécifique à l'utilisateur. C'est la solution qui a été proposée pour le système SACHEM décrit au chapitre 8.

Cette solution est très simple mais on peut imaginer aussi un menu, ou un champ « en savoir plus » que l'utilisateur place sur la partie qui l'intéresse, ou un lien hyper-texte si l'explication donnée peut être mise sous forme de texte simple (ce qui est rarement le cas comme nous l'avons vu au paragraphe 5.2.3) ...

A partir de ce deuxième niveau d'explication plus complet et plus détaillé, on peut imaginer encore le même mécanisme vers un troisième niveau, etc.

Plutôt que de créer des fenêtres spécifiques d'explication, si l'information recherchée existe sous une autre forme au sein d'une autre fonction, chaque bouton « en savoir plus » peut alors être un simple lien vers cette autre fonction (voir le paragraphe 5.3.6 pour la description des autres fonctions d'aide). C'est une solution que nous avons souvent adoptée dans l'application décrite dans la partie suivante.

5.4.4.2 En présenter moins

A l'inverse, un besoin important à un moment particulier peut se révéler moins prioritaire qu'il n'apparaissait en première analyse, ce qui ne signifie pas pour autant complètement secondaire. Ceci peut être dû à l'évolution des connaissances, des compétences des utilisateurs ou de l'utilisation du système. Il faut alors prévoir de ne pas présenter de façon prioritaire cette information tout en gardant quand même la possibilité à l'utilisateur d'y accéder s'il le souhaite.

On peut alors imaginer un mécanisme simple de « fermeture » d'une rubrique ou d'une partie de l'explication donnée. Cette partie fermée garde néanmoins un titre et la possibilité d'être accédée, plutôt dans une nouvelle fenêtre créée pour la circonstance, par exemple par le mécanisme précédent de « en savoir plus ». Ce mécanisme est donc, en un sens, l'inverse du mécanisme précédent « en savoir plus ».

Si le choix de fermeture d'une rubrique ou d'une partie d'une explication est laissé à la discrétion de l'utilisateur, chaque utilisateur peut modifier les éléments de l'explication en fonction de ses connaissances et de ses besoins. Ceci peut se faire s'il est possible de savoir quel est l'utilisateur effectif et qu'un modèle de l'utilisateur a été mis en place. Ainsi on aura bien une adaptation des explications aux besoins réels de chaque utilisateur. Néanmoins cette situation n'est pas réaliste, c'est généralement la situation suivante qui apparaît.

Dans le cas plus général où l'utilisateur effectif ne peut pas être connu (activité collective, consultation brève et interruptible ...) il faut alors prévoir qu'un groupe d'utilisateurs ou d'experts (par exemple : le groupe chargé de la validation du projet si celui-ci est constitué essentiellement d'utilisateurs) puisse décider de la priorité des informations à transmettre et de la « fermeture » d'une rubrique ou d'une partie d'une explication. Ainsi, on évitera qu'un utilisateur « ferme » plusieurs rubriques qui ne seraient plus proposées à l'utilisateur suivant. Grâce à la validation collective plutôt qu'individuelle, chaque utilisateur trouvera les mêmes informations que celui qui l'avait précédé s'il accède aux mêmes explications.

Cette option « En présenter moins » nécessite donc une maintenance de la fonction d'explication pour que celle-ci soit rapidement mise à jour en fonction des demandes du groupe d'utilisateurs ou d'experts. Les utilisateurs auront d'autant plus l'impression que la fonction d'explication est faite pour eux.

Toutes ces fonctionnalités : avoir une première fenêtre prioritaire, accéder par un lien à un deuxième niveau d'explication, puis un troisième, accéder à une nouvelle fonction, consulter du

texte, des images, et des schémas, voire des bandes-sons, ... , font penser aux caractéristiques de la navigation HTML³⁷. Evidemment, dès que possible, on utilisera une version HTML de la fonction d'explication (au moment de l'écriture de cette thèse, on préférera alors la version 4.0, à ce jour recommandée par le W3C³⁸ <http://www.w3.org/TR/REC-html40/>). Cependant, vu les activités des utilisateurs potentiels du système, l'obligation d'agir rapidement après lecture des informations sur le système et les configurations des salles de conduite, il est peu probable que la fonction d'explication ou le SBC puissent être réalisés sous une forme HTML.

5.4.4.3 En ajouter

La fonction d'explication doit pouvoir facilement intégrer de nouvelles connaissances. Ces modifications peuvent se faire au niveau de la base de connaissances ou directement dans la base de connaissances explicatives (la base de connaissances explicatives est la base de données qui contient toutes les connaissances explicatives et toutes les données nécessaires aux explications, nous la décrivons brièvement au chapitre 6). Elles peuvent avoir un impact sur les explications : il faut intégrer la nouvelle connaissance dans l'explication concernée ou modifier la manière d'expliquer.

En pratique, la modification ajoutera, supprimera ou modifiera des éléments de connaissance au sein d'une rubrique des explications, ajoutera, supprimera ou modifiera une rubrique entière voire une nouvelle explication complète (par exemple, dans le cas de l'ajout d'une nouvelle fonction importante comme une fonction de prévision ou d'anticipation).

Les mécanismes de modification de la structure d'une explication doivent donc être prévus dès le début pour que les explications puissent s'adapter facilement.

5.4.5 Retour d'expérience sur la mise en place de la fonction d'explication

Il est important d'intégrer au sein de la fonction d'explication les évolutions possibles dues à l'environnement de cette fonction, comme nous venons de le voir aux paragraphes précédents. Il peut également être utile de prévoir, avant sa mise en place définitive, des mécanismes qui permettront d'analyser son utilisation ou les remarques des utilisateurs, soit pour la faire évoluer encore, soit dans l'objectif de réutiliser ce savoir-faire pour d'autres systèmes.

Nous ne cherchons pas ici à conserver toute la trace de *l'histoire de la mise en place de la fonction d'explication*, nous reviendrons sur ce point au chapitre 7, mais à prévoir des mécanismes simples d'analyse de l'utilisation de la fonction d'explication.

Nous n'avons pas mis en place ces mécanismes au sein de l'application présentée dans la partie suivante, mais nous décrivons néanmoins ici quelques possibilités :

- historique des accès aux explications : la solution la plus simple est de conserver un historique des accès aux explications, avec le nombre de consultation des vues d'explication, le temps de consultations, les points d'entrée des explications, les moments d'appel,
- historique des explications proposées : nous pouvons également réaliser un historique des explications générées, avec les types d'explications (détection, RCA, globales), le contexte courant. Cet historique est ensuite analysé pour aider à l'évolution des explications,
- historiques des évolutions demandées et réalisées : chaque évolution est enregistrée et validée, ce qui permet d'évaluer les modifications des utilisateurs et de leurs besoins,

37. HyperText Markup Language

38. World Wide Web Consortium <http://www.w3.org/>

- positionnement de *post-it* par les utilisateurs sur les explications: pour que les utilisateurs puissent mettre des remarques en temps réel destinées soit aux autres utilisateurs, soit aux experts pour l'étude du procédé, soit aux personnes chargées de la maintenance de la fonction,
- influence de l'introduction de la fonction sur l'utilisation du système: si la fonction est bien faite, correspond aux besoins des utilisateurs et bien utilisée, l'amélioration de la compréhension des résultats doit se ressentir. On peut alors interroger directement les utilisateurs ou analyser leur utilisation du SBC.

Conclusion

Dans cette partie consacrée au développement de systèmes explicatifs pour l'aide à la conduite de procédés complexes, nous nous sommes intéressés à la réalisation effective du système explicatif, son intégration et ses liens avec le système à bases de connaissances.

Le plan suivi dans ce chapitre est semblable à l'ordre des étapes que l'on suit pour la réalisation d'un SBC.

Les explications sont destinées prioritairement aux opérateurs de conduite, mais aussi aux experts, aux ingénieurs ou aux responsables de production. Si des utilisateurs de niveaux différents sont amenés à consulter les explications, il est préférable de définir précisément les destinataires cibles puis de proposer des explications un peu plus *larges* qui pourraient intéresser les autres utilisateurs. Les explications servent à faire comprendre ou faire accepter un résultat, à faire partager un raisonnement ou à améliorer les compétences des utilisateurs. Les utilisateurs ne savent pas toujours poser la question appropriée [Karsenty et al.95b], mais les contraintes dues au procédé réduisent le temps et les possibilités d'interaction au minimum. Aussi, il n'est pas possible d'introduire de dialogue explicatif permettant d'affiner la demande des utilisateurs. C'est pourquoi, il est important que les moyens d'accès aux explications soient multiples, explicites et permettent de préciser le besoin d'un utilisateur.

Les utilisateurs accéderont à un niveau d'explications répondant aux besoins prioritaires des utilisateurs cibles. Ce niveau est complété par plusieurs niveaux contenant des informations plus simples pour des utilisateurs novices ou plus synthétiques pour des utilisateurs experts. Ces explications peuvent être sous forme de texte, de schéma, de diagramme, de film ou de bande-son. Les schémas ou les diagrammes ont l'avantage d'être plus synthétiques, les films ou les bandes-sonores servent pour des informations complémentaires alors que les textes permettent d'être précis et complet, aussi il est important d'utiliser plusieurs supports pour bénéficier de tous les avantages. D'autres fonctions d'aide peuvent exister dans le SBC: formation des utilisateurs, didacticiel, manuel utilisateur ou aide en ligne. La fonction d'explication peut compléter ces fonctions d'aide, reprendre des éléments de description ou inclure un lien direct vers une de ces fonctions.

Nous avons identifié deux formes principales d'accès aux explications: locales aux quatre fonctions du système ou globales. Pour chaque explication identifiée, nous avons présenté des éléments ou des informations à proposer, qui peuvent soit dérouler le raisonnement suivi par le SBC, soit inviter l'utilisateur à prolonger celui-ci.

Les explications doivent rester en adéquation avec les besoins des utilisateurs et les connaissances incluses dans le système. Les utilisateurs peuvent évoluer, ainsi que les connaissances du procédé ou le système, il faut donc prévoir de présenter moins d'informations (parce qu'elles deviennent moins prioritaires) ou d'ajouter de nouvelles informations. De même, on permettra à chaque utilisateur d'en savoir plus sur des informations données dans les explications. Pour que

la fonction d'explication évolue, ou pour avoir un retour d'expérience sur sa mise en place, il est également utile de mettre en place des mécanismes d'analyse de l'utilisation de cette fonction.

L'architecture logicielle correspondant aux propositions faites dans ce chapitre sera détaillée dans le chapitre 6. Nous nous baserons soit sur des exemples d'architecture de systèmes explicatifs, soit sur le paradigme multi-agents.

L'objectif de capitalisation des connaissances a été évoqué dans ce chapitre, essentiellement dans le dernier paragraphe 5.4. Nous détaillerons comment la fonction d'explication participe au but de capitalisation des connaissances ou de *knowledge management* dans le chapitre 7.

Toutes les idées avancées dans ce chapitre, ainsi que dans le chapitre précédent et celui consacré à l'architecture logicielle, seront reprises dans le chapitre 8 de la partie d'application. Nous *instancierons* et montrerons comment nous les avons appliquées à un cas concret d'aide à la conduite sur le procédé de l'usine à fonte : les hauts-fourneaux de Sollac.

Enfin nous reviendrons brièvement sur les différentes étapes de construction d'un système explicatif et sur l'ordre d'enchaînement de ces étapes dans le dernier chapitre.

Chapitre 6

Architecture des systèmes explicatifs

Sommaire

6.1 Exemples d'architectures de systèmes explicatifs	110
6.1.1 L'architecture du système EES	110
6.1.2 L'architecture du système ESMERALDA	111
6.1.3 L'architecture du projet Tap-Extra	114
6.1.4 L'architecture multi-agents du système SYNERGIC	115
6.2 Les éléments à prendre en compte dans l'architecture	118
6.2.1 Les bases de données	118
6.2.2 Les bases de connaissances	118
6.2.3 L'éventuel modèle de l'utilisateur	119
6.2.4 Les interactions	119
6.3 Proposition d'architecture modulaire	119
6.3.1 Caractéristiques	119
6.3.2 Structure modulaire	120
6.3.3 Modification de l'architecture modulaire	121
6.4 Vers une proposition d'architecture multi-agents	121
6.4.1 Rappel sur la définition d'un agent	121
6.4.2 Les principales contraintes	121
6.4.3 Proposition d'architecture multi-agents	122
6.4.4 Caractéristiques de l'architecture multi-agents proposée	125
6.4.5 Modification de l'architecture multi-agents	126
6.4.6 Généralisation de l'architecture multi-agents	126

Introduction

Après avoir abordé plusieurs points importants du développement de systèmes explicatifs pour l'aide à la conduite de procédés complexes dans les chapitres précédents, comme l'acquisition des connaissances explicatives ou la construction et la production d'explications, nous allons étudier dans ce chapitre la conception d'une architecture logicielle de ce système.

Nous allons premièrement analyser plusieurs exemples d'architecture de systèmes explicatifs extraits de la littérature. Puis, en étudiant les contraintes imposées par notre contexte d'application nous proposerons une architecture modulaire *classique*. Ensuite nous verrons comment il est possible d'utiliser les techniques des systèmes multi-agents, que nous rappellerons brièvement. Nous en distinguerons les aspects les plus importants et proposerons une structure générale basée sur les propositions émises dans le chapitre 5.

6.1 Exemples d'architectures de systèmes explicatifs

Étudions tout d'abord quelques exemples d'architecture de systèmes explicatifs extraits de la littérature. Nous allons en premier analyser celle du système EES. Ce système est très connu dans la communauté des chercheurs du domaine. Il correspond exactement à l'orientation prise de génération d'explications en langue naturelle s'inspirant du domaine du langage naturel et du mécanisme de négociation des explications.

Le deuxième système étudié, le système ESMERALDA, se situe dans le même domaine des explications en langue naturelle. Les travaux se basent sur les corpus d'exemples d'explications beaucoup étudiés en France, relatifs au projet AIDE. L'architecture est distribuée, elle utilise la méthode des tableaux noirs (ou *Blackboard*).

Puis nous analyserons une architecture proche de nos travaux, réalisée pour les projets ISEE et Tap-Extra. L'architecture proposée est modulaire et présente de nombreux points communs avec celle du système EES.

Enfin, nous nous intéresserons à un cas particulier d'architecture multi-agents, celle réalisée pour le système SYNERGIC. Les travaux décrits traitent de l'introduction d'un agent explicatif unique destiné à produire des explications.

6.1.1 L'architecture du système EES

Nous avons tout d'abord mentionné le système EES³⁹, devenu *Expect*, dans le paragraphe 1.3.3, comme un exemple de système expliquant en langue naturelle. Il s'inspire beaucoup du domaine appelé NLP, pour «*Natural Language Processing*» qui s'intéresse aux discours et dialogues sous forme naturelle [Neches et al.84].

Nous sommes revenus rapidement sur ce système dans le paragraphe 1.4.3 pour décrire l'application nommée PEA⁴⁰ développée par Johanna Moore [Moore95]. Cette application a pour but d'aider les utilisateurs du système à améliorer des programmes en code Common LISP. Les explications données sont des conseils de transformation du code développé.

Enfin, les différentes bases de connaissances, utilisées pour les explications dans le système EES, ont été mentionnées au paragraphe 2.8.

La figure 6.1 présente la structure complète du système EES. On peut remarquer la place du générateur d'explication dans le système complet et ses interactions avec la base de connaissances, le système expert, l'interpréteur ou l'utilisateur.

La figure 6.2 présente l'architecture du système explicatif de EES (les rectangles représentent des éléments de traitement, les ovales représentent des structures de données). Le système explicatif est dirigé par un but de communication, (par exemple : *persuader l'utilisateur de remplacer setq par setf*), transmis par le système expert comme un résultat du raisonnement ou comme un résultat d'une requête de l'utilisateur. Le système explicatif s'appuie également sur un modèle de l'utilisateur et sur un générateur de texte en anglais (écrit par Penman). La structure propre du générateur d'explication comporte tout d'abord un traitement de la requête, puis un planificateur de texte utilisant un historique du dialogue et une base de plans d'opération qui définissent des stratégies d'explication. Cette stratégie dirige la recherche dans la base de connaissances du système expert et dans le modèle de l'utilisateur et indique la structure de l'explication. Une interface grammaticale transmet alors l'explication structurée et complétée au générateur de phrases de Penman [Paris92].

39. Explainable Expert System

40. Program Enhancement Advisor

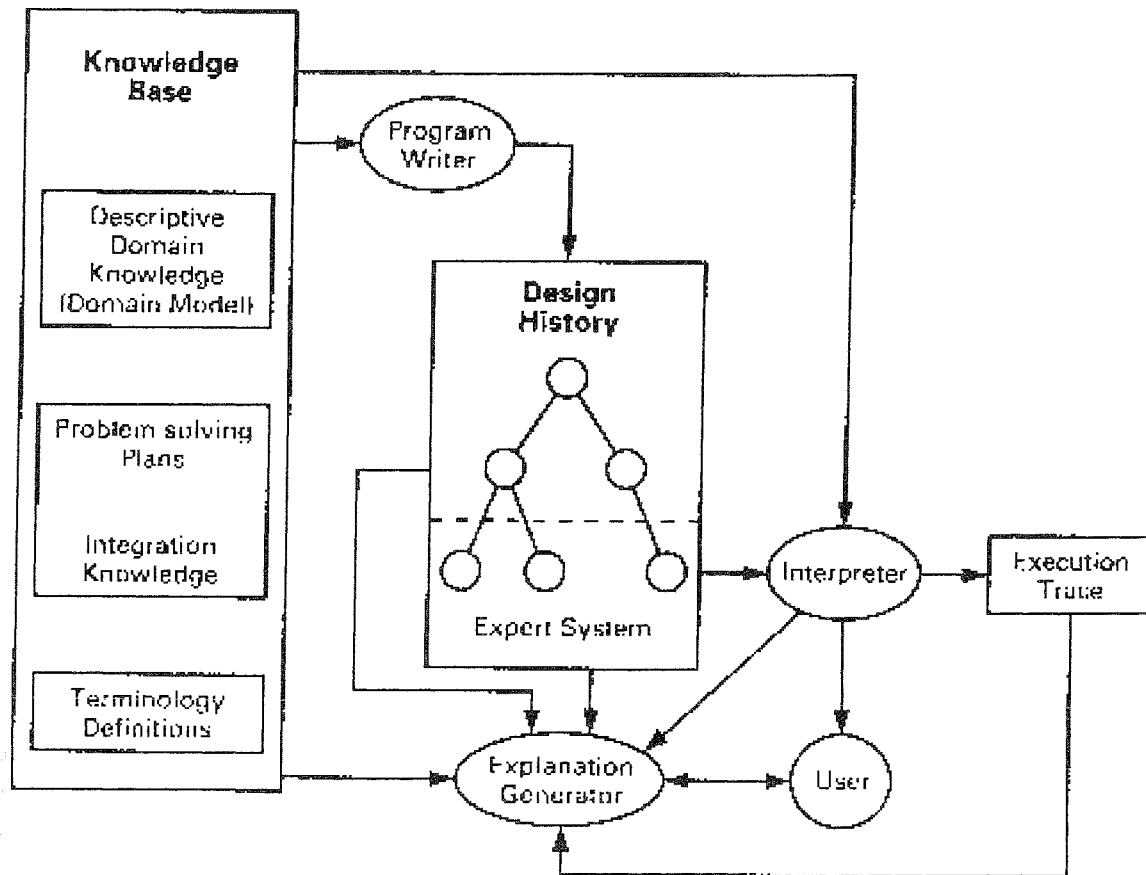


FIG. 6.1 – La structure du système EES (extrait de [Moore95])

On peut remarquer que l'orientation prise de générer des explications en langue naturelle en réponse à des requêtes également en langue naturelle a des répercussions très fortes sur l'architecture. L'architecture repose essentiellement sur les trois phases de construction d'une explication en langue naturelle présentées au paragraphe 2.10.1 :

1. interprétation de la requête de l'utilisateur,
2. choix et définition d'une stratégie d'explication pour générer une structure de texte,
3. génération du texte final en langue naturelle.

6.1.2 L'architecture du système ESMERALDA

Le système ESMERALDA a également été mentionné dans cet ouvrage, au paragraphe 1.4.1 décrivant les applications médicales des systèmes explicatifs. En effet, ce système a été étudié pour le corpus de dialogue du projet AIDE (décrit dans ce même paragraphe) sur les infections néonatales. Il se base sur deux corpus de dialogues recueillis par une technique proche du magicien d'Oz (mentionnée au paragraphe 4.2) entre un expert (ici le chef du service de néonatalogie) simulant le système explicatif et des internes questionnant le système. Le problème concerné est le traitement antibiotique à donner à un nouveau-né [Lemaire92c]. Les deux corpus contenaient quatre dialogues entre un expert et un utilisateur.

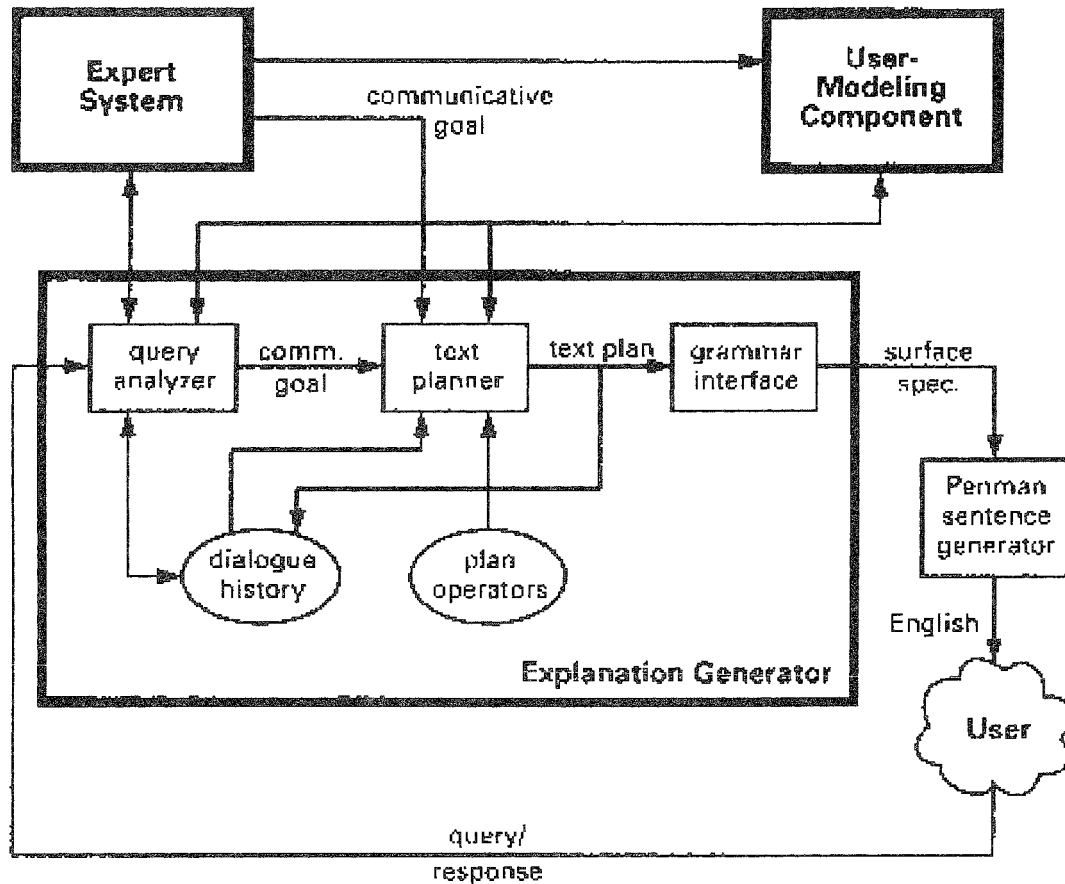


FIG. 6.2 – L'architecture du système explicatif de EES (extrait de [Moore95])

Néanmoins, du fait de l'incomplétude des connaissances recueillies dans le projet AIDE, du fait que la phase de validation des connaissances n'a pas été faite, les connaissances incluses dans le système final sont relatives au jeu de Bridge, un domaine bien connu de leur équipe de recherche [Lemaire92c]. L'auteur ne s'est pas intéressé à la phase d'acquisition des connaissances, à leur représentation ni à leur validation, tous les efforts ont porté sur le raisonnement. De même, le couplage avec le système expert n'a pas été fait et les entrées de l'utilisateur ont été simulées.

L'architecture proposée est une architecture à base de tableau noir, comme celle du système HEARSAY II, à l'origine de ce modèle, ou celle du système ATOME⁴¹ [Haton et al.87]. Elle repose sur le principe du raisonnement hypothétique [Lemaire et al.91].

Le tableau noir proposé est divisé en quatre couches : utilisateur, interprétation, construction et transmission [Lemaire92a]. Cette décomposition est illustrée à la figure 6.1.2. « *Conceptuellement, le tableau noir est composé d'une succession d'arborescences couvrant les quatre niveaux. Concrètement, ces différentes couches constituent chacune une liste LISP composée d'objets de différentes natures* » [Lemaire92b].

Le premier niveau a été simulé, le deuxième peu traité. Au niveau construction, les objets présents sont des explications dont la représentation est arborescente. Les objets du dernier niveau

41. Another TOOl for developing Multi-Expert systems

sont des listes d'items d'explication obtenues par linéarisation de la structure arborescente de l'explication solution.

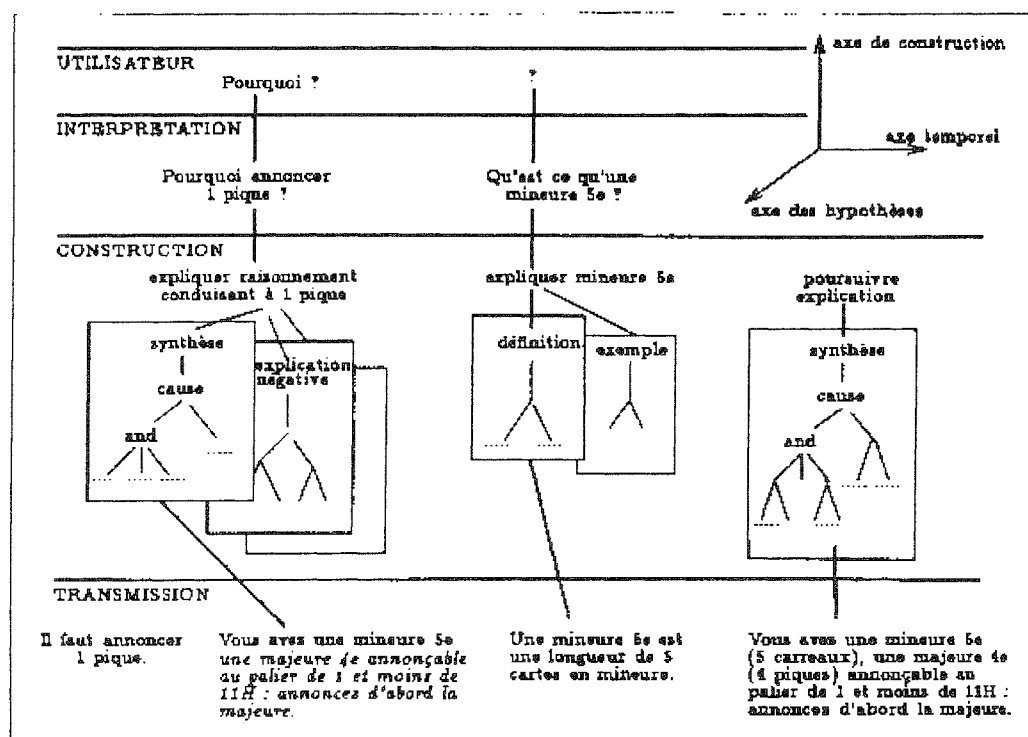


FIG. 6.3 – Exemple de représentation de la construction du dialogue (extrait de [Lemaire92c])

La figure 6.1.2 présente sur un exemple la construction du dialogue en quatre niveaux. Le niveau utilisateur mémorise la suite des énonciations de l'utilisateur, ici les questions « *Pourquoi ?* » et « *?* » (qui traduit une incompréhension). Le niveau interprétation contient les interprétations du système correspondant à chaque énonciation du niveau précédent, ici « *Pourquoi annoncer 1 pique ?* » dans le premier cas. Le niveau suivant correspond à la construction des explications à l'aide du raisonnement hypothétique en fonction des interprétations. Enfin, une fois le choix effectué de ce qui doit être transmis à l'utilisateur, le niveau transmission mémorise ce qui a déjà été fourni et ce qui ne l'a pas encore été.

Cette architecture est intéressante, elle est basée sur le modèle de tableau noir qui s'inscrit dans la problématique des systèmes multi-agents. Les connaissances sont représentées de manière distribuée et explicite. Le raisonnement hypothétique implanté au sein de **ESMERALDA** est réalisé de manière dynamique, les décisions à prendre sont prises au moment même où elles sont nécessaires.

Néanmoins seuls les raisonnements relatifs aux explications ont été vraiment étudiés. Une impasse forte a été faite sur l'acquisition des connaissances, leur représentation et leur validation, l'architecture finale ne peut pas être totalement indépendante du domaine applicatif traité. Nous pensons que dans un complexe applicatif complexe comme celui décrit au chapitre 3, la phase d'acquisition des connaissances doit être traitée avant de proposer une architecture du système explicatif. C'est la démarche que nous avons suivie, l'architecture proposée dans ce chapitre est le résultat de l'étude des contraintes du domaine applicatif, de la nécessité d'évolution du système

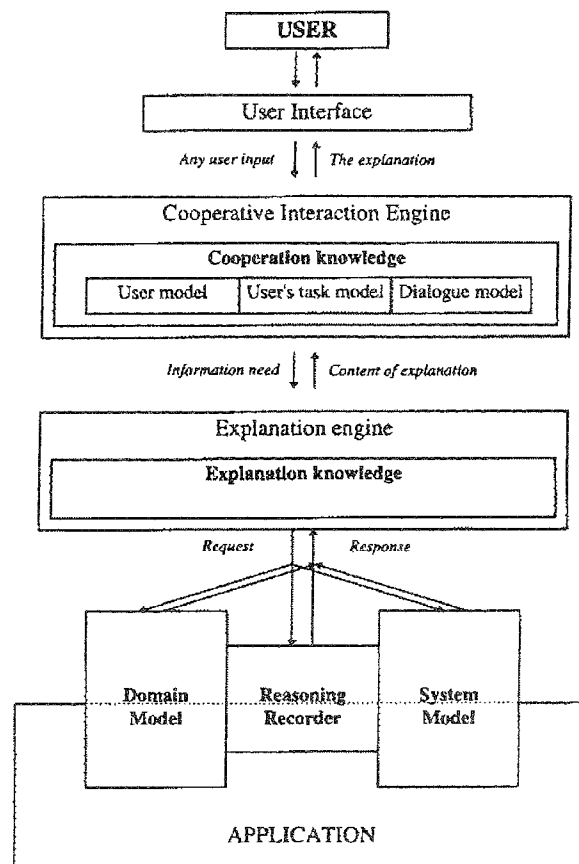


FIG. 6.4 – L'architecture du système ISEE (extrait de [Wickler et al.93])

explicatif et de la structure générale du SBC associé. La proposition d'architecture est la dernière étape du processus de réalisation du système explicatif.

6.1.3 L'architecture du projet Tap-Extra

Le projet décrit ici est plus proche de nos travaux puisqu'il se situe dans le cadre de la conduite de procédés, particulièrement pour la surveillance d'un réseau d'irrigation.

Nous avons déjà décrit le projet Tap-Extra au paragraphe 1.4.7. Le projet ISEE⁴² a d'abord été réalisé, il comprend l'implantation d'un module explicatif, puis il a laissé la place au projet Tap-Extra.

L'architecture globale du système ISEE développé est décrite à la figure 6.4. On y distingue d'un côté l'application et de l'autre l'utilisateur. Les demandes d'explications de l'utilisateur, ainsi que les réponses données, passent par un *moteur de gestion des interactions*, qui utilise un modèle de l'utilisateur, un modèle des tâches et un modèle de dialogue [Wickler et al.93].

Le système explicatif a ensuite été intégré dans le système Tap-Extra, suivant l'architecture présentée à la figure 6.5. Cette architecture montre que les explications construites par le système ISEE sont transmises à l'utilisateur, par l'intermédiaire de l'interface du système ALEPH. Elles sont complètement intégrées au sein de cette interface, comme le montre la figure 6.1.3.

42. *Interaction Self Explaining Engine*

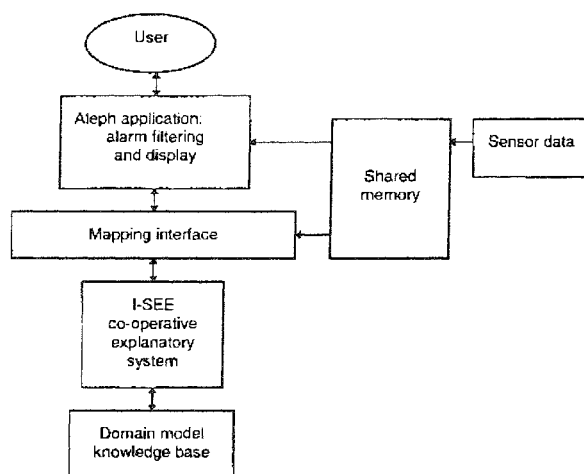


FIG. 6.5 – L'architecture du système Tap-Extra (extrait de [Lambert et al.97c])

Le processus de construction des explications est détaillé à la figure 6.6. Il est principalement regroupé dans deux modules, l'un destiné aux interactions avec l'utilisateur, l'autre à la construction des explications.

L'architecture proposée pour les systèmes ISEE et Tap-Extra est assez simple, la distinction principale réside dans la séparation entre interface homme-machine et construction des explications.

6.1.4 L'architecture multi-agents du système SYNERGIC

Dans le cadre du projet SYNERGIC [Camps et al.93], un agent explicatif a été introduit.

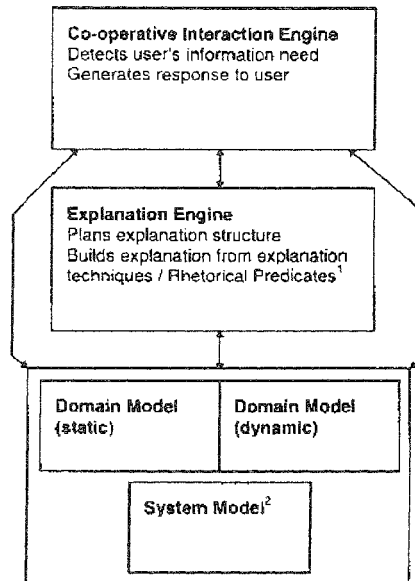
D'après [PB94], la construction des explications par planification en environnement multi-agents n'est pas possible. De façon intuitive, cette solution comporterait un agent chargé de distribuer les tâches en fonction de l'application courante, un autre s'assurant de la cohérence et de la cohésion de l'ensemble des explications recueillies, un troisième (ou plusieurs) gérerait un modèle de l'utilisateur. D'après l'auteur, les difficultés viennent du manque de connaissances explicatives (ou de la difficulté à les recueillir) qui permettent de définir des plans d'explications, de la distribution du savoir et des évolutions de la société (c'est-à-dire des problèmes de gestion des évolutions et de leurs répercussions sur les plans d'explications). « *Les problèmes qui entravent l'explication en univers multi-agents sont l'évolutivité de la société et sa pluridisciplinarité* » [PB94].

L'auteur propose donc le postulat suivant : « *un module de connaissance ne peut contenir que les informations nécessaires à la résolution de problème.* » Ces connaissances guident les changements d'agents expliqués et la construction des explications individuelles ou collectives [PB94].

Un seul agent explicatif est alors introduit. L'agent explicatif travaille indépendamment de la sémantique, sans l'aide de connaissances explicatives.

La figure 6.8 présente les interactions entre l'agent explicatif (AE) au centre et les autres agents de SYNERGIC.

Les questions possibles sont « Pourquoi », « Comment », « Quoi », « Pourquoi Pas », qui correspondent respectivement aux questions « Pourquoi me demande-t'on X? », « Comment



Notes:

1. Rhetorical Predicates are used for structuring the presentation of explanations whose content has been constructed by the explanation techniques.
2. In TAP-EXTRA, the System Model is vestigial, because it is not the purpose of I-SEE to explain the workings of Aleph itself.

FIG. 6.6 – La structure du système Tap-Extra (extrait de [Lambert et al.97c])

a-t-on déduit X? », « A quoi correspond X? » et « Comment a-t-on déduit non-X? ». Cette dernière question n'est pas une explication négative au sens communément admis [PB94].

Les explications proposées reposent beaucoup sur la notion de stratégie explicative. « *L'objectif de la stratégie explicative est de mettre en forme l'ensemble des connaissances explicatives extraites de l'agent module* » [PB94]. Trois stratégies existent : en réponse aux questions « Quoi », « Comment » et « Pourquoi ». La figure 6.9 présente la stratégie de réponse à la question « Comment ».

L'architecture multi-agents correspondant au système explicatif proposée est très simple puisqu'il n'y a qu'un agent explicatif, qui travaille avec les agents du SBC.

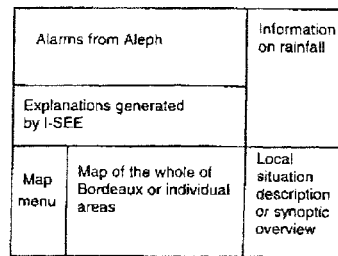


FIG. 6.7 – L'interface homme-machine du système Tap-Extra (extrait de [Lambert et al.97c])

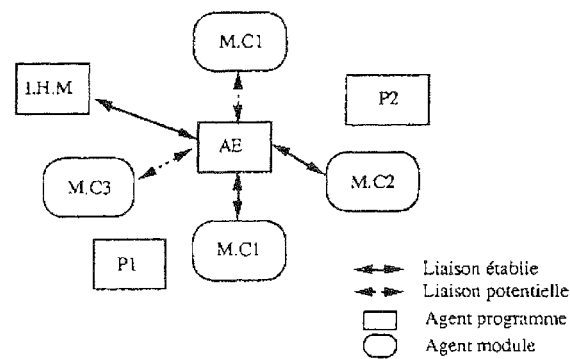


FIG. 6.8 – Communications entre l'agent explicatif et les autres agents du système SYNERGIC (extrait de [PB94])

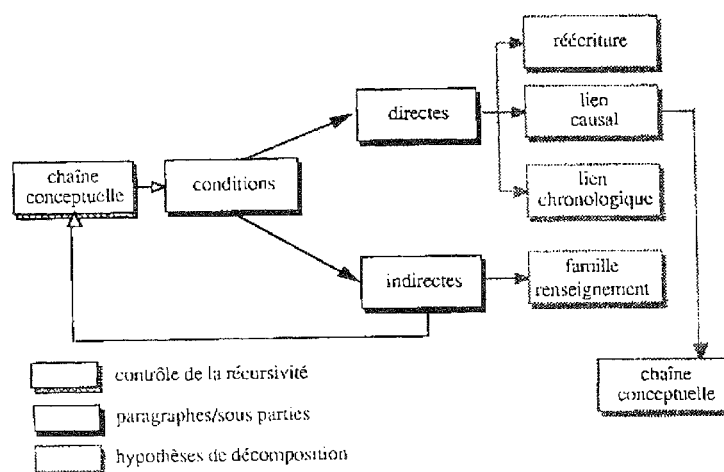


FIG. 6.9 – Stratégie de réponse à la question Comment (extrait de [PB94])

6.2 Les éléments à prendre en compte dans l'architecture

Afin de proposer une architecture répondant aux spécifications décrites dans les chapitres précédents, nous allons nous intéresser aux différents éléments à prendre en compte dans cette architecture. Les bases de données numériques et symboliques, les connaissances expertes et explicatives, puis le modèle de l'utilisateur, s'il existe, seront, tour à tour, analysés.

6.2.1 Les bases de données

Ainsi que nous l'avons mentionné au paragraphe 3.3.1, deux types majeurs d'informations ou de données sont traitées : des données numériques (par exemple : *température fonte = 1550° C*) et des données symboliques (par exemple : *température fonte trop élevée*).

6.2.1.1 Les bases de données numériques

Les caractéristiques du procédé, distinguées au paragraphe 3.1, nous ont permis de comprendre que le procédé est fortement instrumentalisé, avec beaucoup de données. Ces données sont souvent bruitées et peuvent comporter de nombreuses invalidations (par exemple parce qu'une donnée n'est plus valable ou qu'un capteur est hors service). Elles sont transmises par des capteurs, des mesures ou sont entrées directement par certains opérateurs (par exemple pour des valeurs particulière comme des valeur de consignes ou des résultats de mesure spécifique). Elles peuvent concerner, par exemple, la température des parois ou la composition des gaz pour le haut-fourneau, ou le débit des voies d'eau pour le système Tap-Extra.

Ces données numériques sont enregistrées dans une ou plusieurs bases de données et peuvent comporter des mécanismes de vérification ou de validation.

6.2.1.2 Les bases de données symboliques

Des techniques de reconnaissance des formes ou d'analyse des signaux sont ensuite appliquées pour extraire des informations symboliques à partir des données numériques. On utilisera alors, par exemple, des « tendances à la baisse », des « hausses brutales » ou des « irrégularités ». On peut également introduire de nouvelles données calculées à partir des données de base, comme des bilans thermiques, bilans gazeux, bilans des matières, volume global ...

Ces données symboliques sont enregistrées dans une ou plusieurs bases de données qui peuvent être communes avec les bases de données numériques.

6.2.2 Les bases de connaissances

6.2.2.1 Les bases de connaissances du domaine

En plus des données élaborées à partir des valeurs des principaux capteurs, un SBC se base sur des connaissances du domaine. Le choix du formalisme de représentation de ces connaissances dépend, principalement, du contexte de l'application, des connaissances, de leur utilisation future et du degré de contrôle souhaité sur les connaissances. Quel que soit le formalisme adopté, les connaissances doivent être accessibles facilement par les différentes fonctions.

Les connaissances du domaine sont enregistrées dans des bases de connaissances qui peuvent prendre des formes assez différentes en fonction des connaissances codées ou de l'application concernée.

De façon générale, on admettra que les connaissances du domaine sont enregistrées dans une ou plusieurs bases de connaissances. Celles-ci sont généralement distinctes des bases de données numériques et symboliques.

6.2.2.2 Les bases de connaissances explicatives

En complément des connaissances du domaine, les connaissances explicatives concernent directement les explications. Ces connaissances ont été extraites lors de la phase d'acquisition des connaissances explicatives décrite au chapitre 4. Elles sont ensuite structurées ou modélisées. La représentation de ces connaissances est généralement la même que celle des connaissances du domaine, mais certaines particularités sont possibles.

De façon générale, on admettra que les connaissances explicatives sont enregistrées dans une ou plusieurs bases de connaissances. Celles-ci sont généralement distinctes des bases de données numériques et symboliques, elles peuvent être communes avec les bases de connaissances du domaine.

6.2.3 L'éventuel modèle de l'utilisateur

S'il a été possible de prévoir un modèle de l'utilisateur, les informations de modèle doivent être stockées et intégrées. Ce sont généralement (voir les paragraphes 2.6 et 5.1.3) la catégorie de l'utilisateur, ses buts, les connaissances ou concepts qu'il connaît, ceux qu'il ne connaît pas, ses préférences, les informations ou explications qui lui ont déjà été transmises.

De façon générale, on admettra que les informations relatives à un modèle de l'utilisateur et à l'utilisateur effectif sont enregistrées dans une base spéciale.

6.2.4 Les interactions

Toutes ces bases de données ou de connaissances ne sont pas directement reliées entre elles, néanmoins elles peuvent comporter des informations importées ou des liens indirects. Par exemple : les données symboliques sont élaborées avec les données numériques ; des connaissances du domaine peuvent comporter des encarts correspondant aux données numériques en cours ; des connaissances explicatives sont souvent basées sur les connaissances du domaine, etc.

On considérera que toutes ces bases sont indépendantes et que les liens sont établis par des modules spécifiques du SBC ou du système explicatif.

6.3 Proposition d'architecture modulaire

6.3.1 Caractéristiques

En nous inspirant des architectures présentées et de leurs caractéristiques ainsi que des contraintes particulières de notre domaine applicatif, nous pouvons distinguer plusieurs caractéristiques relatives aux activités et aux interactions possibles :

- les explications concernent les données numériques ou symboliques et les connaissances du domaine en utilisant les connaissances explicatives ; les accès aux différentes bases de données et de connaissances sont donc nombreux ;
- les interactions avec l'utilisateur doivent être traitées avec soin ;
- tout ce qui concerne la conception de la vue ou des vues d'explication (génération des objets graphiques, position des schémas et des textes ...) peut être regroupé ;

- les interactions avec le SBC (demande d'explication, interruption) doivent également être prises en compte ;
- la construction des explications est la partie la plus délicate.

Ceci nous conduit à distinguer plusieurs modules ou plusieurs couches correspondant aux différentes phases de la construction des explications. C'est le but de la proposition faite dans le paragraphe suivant.

6.3.2 Structure modulaire

L'architecture de l'environnement des vues d'explication peut être une architecture en trois couches :

- une couche regroupant les modules d'accès aux données et aux connaissances des bases de données numériques (BDN) et symboliques (BDS), des bases de connaissances du métier (BC) et des bases de connaissances explicatives (BCE) ;
- une couche regroupant les mécanismes de construction des explications en fonction de la demande (incluant éventuellement les modifications en fonction d'un modèle de l'utilisateur) ;
- une couche regroupant les modules de traitement de l'interface Homme-Machine : construction des vues d'explication, renseignement de l'ensemble des objets graphiques qui composent les vues à l'aide d'un fichier de paramétrage, traitement des interactions avec l'utilisateur et les autres fonctions (demande d'explication, appel d'une autre vue ...) et production de la fenêtre ou des fenêtres d'explication.

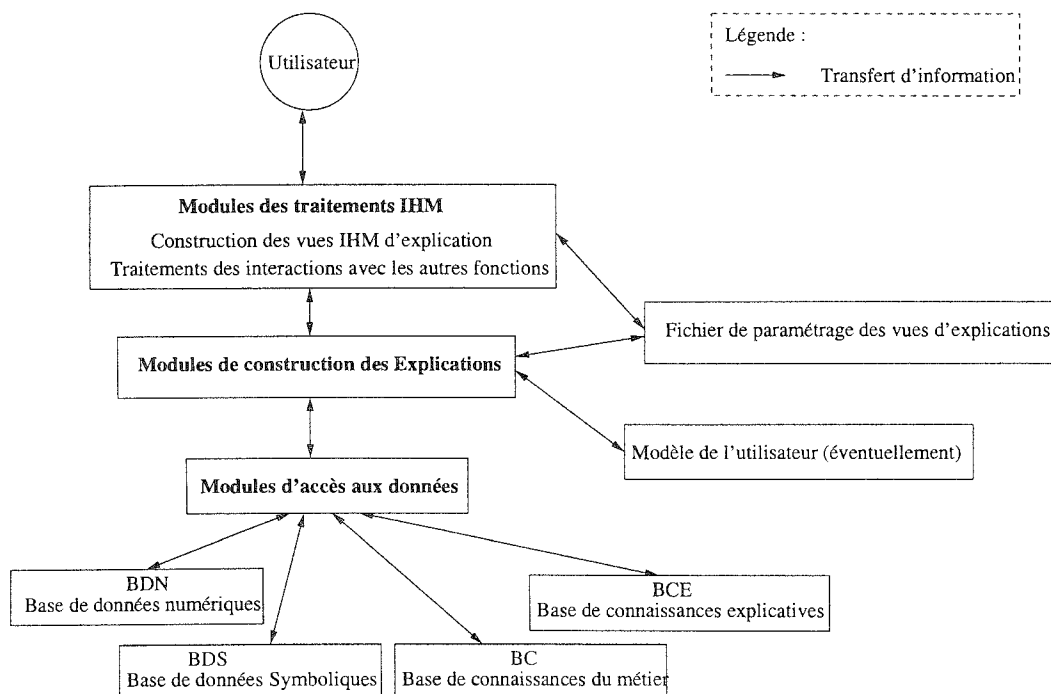


FIG. 6.10 – Architecture modulaire de la fonction d'explication

La figure 6.10 présente ce schéma de regroupement en trois couches. Il est assez classique et permet de séparer les différentes fonctions en fonction de leur rôle dans le processus de construc-

tion des explications.

6.3.3 Modification de l'architecture modulaire

En fonction des modifications dues aux utilisateurs, aux évolutions des connaissances ou du système, la fonction d'explication doit évoluer (voir le paragraphe 5.4 pour la description des évolutions possibles). En ce qui concerne l'impact sur l'architecture, les ajouts, modifications ou suppressions seront faits au sein de la couche ou du module correspondant.

Par exemple, l'adjonction d'un nouveau modèle de prévision pour la fonction de conseil d'action aura des répercussions sur les modules d'accès aux données (1^{re} couche) et éventuellement sur l'explication construite pour intégrer la description et l'utilisation de ce modèle (2^e couche); la mise en valeur d'une partie de l'explication sera faite au sein de la couche regroupant les modules de traitement de l'interface Homme-Machine (3^e couche), etc.

La structure multi-couches est en tout cas assez générale pour ne pas être remise en cause par des modifications portant sur les explications, même des modifications profondes comme l'ajout d'une nouvelle fonction et de son explication locale correspondante, incluant tous les mécanismes de traitement de l'appel de la vue, de la construction des explications et d'accès aux données ou aux connaissances de base.

6.4 Vers une proposition d'architecture multi-agents

Il est possible d'utiliser le paradigme multi-agents pour proposer une architecture globale de la fonction d'explication. Cette technique permet d'avoir une proposition qui soit un peu plus générale et plus adaptable aux éventuelles modifications de la fonction.

6.4.1 Rappel sur la définition d'un agent

Selon la définition établie par le groupe IAD-SMA⁴³ du PRC-IA⁴⁴, un agent peut être défini ainsi [Ferber95] :

Définition 6.4.1 Agent *un agent est une entité autonome qui poursuit un objectif individuel, qui est apte à agir sur l'environnement du système auquel il appartient et/ou à interagir avec les autres agents, qui ne dispose que d'une représentation évolutive de cet environnement et qui peut percevoir d'autres agents.*

6.4.2 Les principales contraintes

Afin de choisir au mieux une architecture multi-agents adaptée à notre problème, nous allons lister les principales contraintes pour l'implantation d'une fonction d'explication dans un système d'aide à la conduite d'un procédé complexe :

- l'accès aux explications se fait depuis le SBC,
⇒ lien fort avec le SBC ;
- l'accès est *typé*, c'est-à-dire que selon la fonction dans laquelle se trouve l'utilisateur (les quatre grandes fonctions Détection, Etat du procédé, Diagnostic et Conseil d'action), on donnera des explications différentes. On peut parler de type d'explication différent en fonction de l'accès,

43. Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents

44. Pole de Recherche Concerté en Intelligence Artificielle du ministère de la recherche

- ⇒ il faut envisager des explications différentes. On peut supposer que l'on sait à quel agent adresser la demande de construction d'une explication. Les mécanismes de négociation ne semblent donc pas indispensables ;
- chaque explication donnée est fonction du point d'appel, la structure est différente mais les mécanismes de construction ou de composition peuvent être les mêmes pour toutes les explications. On peut ainsi parler de « *moteur intelligent d'explication paramétrable* » en faisant l'analogie avec le moteur d'inférence d'un système à base de règles,
 - ⇒ on peut mettre en commun les mécanismes de construction ou de composition d'une explication ;
- la structure d'une explication est différente pour chaque explication locale. Au sein de chaque élément d'une explication, on connaît sa structure interne,
 - ⇒ on sait également à quel agent adresser la demande de renseignement de chaque partie d'une explication ;
- il doit être possible d'adapter la structure d'une explication si on modifie un élément, si on ajoute un nouvel élément ou si on supprime un élément. Les explications doivent aussi prendre en compte la taille de chaque élément en fonction des données (au sens large, c'est-à-dire tous les éléments composant cet élément) réellement disponibles à l'instant présent (voir le paragraphe 5.4.4 avec la description des trois possibilités envisagées pour adapter la fonction d'explication),
 - ⇒ il faut prévoir un mécanisme de réorganisation des vues pour prendre en compte les modifications et les adapter à la taille des différentes réponses ;
- les activités de conception d'une vue d'explication requièrent plus d'*intelligence* que les activités d'accès aux données, ces dernières étant les plus simples,
 - ⇒ les différents agents n'auront donc pas le même niveau de cognition. On peut soit imaginer une société avec des agents de capacités différentes, soit une société hiérarchisée en fonction de l'*intelligence* des différents agents ;
- chaque explication peut faire appel à une ou plusieurs des fonctions du SBC.

Plutôt que de s'orienter, comme dans [PB94], vers un seul agent explicatif qui communique avec tous les agents du système, nous pensons qu'il est préférable de créer plusieurs agents possédant des tâches et des capacités différentes. En créant plusieurs agents, nous espérons diviser la complexité de la tâche de conception des explications (cette complexité a été évoquée dans le chapitre 2). Chaque agent aura pour objectif de s'occuper d'une partie de la tâche, ce peut être une partie difficile ou d'une partie ne nécessitant pas de capacités cognitives importantes.

Les implications précédentes des caractéristiques de la fonction d'explication nous permettent d'envisager plutôt une société hiérarchisée en fonction des capacités des différents agents. Ce choix nous éloigne un peu des systèmes multi-agents habituels, mais présente l'avantage d'être plus simple à implanter, à entretenir et à faire évoluer. Rappelons que notre but n'est pas de créer un système multi-agents mais d'utiliser les qualités de l'intelligence artificielle distribuée pour notre problème de construction des explications.

Une fois identifiée une structure plutôt hiérarchisée avec plusieurs agents, il faut réfléchir aux tâches que l'on assignera à chaque agent. Il semble intéressant de centraliser toutes les tâches communes et de distribuer les autres tâches à des agents spécifiques.

6.4.3 Proposition d'architecture multi-agents

Nous avons détaillé au paragraphe précédent les principales contraintes imposées par le contexte de notre problème et les grandes lignes de la structure qu'il était possible de réali-

ser. Nous allons maintenant proposer une architecture répondant aux caractéristiques énoncées.

Pour répondre aux contraintes énoncées ci-dessus nous proposons une structure multi-agents hiérarchique à quatre niveaux. La société proposée est volontairement simple pour pouvoir s'adapter facilement. Une société comportant des interactions entre la plupart des agents et des coopérations importantes à tous niveaux est beaucoup plus difficile à étendre et à modifier. C'est pourquoi nous proposons que les coopérations entre agents soient réduites et *a priori* déterminées à l'avance.

Ce choix de proposer une structure SMA « *simple* » (c'est-à-dire avec des rapports sociaux peu complexes) est discutable mais nous rappelons que le but n'est pas de réaliser, coûte que coûte, une architecture multi-agents et d'utiliser toute la complexité de cette technique, mais bien de montrer qu'il est possible d'utiliser le paradigme multi-agents, pour proposer une architecture réaliste de l'implantation d'une fonction d'explication.

Voici la structure générale des différents niveaux (voir aussi la figure 6.11) :

1. Le niveau supérieur ne comprend qu'un seul agent. Il **reçoit** une demande d'explication locale ou globale, **transmet** la demande, ainsi que les données utiles aux agents du niveau inférieur, **réorganise** les demandes et **compose** la vue ou les vues d'explication à afficher ;
2. au deuxième niveau, on trouve les quatre agents correspondant aux quatre explications locales et l'agent correspondant à l'explication globale. La mission de ces agents est de rassembler les différents éléments permettant de construire l'explication demandée. Ils doivent également transmettre des extensions possibles pour chacune des parties de leur explication pour permettre à l'agent de composition d'adapter le contenu en fonction de la place ;
3. ce niveau regroupe des agents spécifiques correspondant aux différentes parties des explications. Chaque agent du niveau supérieur fait appel à ces agents spécifiques ;
4. le dernier niveau de la hiérarchie rassemble les agents qui accèdent aux données (correspondant à la couche la plus basse de l'architecture classique). Leur mission est donc de chercher le texte, l'image ou le son correspondant au morceau d'explication, de le compléter, éventuellement, avec d'autres données et de renvoyer la réponse.

6.4.3.1 Niveau supérieur

Le niveau supérieur ne comprend qu'un agent, l'agent de composition : `exn_Composition`. Cet agent

- **reçoit** une demande d'explication locale ou globale, voire une demande d'explication synthétique et les données permettant de retrouver les informations nécessaires (type de la demande, données propres à la demande, problème local, date ...)
- **transmet** la demande d'explication à un ou plusieurs des cinq agents du niveau inférieur en fonction de la demande, ainsi que les données utiles,
- **réorganise** en fonction de la demande les différentes réponses obtenues pour accorder de la place à chaque élément en fonction des priorités définies par le type de la demande,
- et **compose** la fenêtre d'explication.

6.4.3.2 Niveau des explications locales

Ce niveau rassemble les agents correspondant aux explications locales et à l'explication globale, soit les agents `exn_Détection`, `exn_Etat_Présent`, `exn_Diagnostic`, `exn_Action`, `exn_Globale`.

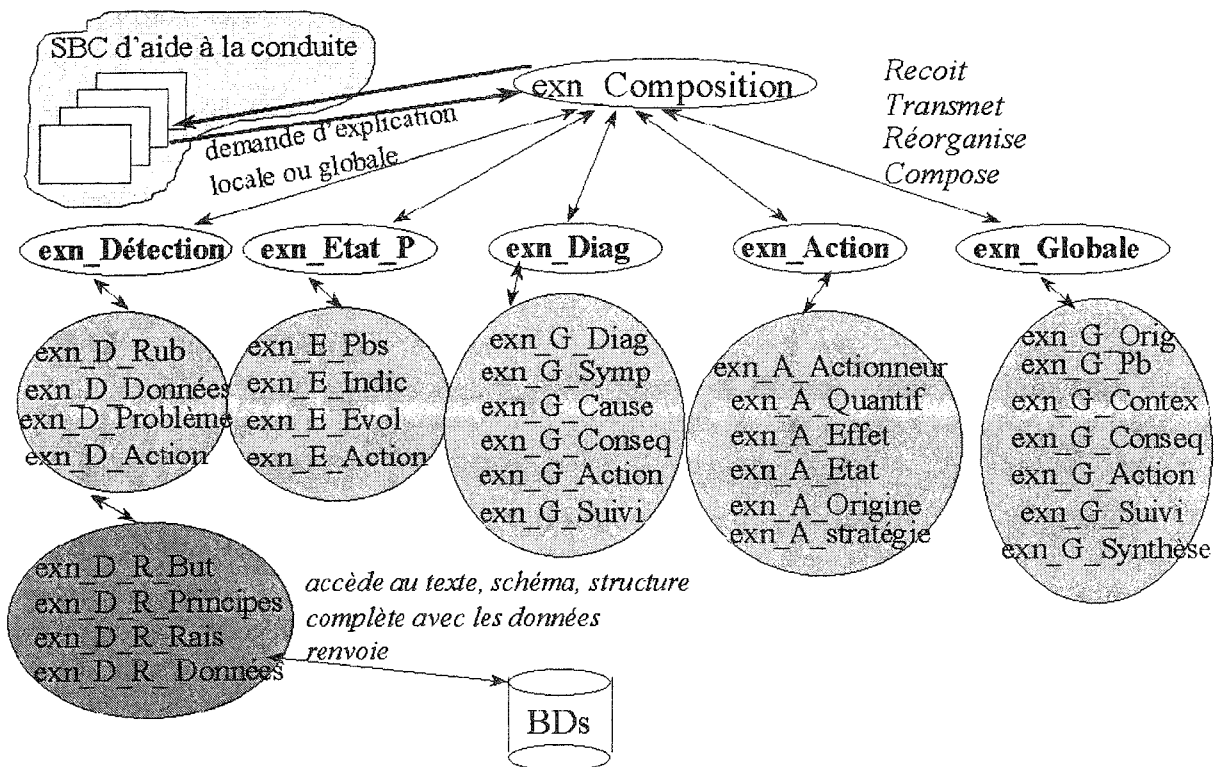


FIG. 6.11 – Architecture multi-agents de la fonction d'explication

Leur mission est de rassembler les différents éléments permettant de construire l'explication demandée.

Ils doivent également transmettre les possibilités d'extensions pour chacune des parties de leur explications. Les différentes possibilités seront choisies par l'agent *exn_Composition* afin d'adapter le contenu transmis, en fonction de la place disponible. Ainsi, si beaucoup d'informations importantes sont transmises à l'agent de composition, celui-ci sera plus sélectif et accordera une place réduite à chaque information. En revanche, il est possible de donner plus d'informations, si la vue d'explication est peu chargée.

6.4.3.3 Niveau des agents spécifiques

Ce niveau regroupe les agents spécifiques qui doivent composer les différentes parties des explications. Chaque agent de ce niveau est en charge d'une partie d'une explication qui lui est demandée par un agent du niveau supérieur.

Les différents agents correspondent aux parties détaillées dans les paragraphes 5.3.4.2, 5.3.4.3, 5.3.4.4 et 5.3.4.5.

Les différents agents de ce niveau peuvent être :

- *exn_D_Rubrique*, *exn_D_Données*, *exn_D_Problème*, *exn_D_Action* pour les explications locales à la détection,
- *exn_E_Problèmes*, *exn_E_Indicateurs*, *exn_E_Evolution*, *exn_E_Action* pour les explications locales à l'Etat du procédé,

- `exn_C_Diagnostic`, `exn_C_Symptome`, `exn_C_Cause`, `exn_C_Conséquence`, `exn_C_Action`, `exn_C_Suivi` pour les explications locales au Diagnostic,
- `exn_A_Actionneur`, `exn_A_Quantification`, `exn_A_Effet`, `exn_A_Etat`, `exn_A_Origine`, `exn_A_Stratégie` pour les explications locales au conseil d'action,
- `exn_G_Origine`, `exn_G_Probleme`, `exn_G_Contexte`, `exn_G_Conséquence`, `exn_G_Action`, `exn_G_Suivi`, `exn_G_Synthèse` pour les explications globales.

Les agents `exn_D_X` correspondent aux agents de la fonction de détection, les agents `exn_E_X` concernent la fonction d'état du procédé, les agents `exn_C_X` concernent la fonction de diagnostic, les agents `exn_A_X` sont spécifiques à la fonction de conseil d'action et les agents `exn_G_X` sont appelés par la fonction d'explication globale basée sur un niveau synthétique. Nous avons donc identifié vingt-sept agents différents à ce niveau.

6.4.3.4 Niveau inférieur des agents accédant aux données

Le dernier niveau de la hiérarchie rassemble les agents qui accèdent aux données. Il correspond à la couche la plus basse de l'architecture classique.

La mission des agents de ce niveau est de chercher le texte, l'image ou le son correspondant au morceau d'explication, de le compléter avec, éventuellement, d'autres données ou d'autres connaissances et de renvoyer la réponse à l'agent demandeur. Il transmet un échec si les ressources sont insuffisantes (c'est-à-dire si les données demandées sont non accessibles).

Pour chaque agent du niveau supérieur, un ou plusieurs agents s'occupent de traiter différentes parties du texte. Pour chacun des vingt-sept agents du niveau supérieur, il existe généralement deux ou trois, voire quatre ou cinq agents de ce niveau chargés chacun de la réalisation complète d'un morceau de texte. Il y a donc entre cinquante et cent agents à ce dernier niveau de la hiérarchie.

Vu le nombre total d'agents possibles à ce niveau, nous ne les détaillerons pas tous. Par exemple, l'agent `exn_D_Rubrique` utilise les agents `exn_D_R_But`, `exn_D_R_Principe`, `exn_D_R_Raisonnement`, `exn_D_R_Données`. Le premier correspond au but de la rubrique, le deuxième aux principes majeurs employés, le troisième aux raisonnements utilisés et le quatrième aux données traitées dans la rubrique.

6.4.4 Caractéristiques de l'architecture multi-agents proposée

D'après [Ferber95], nous pouvons distinguer les caractéristiques suivantes, habituellement utilisées en SMA, appliquées sur notre proposition d'architecture multi-agents :

- **type de la société** : c'est une société hiérarchique à quatre niveaux.
- **négociation** : dans la forme actuelle, il n'y a pas de négociation, chaque agent sait à l'avance à qui confier la tâche à réaliser,
- **compatibilité des buts** : les buts sont compatibles,
- **ressources** : les ressources correspondent aux données des différentes bases auxquelles accèdent les agents du quatrième niveau. Ces ressources peuvent être disponibles (c'est-à-dire ressources suffisantes) ou indisponibles (c'est-à-dire ressources insuffisantes),
- **compétences** : *a priori* chaque agent possède les compétences requises pour réaliser la tâche qui lui est confiée,
- **type d'interaction** : les interactions sont de type coopération (collaboration simple ou indépendance),

- **autonomie** : en général, les agents ne sont pas autonomes (ils nécessitent les compétences d'un autre agent),
- **localité des tâches** : les tâches sont locales et envoyées directement à un agent.

6.4.5 Modification de l'architecture multi-agents

Ainsi que nous l'avons vu au paragraphe 5.4, les explications doivent être toujours en adéquation avec les attentes des utilisateurs et doivent, pour cela, s'adapter. En fonction des modifications dues aux utilisateurs, aux évolutions des connaissances ou du système, la fonction d'explication doit évoluer. En ce qui concerne l'impact sur l'architecture, les ajouts, les modifications ou les suppressions seront faits au sein des différents agents correspondants, dans chaque niveau de la structure

Ainsi l'adjonction d'un nouveau modèle de prévision pour la fonction de conseil d'action pourra être intégrée dans les agents **exn_A_Quantification**, **exn_A_Effet** (qui correspondent à la quantification proposée pour le conseil d'action et à l'effet attendu de ce conseil) et les agents du niveau inférieur auxquels ces deux-ci accèdent. En revanche, la mise en valeur d'une partie de l'explication ne modifiera que l'agent **exn_Composition** qui s'occupe de la composition finale de l'explication à transmettre.

Ainsi que nous l'avons déjà mentionné, l'architecture proposée au paragraphe 6.4 est simple et comporte peu de coordination (pas de coordination entre les agents d'un même niveau), elle pourra donc être étendue ou modifiée simplement. On pourra, par exemple, intégrer un nouvel agent très rapidement.

6.4.6 Généralisation de l'architecture multi-agents

Nous sommes conscient du caractère simple de la société proposée, mais nous avons souhaité proposer une structure simple pour que celle-ci soit efficace et adaptable. Néanmoins, ceci ne nous empêche pas de réfléchir à la généralisation de cette architecture.

Plusieurs possibilités d'extension s'offrent à nous. Celles-ci peuvent être choisies lorsque l'extension se révèle nécessaire pour résoudre un problème précis. Ces possibilités sont plutôt mentionnées comme des pistes de généralisation de l'architecture multi-agents. Elle mériteraient d'être retravaillées et validées sur une application de conduite de procédés.

6.4.6.1 Introduire des interactions entre les agents d'un même niveau

Nous avons choisi une structure hiérarchique ne permettant pas les interactions entre des agents d'un même niveau. Si nous remettons ce choix en question, nous pouvons alors supposer que les agents feront appel les uns aux autres pour la réalisation d'une explication.

Par exemple, considérons une demande d'explication locale aux résultats de détection transmise par l'agent **exn_Composition** à l'agent **exn_Détection**. Plutôt que de demander aux quatre agents dépendant de sa demande que sont les agents **exn_D_Rubrique**, **exn_D_Données**, **exn_D_Problème**, **exn_D_Action** de réaliser chacun une partie de son explication, il s'occupera de ce qu'il sait réaliser, dans notre cas la rubrique, les données traitées et les problèmes en cours et transmettra la demande concernant des éléments pour l'action à l'agent **exn_Action**. Celui-ci, en fonction des résultats du SBC, répondra par un *bon conseil* (c'est-à-dire un conseil d'action statique ne dépendant pas du contexte, comme : *dans le cas d'un garni, deux actions sont possibles ...*) ou par une explication d'un conseil d'action, s'il en existe un.

L'architecture comporte donc toujours quatre niveaux hiérarchiques, en fonction des compétences des agents, mais les agents ne dépendent plus directement d'un seul agent demandeur, ils

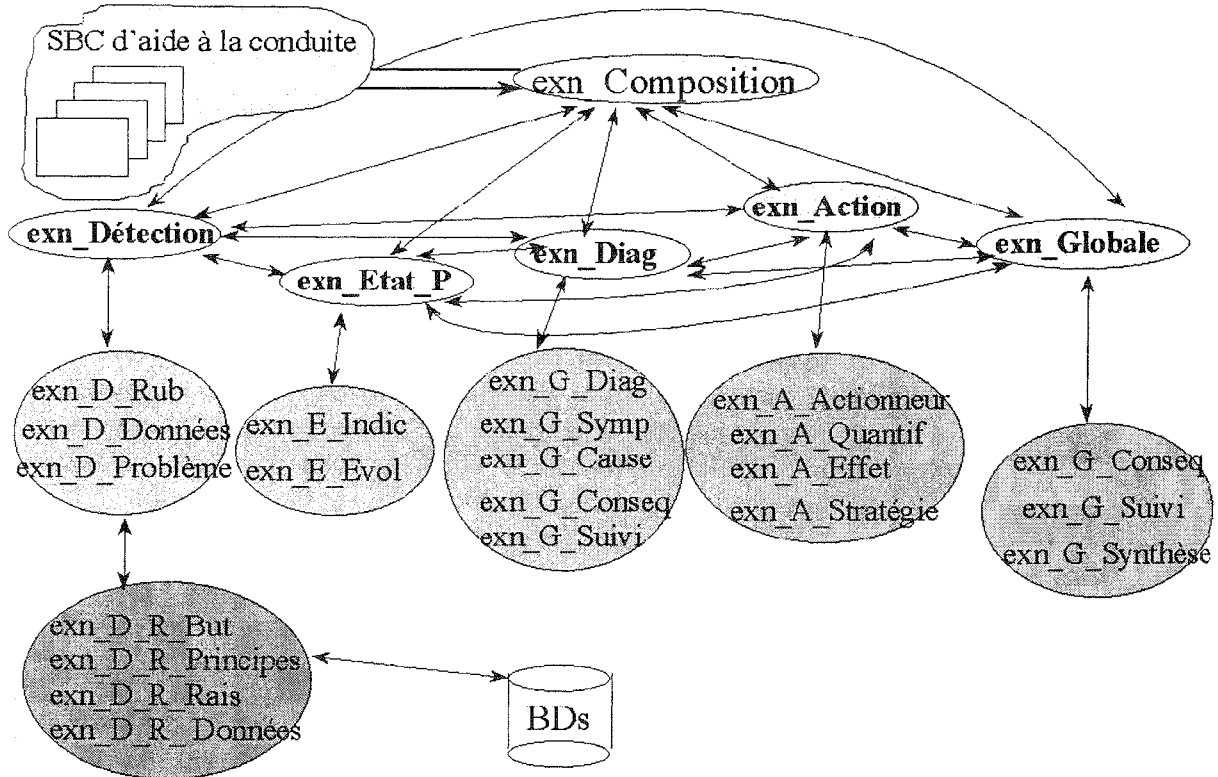


FIG. 6.12 – Architecture multi-agents étendue de la fonction d'explication

peuvent être sollicités par plusieurs agents. De plus, les interactions entre des agents d'un même niveau sont dorénavant possibles.

La figure 6.12 présente cette architecture étendue. Elle est établie à partir de la figure 6.11. Sur cette architecture, certains agents des niveaux 3 et 4 ont été supprimés, car ils sont remplacés par les agents des niveaux 2 qui transmettront directement cette demande. Cette extension permet donc de diminuer le nombre des agents, mais elle complexifie néanmoins la structure globale puisque de nombreuses interactions sont maintenant possibles. Comme dans tout problème d'intelligence artificielle, nous retrouvons la nécessité de faire des compromis : des interactions simples mais des agents nombreux ou moins d'agents mais une gestion plus difficile des interactions !

6.4.6.2 Permettre la négociation entre les agents

Les mécanismes de négociation entre agents sont classiques en Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). Pour notre problème de conception d'une explication, l'idée serait que l'agent de composition *exn_Composition* transmette la demande d'explication aux agents des explications locales et globales. En fonction de leurs capacités et de leurs disponibilités, ceux-ci répondent alors, soit qu'ils ne peuvent pas répondre à la demande, soit qu'ils peuvent y répondre en partie, soit qu'ils peuvent y répondre entièrement. L'agent demandeur choisit alors l'agent ou les agents qui vont permettre de répondre à la demande et établit un *contrat* avec eux.

Cependant, permettre la négociation est délicat, puisqu'avec cette négociation apparaît un grand problème des systèmes multi-agents : les conflits. La gestion des conflits entre agents est

délicate, de nombreux travaux se sont portés sur cette question.

Cette négociation pourrait être utile à introduire lorsqu'un agent ne sait pas répondre à une demande d'explication. Il se tournerait alors vers d'autres agents.

6.4.6.3 Permettre la réorganisation de la société

En faisant le parallèle avec une société (d'individus ou de fourmis), la société d'agents peut avoir à se réorganiser en fonction des capacités et des disponibilités des agents ou en fonction des problèmes à traiter.

La réorganisation se base souvent sur les interactions entre les différents agents. On peut réorganiser de façon structurelle la société dans son ensemble (on changera alors l'organisation, par exemple dans notre cas, on passera d'une société hiérarchique à une société non hiérarchique), ou évaluer toutes les interactions entre les agents et renforcer ou affaiblir les liens en fonction de ces interactions. Les agents interagiront alors de préférence avec certains agents plutôt qu'avec d'autres.

C'est dans cette deuxième direction, renforcement ou affaiblissement des préférences, que l'on peut envisager une extension de notre architecture. La première possibilité semble beaucoup plus difficilement réalisable.

Conclusion

Nous nous sommes penchés, dans ce chapitre, sur l'architecture logicielle du système explicatif. Pour cela, les contraintes imposées par le contexte de l'aide à la conduite de procédés complexes ont, tout d'abord, été analysées à l'aide du chapitre 3. Après avoir détaillé quelques exemples d'architecture de système explicatif extraits de la littérature, nous nous sommes attachés à proposer une architecture logicielle. Notre proposition correspond aux structures des explications détaillées au chapitre 5.

A la lumière des exemples d'architectures étudiées et compte tenu du contexte de notre travail, nous avons proposé une architecture modulaire structurée en trois niveaux : (1) accès aux données et connaissances, (2) construction des explications et (3) gestion de l'interface et des interactions avec le système et les autres fonctions.

Cette architecture répondait au besoin demandé mais n'était pas complètement satisfaisante en ce qui concerne ses possibilités d'évolution et de généralisation. Nous avons alors cherché à tirer profit de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) pour proposer une architecture multi-agents. L'architecture proposée est une structure hiérarchique à quatre niveaux : (1) le niveau de conception de l'explication recevant la demande d'explication, (2) le niveau des explications locales aux fonctions du système et de l'explication globale, (3) le niveau de construction des différentes parties de l'explication structurée et (4) le niveau des agents qui accèdent aux données et aux connaissances pour construire les morceaux de texte ou de schémas.

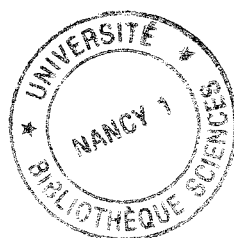
La proposition d'architecture multi-agents ne comporte, volontairement, que des rapports sociaux simples « demande/fourniture » pour qu'elle puisse être utilisable sur tout procédé et facilement évolutive. Elle peut être étendue facilement si le SBC est construit en même temps que le système explicatif, être remise en cause sans que sa structure d'ensemble soit modifiée, ou permettre la modification de la structure des explications.

Nous avons également cherché de quelle manière il était possible d'étendre notre architecture multi-agents pour répondre à des demandes d'explications plus complexes. Nous sommes alors revenus sur notre première hypothèse et nous avons proposé d'introduire des interactions entre les agents d'un même niveau pour améliorer les réponses. Nous avons ensuite pensé introduire

les mécanismes de négociation entre les agents et la réorganisation du système sur la base des interactions entre les différents agents.

Comme nous l'avons vu, il est possible de réaliser la fonction d'explication à l'aide d'un système multi-agents. Cette solution est particulièrement intéressante lorsque le SBC est lui-même un système multi-agents. Néanmoins, il n'apparaît pas probant de réaliser la fonction d'explication sous forme multi-agents lorsque le système n'est pas implanté de cette façon. Cette utilisation des techniques multi-agents a également permis d'améliorer la modularité de l'architecture logicielle. La structure hiérarchique obtenue peut également être implantée avec une représentation par objets, habituellement efficace pour représenter les hiérarchies.

Les architectures proposées permettent de réaliser le système explicatif décrit dans les chapitres précédents. Nous allons maintenant nous pencher, dans le chapitre suivant, sur un problème d'une nature un peu différente : est-ce que la fonction d'explication peut aider à la capitalisation des connaissances stratégiques ?



Chapitre 7

Une fonction d'explication, un outil du processus de capitalisation de connaissances

Sommaire

7.1 Définitions	132
7.1.1 Capitalisation des connaissances et <i>knowledge management</i>	132
7.1.2 Objectif de la capitalisation des connaissances	133
7.1.3 Connaissances manipulées	134
7.2 Les étapes principales de la capitalisation des connaissances	134
7.2.1 D'après Dieng et alii : détecter, construire, diffuser, utiliser, évaluer et maintenir	134
7.2.2 D'après Wolf : construire, rendre accessible, vérifier, présenter et traiter le facteur humain	135
7.2.3 D'après Grundstein : repérer, préserver, valoriser et actualiser	135
7.2.4 Les points communs	136
7.3 La fonction d'explication comme outil de la capitalisation de connaissances	136
7.3.1 Repérer	136
7.3.2 Préserver	137
7.3.3 Valoriser	138
7.3.4 Actualiser	138
7.3.5 Evolution cyclique	138

Introduction

Expliquer, c'est faire comprendre les informations données, c'est améliorer l'intégration de nouvelles connaissances. Expliquer participe donc au but de capitalisation de connaissances d'une entreprise.

D'après nos discussions avec messieurs Grundstein et Barthès au sein de l'IIIA⁴⁵, la différence entre les informations et les connaissances dépend de l'interprétation faite par les utilisateurs. Une information devient une connaissance lorsqu'elle est *intégrée* par l'utilisateur. Le but des

45. Institut International pour l'Intelligence Artificielle, <http://www.hds.utc.fr/~iiaa/index.html>

explications est justement l'amélioration du passage de l'état d'information à celui de connaissance grâce à la compréhension des informations données. Aussi, nous pensons que la fonction d'explication est une fonction clé pour les systèmes à bases de connaissances dans l'objectif de capitaliser les connaissances stratégiques d'une entreprise.

Dans ce chapitre, nous définirons tout d'abord la capitalisation de connaissances, par rapport au terme également employé de « *knowledge management* », et ses objectifs majeurs. Nous verrons ensuite trois définitions différentes du cycle de capitalisation de connaissances de l'entreprise. Ces définitions sont très proches comme nous le mentionnons au paragraphe 7.2.4. Puis, nous essaierons de montrer que la mise en place de la fonction d'explication peut être considérée comme un véritable projet de capitalisation de connaissances. Pour cela, nous reprendrons la définition la plus générale du cycle de développement d'une mémoire d'entreprise, parmi celles décrites, en quatre étapes majeures. Nous détaillerons chaque étape en positionnant les différentes activités relatives à la construction d'un système explicatif, qui ont été détaillées dans les chapitres précédents de cette partie.

Néanmoins, il est évident qu'un système explicatif ne peut pas constituer, à lui seul, un projet de mémoire d'entreprise. En complétant un SBC réalisé et avec l'aide d'un didacticiel, d'un document synthétique contenant l'expertise du métier, d'un manuel utilisateur, d'une fonction d'aide en ligne et de la formation des utilisateurs, il est, en revanche, possible de réaliser une mémoire d'entreprise adaptée à la conduite de procédés complexes.

7.1 Définitions

Nous allons premièrement définir les termes majeurs relatifs au domaine de la capitalisation de connaissances.

7.1.1 Capitalisation des connaissances et *knowledge management*

La capitalisation des connaissances vient du domaine de l'organisation d'entreprise et de la gestion d'entreprise, mais de nombreux problèmes importants peuvent être traités grâce aux travaux relatifs aux systèmes d'information [Reimer98].

Pour M. Grundstein, « *capitaliser les connaissances de l'entreprise, c'est considérer les connaissances utilisées et produites par l'entreprise comme un ensemble de richesses constituant un capital, et en tirer des intérêts contribuant à augmenter la valeur du capital* » [Grundstein96].

Pour JP. Barthès, la traduction du terme « capitalisation des connaissances » correspond en anglais au terme « *knowledge management* » [Barthes98]. C'est alors une notion dynamique, un capital de connaissance qui doit travailler. Mais cette traduction n'est pas toujours acceptée, certains auteurs préfèrent parler de « management des connaissances » pour exprimer la notion de dynamique sur les connaissances.

On parle également de « mémoire d'entreprise » ou en anglais de « *corporate memory* », comme dans [Dieng et al.98] ou [Simon96]. Ce terme de « mémoire d'entreprise » est très proche, on considère habituellement que la réalisation d'une mémoire d'entreprise est un projet de capitalisation des connaissances.

Ainsi que l'a mentionné Jean-Paul Barthès, « *la capitalisation des connaissances n'est pas un phénomène récent. Depuis toujours, les entreprises humaines utilisent l'expérience acquise pour progresser. La nouveauté est la prise de conscience qu'une meilleure utilisation des connaissances peut avoir des conséquences économiques au moins aussi importantes que l'optimisation de l'environnement matériel de production, ce qui toutefois n'est pas encore reconnu dans la vision comptable de l'entreprise* » [Barthes98].

D'après Stevens, « *les économies de l'OCDE s'appuient de plus en plus sur le savoir et l'information. Le savoir est désormais reconnu comme moteur de la productivité et de la croissance économique* » [Stevens96].

En résumé, la capitalisation de connaissances est un thème important, largement traité actuellement par des conférences regroupant des gestionnaires, des spécialistes de l'organisation, des sociologues, des informaticiens, des cognitivistes et des industriels.

7.1.2 Objectif de la capitalisation des connaissances

Le but de la capitalisation des connaissances est de « *localiser et rendre visible la connaissance de l'entreprise, être capable de la garder, l'accéder et l'actualiser, la diffuser pour mieux l'utiliser, la mettre en synergie et la valoriser* » [Grundstein95]. Car « *une entreprise n'est pas seulement une unité de production de biens et de services répondant aux attentes des clients dans les meilleures conditions de coût, de délais et de qualités, mais c'est aussi une unité de production de connaissance* » [Grundstein95].

Les motivations de la capitalisation des connaissances peuvent être diverses d'après [Dieng et al.98] :

- éviter la perte de savoir-faire d'un spécialiste après son départ ou sa mutation,
- exploiter la connaissance acquise des projets passés et tirer parti des leçons du passé pour éviter de reproduire certaines erreurs,
- exploiter la carte des connaissances de l'entreprise pour la stratégie d'entreprise,
- améliorer la circulation d'information et la communication dans l'entreprise,
- améliorer la formation des employés de l'entreprise,
- intégrer les différents savoir-faire d'une organisation.

La nature de la connaissance utile et les efforts demandés pour construire un projet de capitalisation de connaissances dépendent de la taille de l'entreprise (PME/PMI ou grands groupes).

Pour réussir à intégrer une approche de capitalisation de connaissances à long terme dans une entreprise, il est nécessaire d'être ambitieux sur le long terme mais de commencer par de petites étapes [Jooste et al.96].

Par exemple, une étude d'un institut public norvégien, a été faite, basée sur vingt petites entreprises norvégiennes. Elle avait pour but de développer une méthode pour l'analyse de compétences dans de petites entreprises. Elle a permis de tirer les cinq leçons suivantes pour la capitalisation de connaissances dans les PME/PMI [Skaret97] :

1. la création et l'utilisation de la connaissance doivent être liées aux revenus à court terme et à long terme (la relation entre les connaissances et les revenus est de nature dynamique),
2. il ne faut pas essayer d'analyser ou de gérer toutes les connaissances,
3. l'analyse des connaissances doit être orientée par le processus, c'est-à-dire qu'il faut combiner les connaissances individuelles et développer un modèle mental partagé des connaissances de l'organisation, (il faut prendre en compte l'application car l'évolution de l'entreprise dépend de la stratégie de développement, mais aussi de l'évolution des technologies, de la chance, du moment d'arrivée sur le marché, des concurrents ...),
4. les connaissances collectives sont sous-évaluées,
5. les connaissances distinctives (celles qui font qu'une entreprise est unique sur son marché) sont liées à la culture de l'entreprise.

7.1.3 Connaissances manipulées

Les connaissances manipulées sont constituées d'éléments tangibles (bases de données, procédures, plans, modèles, algorithmes, documents d'analyse et de synthèse) et d'éléments immatériels (habiletés, tours de mains, secrets de métiers, routines, connaissances de l'historique et des contextes décisionnels) [Grundstein96].

On distingue également les savoirs et savoir-faire, les connaissances tacites et explicites, hétérogènes ou homogènes, réparties ou localisées, exprimables ou informelles, les actifs tangibles ou intangibles ...

Toutes ces catégories correspondent à la même distinction entre ce qui est du savoir explicite exprimable et du savoir tacite ou savoir-faire propre à chaque individu. C'est cette deuxième catégorie, le savoir-faire, qui peut particulièrement permettre l'innovation dans l'entreprise.

7.2 Les étapes principales de la capitalisation des connaissances

Le but de ce paragraphe est de décrire les différentes étapes d'un projet de capitalisation des connaissances, de *knowledge management* ou de mémoire d'entreprise. Pour cela, nous décrivons trois cycles de réalisation possibles, présentant de nombreux points communs, extraits de plusieurs travaux du domaine.

7.2.1 D'après Dieng et alii : détecter, construire, diffuser, utiliser, évaluer et maintenir

Dans [Dieng et al.98] ou [Dieng98], les auteurs ont adapté les travaux antérieurs de Nonaka et considèrent la construction de la mémoire d'entreprise à partir des six étapes suivantes :

1. **Détection des besoins en mémoire d'entreprise :** la première, mais difficile, tâche du concepteur de mémoire d'entreprise est de détecter les besoins réels des utilisateurs et les besoins réels de mémoire d'entreprise. On peut se baser sur des modèles d'entreprise, des modèles des activités individuelles ou collectives dans l'entreprise, des travaux tirés du travail coopératif par ordinateurs (*CSCW*⁴⁶), des approches centrées utilisateurs ...
2. **Construction de la mémoire d'entreprise :** les techniques utilisées dépendent de la nature des sources disponibles (spécialiste humain, documents manuscrits, écrits ou électroniques), des objectifs de la mémoire d'entreprise au niveau des utilisateurs. Elle peut être informatisée ou non et prendre la forme d'un document papier basé sur des connaissances qui n'ont jamais été explicitées auparavant, d'un système documentaire intelligent, d'un système hypermédia, d'un système à bases de connaissances, d'un système de raisonnement à partir de cas, d'un système basé sur le web, d'un système multi-agents.
3. **Diffusion de la mémoire d'entreprise :** les éléments adéquats de la mémoire d'entreprise doivent être diffusés aux membres adéquats de l'entreprise. Cette diffusion peut être active ou passive.
4. **Utilisation de la mémoire d'entreprise :** dans tous les cas, si possible, les informations recherchées seront adaptées aux besoins des utilisateurs, à leurs activités et à leur environnement de travail.
5. **Évaluation de la mémoire d'entreprise :** l'évaluation peut se faire d'un point de vue socio-organisationnel, économique-financier ou technique. Les utilisateurs peuvent être pris en compte *via* une évaluation ergonomique de la mémoire informatisée.

46. Computer-supported cooperative work

6. **Maintenance et évolution de la mémoire d'entreprise :** cette étape nécessite de prendre en compte les résultats de l'évaluation de la mémoire et concerne des problèmes comme l'ajout de connaissances, la mise à jour ou la révision des connaissances, l'évolution coopérative des connaissances, ...

Ce travail a été appliqué au sein de l'outil WebCokace qui permet de distribuer l'expertise sur Internet.

7.2.2 D'après Wolf : construire, rendre accessible, vérifier, présenter et traiter le facteur humain

Dans [Wolf97], l'auteur présente un autre point de vue de conception d'une base de connaissances organisationnelles. Les travaux ont été appliqués au système expert CUBUS dans une approche intégrée combinant l'approche humaine et l'approche système expert. Ce système a été développé pour la gestion des risques de prêts bancaires pour l'Union des Banques Suisses. L'auteur décrit qu'il est nécessaire de :

1. **Construire un inventaire des connaissances :** identifier les connaissances existantes ;
2. **Rendre les connaissances accessibles :** être sûr que les connaissances sont disponibles et les conserver dans un endroit connu ;
3. **Etre sûr que les connaissances peuvent être trouvées :** créer un thesaurus, un synopsis, des résumés ;
4. **Présenter les connaissances d'une manière optimale :** utiliser plusieurs niveaux de détail, penser à la présentation, utiliser des graphes, des schémas, ...

Mais l'auteur précise également que la conception d'une mémoire organisationnelle n'est pas suffisante, il faut permettre et supporter les facteurs humains. Ceci peut signifier traiter les connaissances et le métier et gérer le processus de capitalisation de connaissances.

7.2.3 D'après Grundstein : repérer, préserver, valoriser et actualiser

D'un point de vue plus général, dans [Grundstein95] ou [Grundstein96], l'auteur présente la problématique de capitalisation de connaissances sous forme d'un cycle caractérisé par les quatre facettes suivantes :

1. **repérer les connaissances stratégiques :** une des premières tâches est de repérer les connaissances stratégiques, c'est-à-dire les savoirs et savoir-faire qui sont strictement nécessaires au déroulement des processus essentiels qui constituent le cœur des activités de l'entreprise. Il faut les identifier, les localiser et les caractériser ;
2. **préserver les connaissances stratégiques :** modéliser, formaliser et conserver les connaissances stratégiques ;
3. **valoriser les connaissances stratégiques :** il faut les valoriser, les mettre au service du développement et de l'expansion de l'entreprise, c'est-à-dire les rendre accessibles selon certaines règles de confidentialité et de sécurité, les diffuser, les exploiter, les combiner et créer des connaissances nouvelles ;
4. **actualiser les connaissances stratégiques :** les mettre à jour et les enrichir au fur et à mesure des retours d'expériences et de la création de connaissances nouvelles.

D'après l'auteur, « *chaque facette nécessite la mise en œuvre de démarches, de méthodes et d'outils spécifiques* ».

7.2.4 Les points communs

Ainsi que nous avons pu le voir, ces trois approches de construction d'une mémoire d'entreprise présentent de nombreux points communs. On peut considérer que la dernière est la plus générale et résume les deux autres. Ainsi, la première étape de repérage mentionnée par M. Grundstein correspond à la détection des besoins en mémoire d'entreprise de R. Dieng et à l'inventaire de M. Wolf. La deuxième étape des quatre facettes de M. Grundstein correspond à la construction de la mémoire d'entreprise et aux deux étapes « Rendre les connaissances accessibles » et « Etre sûr que les connaissances peuvent être trouvées » appliquées pour CUBUS. La troisième étape de valorisation des connaissances stratégiques regroupe les étapes de diffusion et d'utilisation de la mémoire d'entreprise de Dieng et la présentation de Wolf. Enfin l'actualisation comprend l'évaluation et la maintenance de la mémoire d'entreprise, ainsi que la gestion du processus de capitalisation de connaissances de Wolf.

7.3 La fonction d'explication comme outil de la capitalisation de connaissances

Un système expert ou un système à bases de connaissances est un des moyens disponibles pour opérationnaliser les connaissances des experts. Il peut donc être réalisé comme une réponse aux objectifs mentionnés au paragraphe 7.1.2. Néanmoins, les SBC sont plus efficaces pour opérationnaliser les connaissances que pour les stocker. Ils ne sont pas toujours adaptés à la formation ou à la conservation des connaissances. Notamment, parce que les mécanismes d'évolution des connaissances d'un SBC sont assez lourds à gérer.

Nous pensons, ainsi que nous l'avons déjà précisé dans les chapitres précédents, que l'introduction d'une fonction d'explication dans un système à bases de connaissances permet d'améliorer le transfert des connaissances vers les utilisateurs.

Nous ajoutons que, à partir du moment où un système à bases de connaissances est réalisé, construire un système explicatif améliore la capitalisation de connaissances pour chacune des étapes décrites dans le paragraphe précédent.

Nous allons reprendre dans les paragraphes suivants la réalisation d'un système explicatif en suivant les étapes de construction d'un projet de capitalisation de connaissances décrites au paragraphe 7.2.

Le but n'est pas d'utiliser directement les quatre facettes d'un projet de capitalisation de connaissances des connaissances cruciales de l'entreprise, mais de décrire la réalisation d'un système explicatif du point de vue des quatre facettes identifiées. Nous ferons, pour cela l'analogie avec un projet de capitalisation de connaissances, non pas au niveau de l'entreprise mais des utilisateurs, car pour capitaliser les connaissances des experts, il faut repérer les connaissances cruciales ou importantes et les besoins des utilisateurs, préserver ces connaissances en les structurant et les modélisant, les valoriser en les diffusant par la fonction d'explication et les autres fonctions d'aide et les actualiser pour que les connaissances transmises correspondent toujours aux besoins prioritaires des utilisateurs quelquesoit l'évolution de l'environnement.

Nous nous placerons, comme précédemment, dans le contexte de la conduite de procédés complexes et chercherons à transmettre les connaissances stratégiques aux opérateurs de conduite.

7.3.1 Repérer

Dans [Dieng et al.98], les auteurs décrivent les méthodes classiques habituellement utilisées pour cette première phase : revue de la littérature, interviews /discussions et observations.

Dans le chapitre 4, nous avons proposé d'utiliser ces trois méthodes pour l'acquisition des connaissances explicatives. Nous avons par ailleurs distingué une revue générale de la littérature et une étude approfondie de documents experts. La première étape permet d'obtenir une idée générale du sujet traité, des raisonnements employés et des tâches des utilisateurs. La deuxième a pour objectif d'analyser en profondeur quelques documents clés qui décrivent par exemple le raisonnement de l'expert et comportent des justifications ou des explications des choix effectués.

Nous pensons qu'il est important de repérer ces documents clés mais qu'il est insuffisant de les mettre à disposition des utilisateurs sous leur forme originale. Il faut également les analyser en profondeur pour en extraire des informations importantes pour les opérateurs de conduite.

Ce travail d'analyse peut se baser sur la grille d'analyse que nous avons présentée au paragraphe 4.5. Cette grille a notamment pour objectif de caractériser les différentes connaissances identifiées dans les documents experts.

Nous avons également distingué, premièrement des observations des utilisateurs et des experts en situation réelle, deuxièmement des interviews et troisièmement des analyses des discussions.

L'observation permet de détecter les besoins des utilisateurs comme cela est mentionné dans la première phase de [Dieng et al.98]. Elle permet également de déterminer les éléments utilisés pour la conduite, les connaissances bien ou mal connues, les méthodes de raisonnement utilisées ou de vérifier le niveau de compréhension des utilisateurs.

Les interviews servent à obtenir des exemples contenant des connaissances cruciales qui sont ensuite dépouillées, analysées et justifiées dans la phase d'analyse suivante (voir les paragraphes 4.7 et 4.8).

Nous avons conscience que la phase d'acquisition des connaissances décrite est lourde et coûteuse. Le but est de transmettre aux opérateurs les connaissances stratégiques servant à l'activité de conduite. Généralement, les projets de capitalisation de connaissances consistent plutôt en une compilation des documents importants dans lesquels les membres de l'entreprise cherchent une information. Cela est dû à la multitude des buts possibles des utilisateurs de la mémoire d'entreprise. Dans notre cas, les connaissances utiles concernent les quatre étapes de la conduite de procédés : analyse des données, interprétation de l'état courant, élaboration d'un diagnostic et choix d'une action à entreprendre sur le procédé.

Ajoutons que l'étape d'évaluation des explications, décrite au paragraphe 4.10, est rarement mentionnée dans la littérature. Or nous avons expliqué que le problème de l'évaluation des explications est crucial. Si les informations données ne sont pas *bonnes*, c'est-à-dire pas tout à fait correctes du point de vue du métier, ou encore pas au bon niveau pour les utilisateurs, elles n'intéresseront pas les utilisateurs.

7.3.2 Préserver

L'étape de préservation et de formalisation des connaissances correspond à plusieurs paragraphes des chapitres 4 et 5.

Comme nous l'avons décrit, il faut structurer les connaissances pour pouvoir identifier, en fonction du contexte de la conduite, les connaissances à présenter aux opérateurs.

Nos travaux sur la modélisation des explications en parallèle avec l'étude des besoins des utilisateurs ont abouti à la distinction des explications locales et globales et aux propositions d'explications des résultats de détection, des résultats concernant l'état présent du procédé, des résultats de diagnostic et des résultats concernant l'action à entreprendre, présentées aux paragraphes 5.3.4.2, 5.3.4.3, 5.3.4.4 et 5.3.4.5.

Cette modélisation peut également être visible dans la proposition d'architecture multi-agents faite au paragraphe 6.4.3, synthétisée sur la figure 6.11.

7.3.3 Valoriser

La valorisation des connaissances stratégiques passe par la diffusion via la fonction d'explication. En fonction de leurs besoins, les opérateurs de conduite, les experts ou les ingénieurs responsables de la production vont consulter les vues d'explication réalisées et exploiter les informations transmises.

En utilisant la fonction d'explication, mais aussi toutes les fonctions d'aide (décrites au paragraphe 5.3.1) que sont la formation des utilisateurs, le didacticiel, le manuel utilisateur, l'aide en ligne, ainsi qu'un outil de présentation de l'expertise (comme l'outil hypertexte XPerDoc développé pour SACHEM), il est possible de couvrir la majorité des besoins des opérateurs.

La diffusion des connaissances auprès des opérateurs et des experts peut utiliser les fonctions et les outils développés autour du système à bases de connaissances, pour peu que ces outils soient facilement accessibles par tous. Mettre en forme hypertexte les connaissances des documents d'expertise et rendre accessible le document hypertexte par tous, à côté de la salle de conduite des hauts-fourneaux, comme cela a été fait pour SACHEM, est un bon moyen de « *rendre les connaissances accessibles* » et « *d'être sûr que les connaissances peuvent être trouvées* » comme l'a précisé M. Wolf.

Il suffit souvent de peu de travail pour que les connaissances recueillies pour la réalisation d'un système à bases de connaissances permettent, en plus, la réalisation d'une mémoire d'entreprise.

7.3.4 Actualiser

L'actualisation, la mise à jour de la mémoire d'entreprise est importante. Cette étape permet ensuite un nouveau cycle de repérage et de préservation des connaissances stratégiques.

Cette phase est essentielle en capitalisation de connaissances. Pour la réalisation de la fonction d'explication, nous avons également mentionné au paragraphe 5.4 que c'était une étape primordiale. Nous avons détaillé la prise en compte des évolutions des utilisateurs, des connaissances et du système.

Nous avons insisté sur la nécessité de prévoir des mécanismes techniques permettant et gérant les évolutions et les ressources humaines suffisantes, c'est-à-dire utilisateurs, experts, cognitiens, ergonomes et informaticiens.

Nous avons proposé trois mécanismes simples « en savoir plus », « en ajouter » et « en présenter moins » afin d'intégrer facilement les mises à jour et les évolutions dans la fonction d'explication.

7.3.5 Evolution cyclique

M. Grundstein a détaillé les quatre facettes de la capitalisation de connaissances cruciales de l'entreprise, mais il a également précisé le caractère cyclique de cette capitalisation.

Nous reviendrons sur la démarche et le processus général de développement d'une fonction d'explication au chapitre 9. Néanmoins nous pouvons déjà préciser que notre démarche était effectivement cyclique. Les quatre étapes ont été enchaînées plusieurs fois pour aboutir à la fonction d'explication de SACHEM. Le paragraphe 9.4 du dernier chapitre décrit l'enchaînement de ces quatre étapes. Ce paragraphe décrit l'enchaînement de notre projet de réalisation d'une fonction d'explication en utilisant les quatre facettes d'un projet de capitalisation de connaissances de l'entreprise.

Conclusion

Les explications manipulent des informations et des connaissances. La fonction d'explication s'intéresse à la compréhension des résultats donnés par le système à bases de connaissances et à l'acquisition de nouvelles connaissances par les utilisateurs. Aussi, il paraissait important de situer cette fonction d'explication parmi les travaux actuels, nombreux, relatifs à la capitalisation de connaissances ou au *knowledge management*.

Dans ce chapitre, nous avons premièrement défini les différentes notions utilisées : capitalisation de connaissances, *knowledge management*, motivations de la capitalisation de connaissances, connaissances tacites ou explicites ...

Puis nous nous sommes intéressé au développement pratique de mémoires d'entreprise. Nous avons analysé, pour cela, trois cycles de développement, tirés de la littérature. La démarche la plus générale est celle de M. Grundstein : repérer, préserver, valoriser et actualiser les connaissances stratégiques de l'entreprise.

Nous nous sommes ensuite basés sur cette démarche en quatre étapes pour décrire la réalisation d'une fonction d'explication comme un projet de capitalisation de connaissances.

Concluons en rappelant que la fonction d'explication n'est pas à elle seule suffisante pour réaliser une mémoire d'entreprise, mais qu'elle est une fonction clé qui permet la capitalisation de connaissances. Compléter un système à bases de connaissances par une fonction d'explication et d'autres fonctions d'aide comme un didacticiel, un document synthétique contenant l'expertise du métier, un manuel utilisateur, ou une formation des utilisateurs permet de réaliser une mémoire d'entreprise adaptée à la conduite de procédés complexes.



Conclusion

Les cinq chapitres de cette partie étaient relatifs au développement d'un système explicatif dans le contexte industriel de l'aide à la conduite de procédés complexes.

Nous avons premièrement analysé les contraintes imposées par ce contexte et dégagé au travers d'un modèle simplifié de raisonnement des opérateurs de conduite les grandes fonctionnalités sur lesquelles peuvent s'appuyer les systèmes explicatifs. Les fonctions de détection, d'état courant du procédé, de diagnostic et de conseil d'action, sont les quatre fonctions principales pour lesquels nous proposons des explications au chapitre 5.

Dans le deuxième chapitre de cette partie, nous nous sommes intéressés à la tâche d'acquisition des connaissances explicatives. Après une brève revue des différentes méthodes de recueil de connaissances explicatives, nous avons proposé d'effectuer le recueil en cinq phases relatives, soit à l'analyse de documents (analyse générale puis analyse approfondie de quelques documents d'expertise), soit à une mise en situation réelle des différents intervenants (observation, interviews et analyses des interviews et des dialogues).

Dans le chapitre 5, nous avons décrit le cadre des explications proposées et les mécanismes permettant la construction des explications. En analysant le sens de l'explication à proposer (en prolongement du raisonnement ou en déroulant le raisonnement expert) et en nous appuyant sur des explications locales aux principales fonctions du système d'aide, ou globales relatives à tous les aspects des résultats, nous avons pu proposer des mécanismes concrets de construction des explications. Nous n'avons pas oublié le problème de l'évolution du système explicatif, puisque nous avons évoqué trois mécanismes simples (« en savoir plus », « en présenter moins », « en ajouter ») qui permettent de modifier ce système en fonction des évolutions des utilisateurs, des connaissances ou du système. Ce point est particulièrement important pour l'adéquation de la fonction d'explication aux besoins des utilisateurs.

Nous avons ensuite cherché à établir une architecture explicative aussi générale et réutilisable que possible. Pour cela, nous avons choisi une architecture basée sur le paradigme multi-agents plutôt qu'une architecture modulaire. Cette architecture est structurée en quatre niveaux hiérarchiques correspondant au niveau cognitif des tâches confiées à chaque agent. Cette proposition comprend une centaine d'agents, ce qui est un nombre relativement important, mais des interactions réduites entre les divers agents. Ce compromis (interactions réduites et grand nombre d'agents) a été également discuté pour généraliser l'approche proposée.

Le dernier chapitre de cette partie était consacré au problème de la capitalisation des connaissances de l'entreprise. Après avoir décrit le cycle de capitalisation des connaissances de l'entreprise au travers de plusieurs théories, nous avons montré comment les explications s'inséraient dans ce mécanisme.

Les principales idées discutées dans cette partie seront reprises, dans le même ordre, dans le premier chapitre de la partie suivante pour l'application SACHEM d'aide à la conduite de hauts-fourneaux. Elles décrivent toutes les étapes du cycle de développement d'un système explicatif à intégrer dans un système d'aide à la conduite. Nous reviendrons rapidement sur ces étapes et

sur le cycle de développement d'un système explicatif dans le chapitre 9 de la partie suivante.

Troisième partie

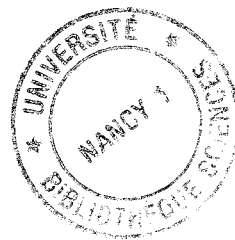
Application industrielle

Introduction

Dans cette troisième partie, nous nous intéresserons à la réalisation d'une fonction d'explication dans le cadre du projet SACHEM de Sollac. Le but est de montrer comment les idées exposées dans la deuxième partie peuvent être mises en pratique pour l'aide à la conduite de hauts-fourneaux.

Nous détaillerons dans le chapitre 8 le contexte industriel du projet SACHEM, c'est-à-dire l'usine sidérurgique et plus spécialement le haut-fourneau. En précisant les besoins en explications des opérateurs de conduite, la description du cahier des charges de la fonction d'explication pour SACHEM nous permettra d'aborder les phases d'acquisition des connaissances puis de réalisation de la fonction correspondant aux besoins identifiés. Comme dans la partie précédente, nous utiliserons le paradigme multi-agents pour proposer une architecture facilement évolutive. Nous nous baserons pour cela sur les chapitres 3, 4, 5 et 6 de la partie précédente.

Enfin, nous synthétiserons notre démarche de conception d'un système explicatif dans le dernier chapitre (chapitre 9). Nous préciserons alors les différentes étapes du processus de réalisation d'un tel système en nous basant sur le principe des cycles de développement de systèmes à bases de connaissances.



Chapitre 8

Des explications dans SACHEM pour l'aide à la conduite de hauts-fourneaux

Sommaire

8.1	Le Contexte industriel	150
8.1.1	L'environnement sidérurgique	150
8.1.2	L'usine à fonte	152
8.1.3	Le haut-fourneau	152
8.1.4	L'activité de conduite d'un haut-fourneau	153
8.2	Le projet SACHEM	156
8.2.1	Les objectifs du projet SACHEM	156
8.2.2	Ses caractéristiques principales	156
8.2.3	Les travaux d'ergonomie dans SACHEM	158
8.3	Le cahier des charges de la fonction d'explication pour SACHEM	158
8.3.1	Le cahier des charges de la fonction « explication / justification »	158
8.3.2	Le cahier des charges de la fonction d'explication	159
8.4	Acquisition des connaissances explicatives	163
8.4.1	Les interlocuteurs	163
8.4.2	Analyse de la documentation technique	165
8.4.3	Analyse approfondie de documents experts	165
8.4.4	Protocole de recueil des connaissances explicatives	172
8.4.5	Observations pour le recueil de connaissances explicatives	173
8.4.6	Interviews pour le recueil de connaissances explicatives	175
8.4.7	Autoconfrontations pour le recueil de connaissances explicatives	180
8.4.8	Evaluation des explications	182
8.4.9	Structuration et modélisation des connaissances explicatives	182
8.4.10	Volume des connaissances explicatives	183
8.5	Réalisation et intégration de la fonction d'explication dans le système SACHEM	184
8.5.1	Des explications : A qui ? Pourquoi ?	184
8.5.2	Des explications : Quoi ? Sous quelle forme ?	184
8.5.3	Des explications : Comment les créer ?	185
8.5.4	Des explications : Et après ?	193
8.5.5	Retour d'expérience sur la mise en place de la fonction d'explication	194
8.5.6	Maquettage de la fonction d'explication pour le système SACHEM	195
8.6	Architecture du système explicatif de SACHEM	208
8.6.1	Les éléments à prendre en compte dans l'architecture	208

8.6.2	Architecture modulaire	208
8.6.3	Architecture multi-agents	209

Introduction

Ce chapitre a pour objectif de montrer comment nous pouvons utiliser les méthodes et les idées développées dans les chapitres de la partie précédente pour l'application industrielle du projet SACHEM.

Nous commencerons par détailler le contexte industriel et sidérurgique du projet et les principes qui régissent les hauts-fourneaux.

Ensuite nous nous intéresserons au projet SACHEM [Dolenc et al.96] dont l'objectif est d'améliorer la régularité de la conduite des hauts-fourneaux par l'intégration des connaissances experts et l'amélioration de la perception des événements. Le système SACHEM développé par Sollac est opérationnel à ce jour. Il est installé sur les hauts-fourneaux de Sollac-Fos, Sollac-Dunkerque et en cours d'installation à Sollac-Florange. Il propose une aide à la surveillance et à la résolution des problèmes en cours par les fonctions de détection et de recommandation d'actions.

Une fois précisé le cahier des charges fonctionnel de la fonction d'explication de ce projet, nous suivrons l'ordre de description utilisé lors des chapitres 4, 5 et 6 : la phase d'acquisition des connaissances explicatives, la construction et la production des explications répondant aux besoins identifiés et l'architecture logicielle de la fonction d'explication.

Documents de travail

- [RapportTechnique1] Lejeune (Marc). - *Compte Rendu de la réunion du 26 juin sur les explications* -
Rapport technique LORIA et IRSID, Nancy, 4 juillet 1996.
- [RapportTechnique2] Lejeune (Marc). - *Compte Rendu de la réunion des 22-23 oct 96 : Définition du Protocole de recueil d'explications* -
Rapport technique LORIA et IRSID, Nancy, 25 octobre 1996.
- [RapportTechnique3] Lejeune (Marc). - *Éléments pour la définition de l'Explication attendue dans SACHEM* -
Version V3, Rapport technique LORIA et IRSID, Nancy, 25 juin 1996.
- [RapportTechnique4] Lejeune (Marc). - *Fiche descriptive des exemples de recueil d'explications* -
Rapport technique LORIA et IRSID, Nancy, 7 janvier 1996.
- [RapportTechnique5] Lejeune (Marc). - *Résumé des questions à la formation à SACHEM du 19 septembre* -
Rapport technique LORIA et IRSID, Nancy, 3 octobre 1996.
- [RapportTechnique6] Lejeune (Marc). - *Compte rendu et analyse des recueils à Dunkerque 4-5 et 12-13 février 1997* -
Version V2, Rapport technique LORIA et IRSID, Nancy, 10 avril 1997.
- [RapportTechnique7] Lejeune (Marc). - *Une fonction d'explication pour le système SACHEM, description générale et proposition* -
Rapport technique LORIA et IRSID, Nancy, août 1998.
- [RapportTechnique8] Lejeune (Marc). - *Participation à la formation des contremaîtres Process à SACHEM version V2.2 à Fos : compte-rendu et synthèse* -
Rapport technique LORIA et IRSID, Nancy, septembre 1998.

Ces documents non publics sont des documents de travail. Ils ont été établis au fur et à mesure du déroulement du projet de réalisation d'une fonction d'explication pour le système SACHEM. D'autres documents de travail intermédiaires ou moins prioritaires ont également servis de base aux travaux que nous évoquons dans ce chapitre.

Les documents [RapportTechnique1] et [RapportTechnique3] traitent plutôt de l'analyse du besoin et du cahier des charges de la fonction d'explication. Les [RapportTechnique2], [RapportTechnique4], [RapportTechnique5], [RapportTechnique6] et [RapportTechnique8] concernent le recueil des connaissances explicatives et leur modélisation. Le [RapportTechnique7] est relatif aux propositions permettant la mise en place de la fonction d'explication.

Ces rapports sont des documents synthétiques établis à partir de rapports intermédiaires réguliers (rapports d'avancement, compte-rendu de réunion ou d'entretiens, rapports de travail ...).

8.1 Le Contexte industriel

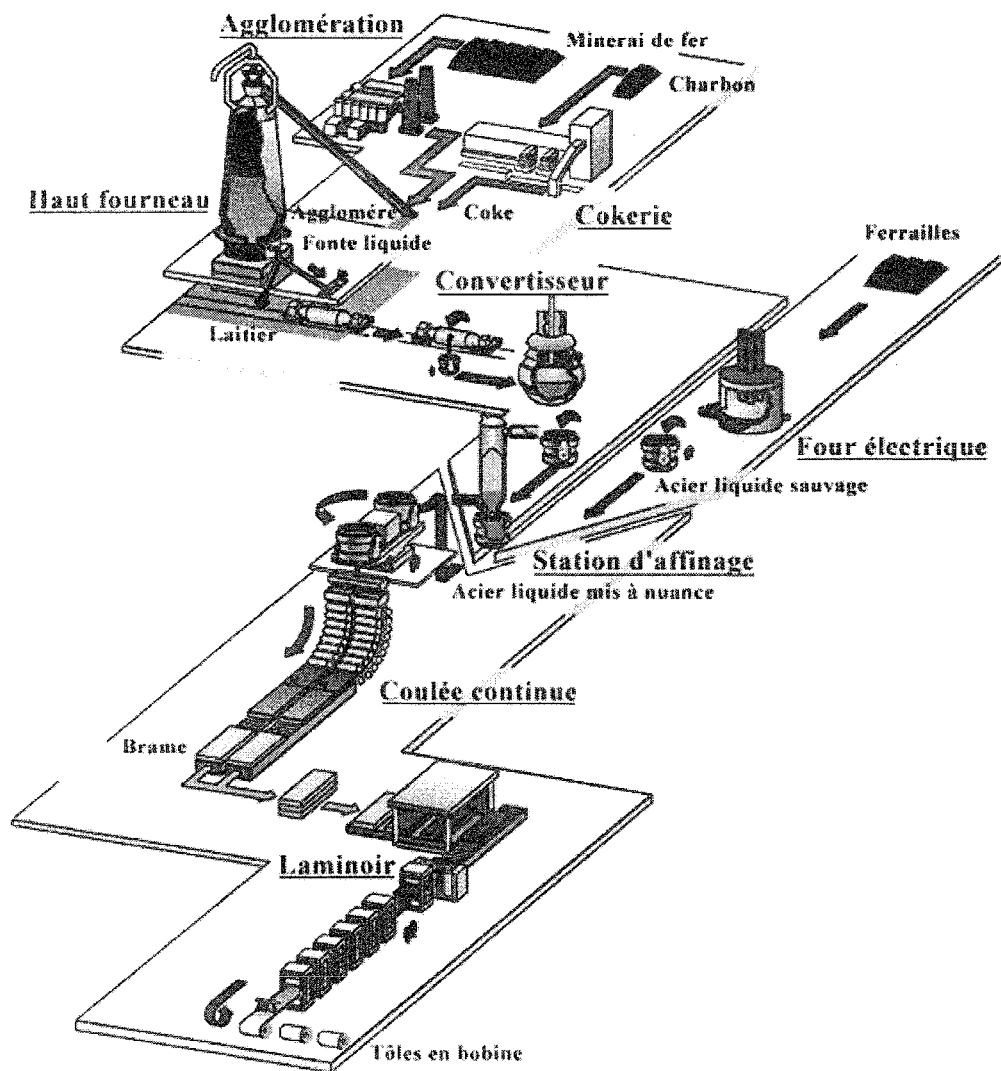
8.1.1 L'environnement sidérurgique

L'usine à fonte est un élément de l'environnement sidérurgique. Cet environnement, que l'on peut trouver sur les sites de Sollac-Fos, Sollac-Dunkerque ou sous une forme un peu différente à Sollac-Florange, comprend toutes les étapes de traitement de l'acier, depuis l'arrivée des bateaux chargés de minerai jusqu'au stockage des produits finis [Beranger et al.94].

Les principaux éléments, correspondant aux principales étapes de traitement de l'acier, détaillés sur la figure 8.1, sont les suivants : les quais pour les minerais, le stockage des minerais, la cokerie, l'agglomération, les hauts-fourneaux avec les unités associées (cowpers, filtrage, planchers de coulées ...), le convertisseur, l'affinage, la coulée continue, le laminoir, le stockage et les sites d'acheminement des produits finis (bobines par exemple).

Le four électrique, mentionné sur la figure 8.1, correspond à un choix de filière différente. Pour la filière comportant le haut-fourneau, l'acier est obtenu à partir de minerai de fer. En revanche, pour le four électrique, des ferrailles recyclées fondues permettent d'obtenir l'acier liquide sauvage.

Pour plus de détails, on pourra se référer au livre de l'acier [Beranger et al.94].



8.1.2 L'usine à fonte

L'usine à fonte constitue la première étape métallurgique de la filière d'élaboration de l'acier à partir de minerais et de charbon dans une usine intégrée. Au contact direct des matières premières, elle a comme objectif de produire le métal liquide correspondant, en quantité et en qualité, aux besoins des opérations réalisées en aval. Elle est articulée autour du haut-fourneau (HF) et des réacteurs auxiliaires destinés à conditionner les matières premières traitées par ce dernier, à savoir la cokerie pour la transformation du charbon en coke, l'agglomération pour la transformation du minerai en aggloméré et les cowpers pour le préchauffage de l'air de combustion (voir la figure 8.2). Par ailleurs l'usine à fonte comporte également l'ensemble des installations de préparation des charges, permettant de décharger les navires et de stocker.

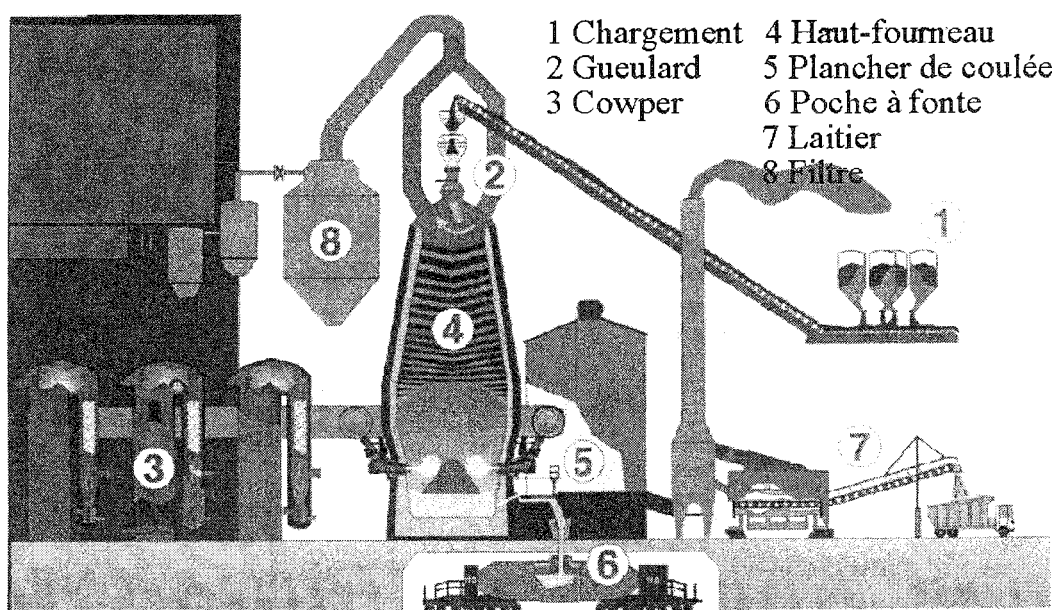


FIG. 8.2 – L'usine à fonte articulée autour du haut-fourneau

8.1.3 Le haut-fourneau

Le haut-fourneau est le premier maillon de la chaîne sidérurgique. C'est un *énorme cylindre blindé* garni de réfractaires, haut de 50 mètres, de 12 à 15 mètres de diamètre et contenant 3 500 m³ à 4 500 m³ de volume intérieur, soit l'équivalent de cinq trains de marchandise. Ce gros chaudron marche en continu 24h/24h pendant presque toute sa durée de vie qui est d'une quinzaine d'années. La production d'un haut-fourneau actuel est de l'ordre de 250 à 300 tonnes de fonte par heure, soit près de 7 000 tonnes/ jour. La production d'une tonne de fonte met en jeu les quantités suivantes : 1 500 kg de minerai à 63% de fer transformé, après concassage, en aggloméré à l'agglomération, 180 kg de charbon injecté sous forme de poudre aux tuyères, 350

kg de charbon à coke transformé en coke à la cokerie⁴⁷, 1 000 Nm³⁴⁸ de vent préchauffé à 1200° C dans les cowpers, et 15 Nm³ d'oxygène.

Le haut-fourneau est un réacteur chimique à *contre-courant gaz-solides*⁴⁹, dans lequel sont réalisées la réduction des oxydes de fer, la fusion du fer et de la gangue et la séparation entre le métal (la fonte) et les scories (le laitier) [Irsid94]. Les matières solides (minerais de fer, agglomérés, coke, ...) sont introduites en couches alternées à la partie supérieure de l'appareil. Par la partie basse, on souffle de l'air chaud (à 1 250° C, 3,5 bars de pression/cm², et 240 m/s) qui va brûler le coke et générer un gaz chaud et réducteur traversant cet empilement de couches. Les liquides produits sont évacués, de manière discontinue, à une température de l'ordre de 1 500° C. Le délai de transfert entre la matière chargée et la fonte coulée est de huit heures, c'est donc un processus lent qui nécessite une grande anticipation [Irsid94].

Le HF est le siège de trois processus :

- un processus chimique, essentiellement au travers des réactions de réduction des oxydes de fer, de combustion et de gazéification du carbone,
- un processus d'échange thermique, par transfert de chaleur entre gaz, solides et liquides (chauffage et fusion des matières),
- un processus mécanique et hydrologique (déplacement des matières et des liquides) avec une fonction de maintien de la perméabilité, dans la mesure où les phénomènes de transfert thermique et chimique interviennent dans un lit granulé, dans lequel gaz et solides circulent à contre-courant les uns des autres.

Le HF est également énormément instrumenté ; un millier de capteurs transmettent plus de 10 000 données/minute, principalement : caractéristiques des matières chargées, températures des parois, caractéristiques des gaz évacués par le gueulard, caractéristiques des apports d'énergie et de matières aux tuyères et caractéristiques de la fonte et du laitier évacués.

Cette importante instrumentation tient au fait qu'il est impossible de savoir ce qui se passe exactement au cœur du HF où des températures de près de 2 000° C règnent en permanence. Des métallurgistes japonais ont immergé et même gelé à l'azote des HF pour avoir une idée précise de l'état des matières se trouvant au cœur du fourneau. C'est grâce à ces études que l'on connaît maintenant la forme des isothermes au cœur du HF.

Il existe des modèles mathématiques du HF (développés à l'IRSID) effectuant des bilans des matières enfournées et sorties, des bilans thermiques et de nombreux modèles locaux se focalisant sur une partie du HF, mais, compte tenu de la complexité et de l'interdépendance des phénomènes physico-chimiques, il n'existe aucun modèle dynamique du haut-fourneau.

On peut noter qu'il existait trois cents hauts-fourneaux en Europe en 1975, dont une centaine en Lorraine, et qu'il en restait seulement soixante-quinze en 1995, dont seulement trois en Lorraine.

8.1.4 L'activité de conduite d'un haut-fourneau

D'après [Thirion et al.95], nous pouvons distinguer certaines caractéristiques générales de l'activité de conduite d'un haut-fourneau :

- le conducteur a peu de temps mort,

47. Le coke présente une plus grande résistance mécanique, pour supporter les trente mètres de charges et les frottements, ainsi qu'une bonne porosité pour permettre l'écoulement des liquides et la remontée des gaz.

48. On note « Nm³ » pour « Normo m³ ». Ce sont des m³ mesurés aux conditions normales de température et de pression.

49. Les matières solides et liquides descendent alors que les gaz montent. La maîtrise du passage des gaz parmi les matières est particulièrement délicate et importante.

- la surveillance est permanente : l'opérateur consacre beaucoup de temps à scruter les paramètres de marche du HF,
- ce n'est pas la perception qui fait défaut dans la conduite : lors de la consultation des paramètres, le conducteur détecte des variations pour identifier les symptômes pertinents,
- le traitement du signal est une activité de conduite,
- l'intégration de symptômes multiples est difficile,
- l'anticipation est une activité complexe,
- les modèles mathématiques sont peu utilisés,
- la conduite est une activité collective.

La conduite du haut-fourneau a un objectif de régularité, pour préserver la durée de vie de l'engin de production et assurer une qualité constante de la fonte produite.

Les caractéristiques des systèmes d'aide à la conduite de procédés complexes détaillées au paragraphe 3.1 s'appliquent également au cas de la conduite de haut-fourneau.

Nous rappelons ici quelles étaient ces caractéristiques avant de vérifier si elles s'appliquent bien au cas des hauts-fourneaux :

- le procédé est fortement instrumenté,
⇒ un millier de capteurs pour le haut-fourneau,
- il y a beaucoup de données, qui sont souvent bruitées, incertaines et qui peuvent comporter de nombreuses invalidations,
⇒ soit 10 000 données par minute qui doivent être validées et vérifiées (elles comportent de nombreuses invalidations du fait, par exemple, de capteurs défectueux), ce qui donne deux giga-octet de données pour cinq jours de données en continu,
- les informations sont indirectes, les variables cruciales ne peuvent pas être évaluées directement mais à partir de données plus périphériques,
⇒ il n'y a aucun capteur à l'intérieur du haut-fourneau, puisqu'il y règne plus de 2 000°C et de nombreuses données (par exemple, qualité de la réduction, écart à l'idéalité, variations de température) sont calculées à partir des données de base,
- le procédé est continu, la plupart du temps 24h/24,
⇒ le procédé est ici continu 24h/24, quasiment 365 jours par an,
- le procédé nécessite une surveillance permanente et permet peu de temps mort dans l'activité de conduite,
⇒ la surveillance en continu du HF est indispensable,
- la connaissance du procédé est difficile, longue à acquérir, l'expérience est indispensable,
⇒ on ne peut mériter le titre d'expert en haut-fourneau qu'après 15 ans de conduite (en plus d'autres qualités),
- une bonne connaissance du procédé est indispensable pour utiliser le système,
⇒ la tâche de conduite du HF n'est jamais confiée à des débutants ; les opérateurs de conduite ont généralement au minimum cinq ans d'expérience,

- la conduite est collective,
⇒ la notion de « collège d'utilisateurs » est très importante pour le haut-fourneau. Ce collège peut réunir l'opérateur de conduite du HF, le *contremaître Process* (qui supervise la conduite de plusieurs HF), un expert et les responsables de production.
- l'intégration de symptômes multiples est difficile,
⇒ cette intégration est difficile car les symptômes sont généralement fortement liés,
- l'anticipation est une activité complexe,
⇒ l'anticipation est très importante du fait du caractère à retardement du procédé, mais c'est une activité difficile,
- il y a une grande panoplie d'actions possibles ; ces actions peuvent être simples, c'est ce que l'on appelle des actions réflexes, ou complexes, élaborées après réflexion,
⇒ les actionneurs sont principalement le coke, le charbon, la température du vent, le pourcentage d'humidité dans le vent, la suroxygénation du vent, l'injection de fioul et le débit du vent. Les actions doivent inclure un effet à court terme et à long terme,
- le contrôle est distant, l'effet dû à une action n'est pas toujours immédiat,
⇒ les temps de latence peuvent être relativement courts pour le charbon ou le vent (1 à 2 heures) ou longs pour le coke (environ 6 heures) et les effets sur la température de la fonte sont donc retardés.

D'après l'étude de J.M. Hoc présentée au paragraphe 3.2, « *outre le fait que les diagnostics de panne ne représentent qu'une part très minime de l'activité de conduite de haut-fourneau, celle-ci ne consiste pas à régler les entrées du système à partir d'une rétroaction apportée par les sorties. Elle consiste plutôt à régler un système d'équilibre dynamique assurant une bonne marche, en se concentrant sur des phénomènes internes au déroulement du processus* » [Hoc91]. C'est ce que mentionne aussi Fabrice Delsart « *le HF, contrairement à beaucoup d'autres processus, ne se pilote pas par rétroaction des sorties sur les entrées* » [Delsart95].

Conclusion

En conclusion, le haut-fourneau est une mécanique complexe avec de nombreuses interactions, une longue inertie et une dynamique des phénomènes physico-chimiques partiellement connue. « *Le haut-fourneau est un exemple typique d'un processus continu, à longs délais de réponse, pour lequel les informations sur les variables cruciales sont obtenues de façon indirecte* » [Hoc91].

Dans la longue série d'opérations nécessaires pour transformer le minerai de fer en acier, l'étape du haut-fourneau est primordiale, mais elle est d'autant plus complexe à maîtriser qu'entre le moment où l'on enfourne le minerai dans le gueulard et celui où la fonte sort du trou de coulée, il ne s'écoule pas moins de huit heures, une durée pendant laquelle des millions de paramètres doivent être pris en compte par les opérateurs.

L'expertise de conduite de HF est bien une expertise de haut niveau qu'il est intéressant d'expliquer aux opérateurs de conduite.

Le haut-fourneau est un bon exemple, typique, pour l'aide à la conduite de procédés complexes.

8.2 Le projet SACHEM

Les descriptions concernant le système SACHEM, parues dans les nombreux articles de revues, sont toutes très élogieuses : « SACHEM ? *Un concentré de sagesse et d'intelligence au service des opérateurs des hauts-fourneaux* » [Bassik97], « *le plus gros système expert industriel en Europe* », « *un système intelligent d'aide à la conduite des hauts-fourneaux* » [Remy97], « SACHEM : *une technologie spatiale pour optimiser les hauts-fourneaux* » [Cadres97], « *un exemple concret de cette hybridation [des connaissances et des techniques] est fourni par le système SACHEM de Sollac, qui est l'une des plus importantes réalisations modiales de ce type* » [Bonnet98] ...

Notre propos n'est pas de décrire ici le projet SACHEM ; néanmoins, nous souhaitons donner certaines informations permettant de comprendre la place du système explicatif ou de la fonction d'explication au sein de ce système ambitieux.

Le projet SACHEM [Dolenc et al.96] a démarré au début des années 90 avec l'aide de partenaires extérieurs d'un consortium. Il a ensuite été entièrement repris par Sollac et USINOR. Ce vaste projet s'est fixé un cahier des charges ambitieux, la phase de recueil et de modélisation des connaissances de détection et de diagnostic de pannes a nécessité, à elle seule, pas moins de quatorze années-hommes. l'investissement total est de deux cents années-hommes réparties sur toute la durée du projet.

Le système SACHEM est opérationnel à ce jour. Il est installé sur les deux hauts-fourneaux de Sollac-Fos (le HF1 et le HF2), à Sollac-Dunkerque (sur le HF4) et en cours d'installation à Sollac-Floranges (sur les HF3 et HF6). Il propose une aide à la surveillance et à la résolution des problèmes en cours par les fonctions de détection et de recommandation d'actions.

L'objectif fixé de 6F par tonne de fonte semble atteint, sachant que Sollac produit environ onze millions de tonnes de fonte par an. C'est une réussite pour ce projet comportant trois dimensions : la dimension d'un projet d'entreprise et les dimensions techniques et humaines.

8.2.1 Les objectifs du projet SACHEM

Quatre nécessités majeures ont déterminé Sollac à envisager la mise en service d'un système d'aide à la conduite des hauts-fourneaux [Sollac90] :

- assurer une production régulière des quantités et qualités de fonte demandées, ce qui aura pour résultat de minimiser les coûts de production au haut-fourneau comme en aval,
- homogénéiser les comportements,
- préserver la durée de vie de l'outil de production,
- permettre le maintien et l'accroissement du patrimoine de connaissances et de savoir-faire.

L'objectif de SACHEM est d'améliorer la régularité de la conduite des hauts-fourneaux par l'intégration des connaissances experts et l'amélioration de la perception des événements.

La figure 8.3 montre quel est l'intérêt d'améliorer la détection précoce et la régularité de la conduite. La détection de l'expert est ainsi intégrée au sein du système SACHEM.

8.2.2 Ses caractéristiques principales

Les caractéristiques principales du projet SACHEM sont :

- un projet multi-experts : treize experts ont été impliqués, la phase de recueil et de modélisation des connaissances a été longue et riche (quatorze années-hommes),
- un projet multi-sites,

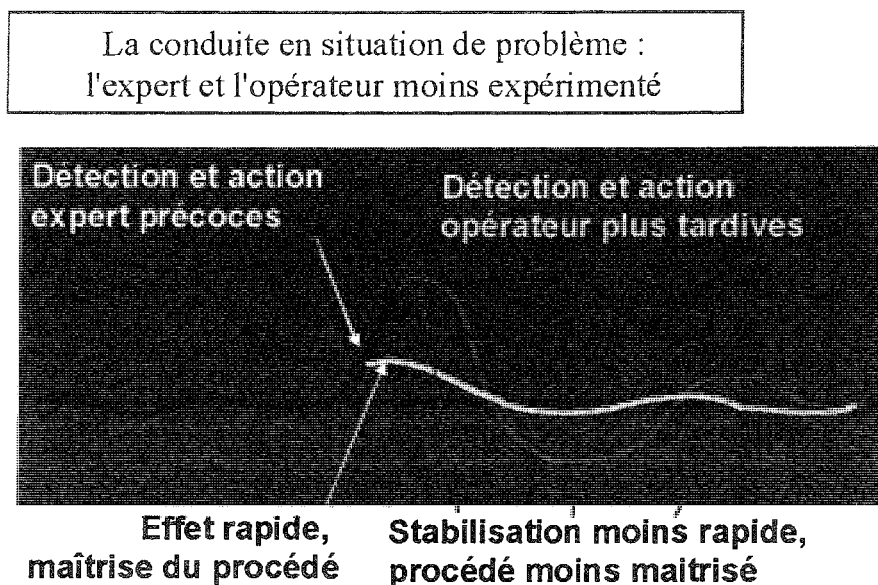


FIG. 8.3 – Détection précoce de l'expert intégrée dans SACHEM

- un projet multi-techniques, l'intelligence artificielle est complétée par la conception d'IHM, le traitement des signaux et la reconnaissance des formes, le raisonnement temporel et les bases de données numériques et symboliques,
- une forte implication des utilisateurs.

La figure 8.4 présente le schéma de fonctionnement du système SACHEM.

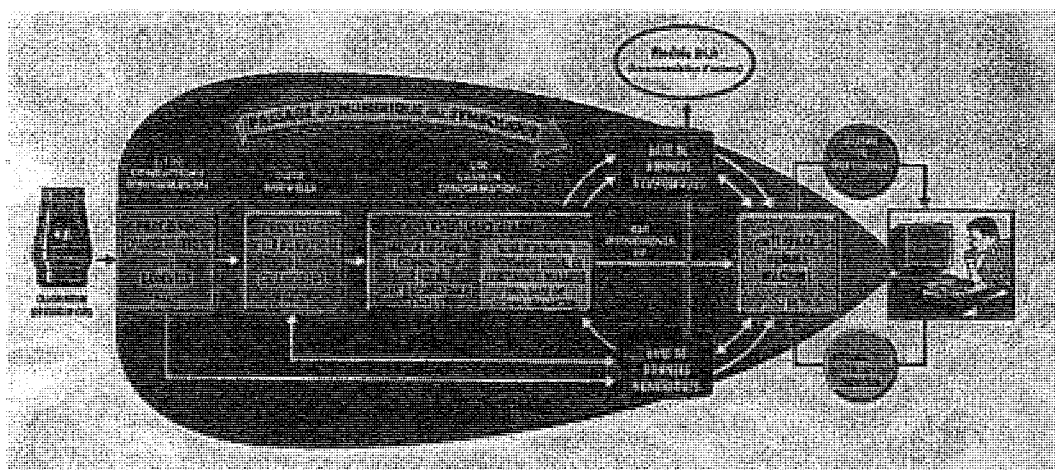


FIG. 8.4 – Fonctionnement du système SACHEM

Le système représente près de 500 000 lignes de code pour l'acquisition des données (5% du code), l'analyse des données et les modèles (15%), la détection de phénomènes en fonction du contexte (32%), la fonction de recommandation d'action (9%), l'interface homme-machine (21%),

les accès dans les bases de données (10%) et le *reporting* (9%) (pour la version V2.0 du système).

Sur près de 150 phénomènes détectés par jour, 80 ne sont pas présentés car ils ne sont prioritaires dans le contexte courant, 50 sont présentés sous forme d'avertissement (des phénomènes moyennement prioritaires en fonction du contexte), 15 aboutissent à des phénomènes majeurs (que l'on appelle phénomènes haut-fourneau, présentés sous forme d'alarme à l'opérateur de conduite qui décide de la conduite à tenir) et 5 à des actions de conduite recommandées par le système.

Les résultats du projet SACHEM concernent les gains en productivité et en durée de vie du HF (diminution des incidents), mais aussi la réalisation d'une expertise opératoire, commune, partagée et générique, la réalisation d'une *bible du métier*, la création d'un club des utilisateurs intégrant aussi l'outil ENQUET⁵⁰, l'acquisition de compétences importantes ou la réalisation d'une interface ergonomique efficace sur laquelle nous reviendrons dans le paragraphe suivant.

8.2.3 Les travaux d'ergonomie dans SACHEM

De nombreux travaux d'ergonomie ont été mis en place tant pour aider à définir le besoin des utilisateurs que pour simuler l'interface homme-machine :

- observation des activités en salle de contrôle [Damme et al.92]. L'observation filmée et enregistrée par microphones des activités a permis de dégager quelques caractéristiques de l'activité de conduite, les préoccupations majeures, la manière de travailler en équipe ou les documents utilisés, ces observations ont été suivies de séances d'autoconfrontation avec les conducteurs et les experts (le mécanisme de l'autoconfrontation est décrit au paragraphe 4.2) ;
- simulation du fonctionnement de SACHEM [Thirion et al.95]. Avant de valider les premières propositions de système, une simulation sur le mode du magicien d'Oz (*c.f.* paragraphe 4.2) par un expert vers un opérateur de conduite a été effectuée sur des données réelles ;
- validation ergonomique du modèle de coopération homme-machine et des interfaces proposées [Thirion et al.95]. Chaque proposition relative au modèle de coopération homme-machine et chaque vue d'interface à présenter aux opérateurs de conduite ont fait l'objet d'une analyse ergonomique. On peut notamment remarquer l'approche multi-agents utilisée pour modéliser le système d'interface homme-machine [Chouvet et al.96].

L'ensemble des travaux ergonomiques a notamment reçu le soutien de la CECA⁵¹.

8.3 Le cahier des charges de la fonction d'explication pour SACHEM

8.3.1 Le cahier des charges de la fonction « explication / justification »

Le cahier des charges de SACHEM [Sollac90] définissait ainsi l'expression fonctionnelle du besoin pour la fonction « explication / justification » :

« **Besoin :** *aider à la compréhension des résultats proposés par SACHEM et à leur analyse critique.*

50. C'est un outil d'aide à l'étude. Il a été adapté d'un outil développé par la société Matra Marconi Space, il est développé par la société AIS, Applied Innovative Solutions S.A., http://www.aissa.com/fr_index.html

51. Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier

L'opérateur devra avoir la possibilité de demander des informations plus détaillées que celles fournies en standard par les fonctions d'aide à la conduite.

SACHEM doit donc restituer son raisonnement et tout ce qui lui a permis d'aboutir à ses conclusions. En particulier, cette fonction est sollicitée par l'utilisateur qui désire connaître les critères sur lesquels s'est basée la fonction surveillance / alarme pour décrire l'état du HF. Elle doit pouvoir décrire la démarche et les conclusions de tout diagnostic en présentant les diverses hypothèses envisagées et la façon dont SACHEM a discriminé entre elles. En particulier elle devra préciser les raisons pour lesquelles SACHEM a réfuté telle hypothèse et pouvoir répondre à une question du type « Pourquoi telle hypothèse n'a pas été envisagée ? » Elle doit justifier les raisons pour lesquelles SACHEM propose des actions et poste des attentes, et détailler les prévisions d'évolution de l'état du HF. Elle doit aussi expliquer pourquoi telle ou telle donnée a été considérée comme incohérente et si cette incohérence a été détectée par SACHEM ou signalée par l'opérateur. Enfin, elle doit décrire les raisonnements conduits dans diverses fonctions de consultation (notamment la fonction d'extrapolation d'action).

Ces restitutions sur requêtes sont exigées même si la situation est calme (aucune anomalie, aucune action envisagée ...). En cas de silence relatif de SACHEM, dans l'assistance continue à la conduite, celui-ci doit pouvoir en expliquer les raisons en restituant à l'utilisateur des informations suffisantes pour lui permettre de percevoir l'avancement des raisonnements. »

Cette définition double intègre les deux fonctions de justification et d'explication car les buts de ces deux fonctions sont les mêmes, ce sont les moyens qui changent.

Nous verrons au paragraphe 8.3.2.4 comment séparer ces deux fonctions.

8.3.2 Le cahier des charges de la fonction d'explication

Ce cahier des charges a été établi grâce aux réflexions menées sur la fonction d'explication. L'expression définitive du besoin a été établie en mai 1997 à la suite des discussions avec les experts et les opérateurs [RapportTechnique1], [RapportTechnique3], [RapportTechnique6], [Lejeune97].

Ce cahier des charges reprend la structure des premiers paragraphes du chapitre 5 du présent ouvrage, ceux de la section « Des explications : A qui ? Pourquoi ? ».

8.3.2.1 La finalité de la fonction

De même que cela a été décrit dans le paragraphe 5.1.1, la finalité de la fonction peut être définie grâce à une liste de questions auxquelles répondent les explications.

Les explications peuvent être données pour les questions :

- Pourquoi SACHEM fait-il X ?
- Comment SACHEM a-t-il détecté X ?
- Pourquoi fallait-il que SACHEM détecte X ?
- Pourquoi SACHEM dit-il X ?
- Pourquoi SACHEM recommande-t-il X ?
- Pourquoi SACHEM propose-t-il X ?
- Pourquoi SACHEM n'a-t-il pas proposé Y ?
- Comment SACHEM est-il arrivé à proposer X ?
- Pourquoi fallait-il que SACHEM propose X ?
- Pourquoi, en la situation hypothétique X, SACHEM propose-t-il l'enchaînement Y ?

La finalité précise des explications pour SACHEM est

- « convaincre durablement l'opérateur » et
- « permettre à l'opérateur de raisonner aussi efficacement que l'expert »,

pour cela, il faut permettre aux opérateurs de « comprendre le procédé par l'analyse de l'expert » [RapportTechnique3].

8.3.2.2 Le destinataire cible

L'utilisateur cible est **l'opérateur confirmé** de niveau 2 *a priori* mais on s'adresse plutôt à un *collège* d'utilisateurs. Il est retenu que l'explication n'est destinée ni à l'ingénieur ni à l'expert [RapportTechnique3].

Les compétences de l'opérateur confirmé de niveau 2 sont définies dans le paragraphe suivant en terme de Savoir, Savoir-faire et Savoir-être à partir du document [gO92]. Ces niveaux correspondent à l'évaluation des compétences des opérateurs. Le niveau 1 correspond à un opérateur débutant, le niveau 2 à un opérateur confirmé et le niveau 3 à un opérateur expert. Ils ont été définis par les opérateurs et les experts.

Par ailleurs, dans [Thirion et al.95] a été introduite la notion d'« utilisateur maximal », car « *la seule notion de conducteur ne suffit pas à fournir les éléments suffisants pour définir l'ensemble des besoins de tous les utilisateurs concernés.* » Cet utilisateur maximal correspond à l'utilisation maximale du poste d'aide à la conduite, faite par les différents utilisateurs.

Les compétences de l'opérateur confirmé

Les compétence requises d'un opérateur confirmé (de niveau 2) s'ajoutent à celles de niveau

1. Elles se répartissent en trois catégories [gO92] :

Savoir

- notions de process et d'économies (par exemple : 100° de température vent est équivalent à 10kg de coke),
- connaissances théoriques de l'installation, des principes de marche (importance des matières dans chaque accu, les deux modes de marche des cowpers),
- connaître parfaitement l'installation, (ne pas la subir mais la maîtriser),
⇒ les connaissances de base du procédé, d'économie, ou celles relatives à l'installation ne sont donc pas nécessaires dans les explications,
- connaître les moyens possibles de mener une action (choix de moyens) et les impacts des actions engagées, ou possibles, ou de l'absence d'action.
⇒ la connaissance des moyens d'action n'est pas utile. En revanche il faut expliquer les motivations du choix d'un moyen d'action.

Savoir-faire

- maîtrise de la sécurité concernant les risques gaz, fluides, électricité, charbon, fonte et laitier,
- expérience,
- savoir suivre l'évolution *en instantané* sur échantillon,
- savoir vérifier qu'il n'y a pas d'accrochage
⇒ l'opérateur doit aller au-delà de SACHEM. Dans ce cas, l'explication doit l'aider à poursuivre le raisonnement,
- savoir combiner injection, broyage amont, gestion de ses stocks (stocks tampons en cas de panne),

- savoir équilibrer les pressions,
⇒ l'opérateur doit encore aller au-delà de SACHEM. Il faut, ici aussi, l'aider à poursuivre le raisonnement grâce aux explications,
- savoir suivre les paramètres de remise en route,
- savoir interpréter les valeurs et les paramètres,
⇒ la présentation des valeurs, paramètres peut parfois suffire,
- savoir s'informer des problèmes,
- savoir faire des calculs de bilan de coulée en fonction des quantités de fonte produite et sortie (risque d'engorgement),
- savoir respecter les configurations des vannes,
- capacité de relation et de négociation avec les services amont et aval,
- savoir donner des directives, guider et coordonner les interventions des services de maintenance liées à la production (pour faire face dans le temps le plus court).

Savoir-être

- savoir anticiper,
- capacité d'initiative et de décision,
⇒ les résultats du système et les explications aident l'opérateur pour ses prises de décisions,
- avoir du jugement,
- sens de l'observation, être curieux,
- perspicacité, capacité de réflexion sur un domaine complexe,
- rapidité d'esprit et d'action.

Ces compétences des opérateurs confirmés qui sont les destinataires cibles des explications permettent de définir le niveau moyen des explications à transmettre (voir le paragraphe 5.2.2 de la partie précédente ou le paragraphe 8.5.2.2).

8.3.2.3 Interactivité avec l'utilisateur

Les contraintes d'interaction entre le système et l'opérateur qui s'appliquent au système SACHEM sont valables également pour la fonction d'explication [RapportTechnique1].

On peut en déduire essentiellement les contraintes suivantes pour la fonction d'explication :

- consultation rapide des informations,
- consultation interruptible à tout moment,
- interactions minimales : pas de questions *tapées* par l'utilisateur,
- collège d'utilisateurs : plusieurs utilisateurs potentiels de niveau différent,
- aucune connaissance de l'utilisateur effectif,
- accès aux explications depuis les vues du système.

Ces contraintes sont importantes et restrictives quant à la forme que pourra prendre la fonction d'explication et ses interactions possibles avec l'utilisateur, mais elles correspondent aux contraintes habituelles dues aux caractéristiques du SBC et aux caractéristiques du système explicatif détaillées au paragraphe 3.1.

8.3.2.4 Positionnement de la fonction d'explication et de la fonction de justification

La système SACHEM présente l'originalité de définir deux fonctions aux objectifs proches : une fonction de justification et une fonction d'explication.

Cette distinction correspond à une différence de moyens et non à des distinctions fonctionnelles pour les utilisateurs. C'est pourquoi, ainsi que nous l'avons vu précédemment au paragraphe 8.3.1, ces deux fonctions étaient considérées comme une seule fonction dans le cahier des charges de SACHEM [Sollac90].

Néanmoins, en fonction de l'avancée du projet et des besoins importants des utilisateurs en terme d'« explication / justification », il a paru important de créer très tôt la fonction de justification.

La fonction de justification est destinée à :

- « justifier les résultats donnés par SACHEM par la présentation des conducteurs de base (canaux d'information) »,
- « convaincre rapidement l'utilisateur de la raison d'un raisonnement »,
- « faire partager un avis ».

Elle « s'adresse à un opérateur évolué qui comprend et connaît bien le système » [Rapport-Technique1].

La distinction entre ces deux fonctions proches réside dans le fait que la fonction d'explication est « destinée à un opérateur moins évolué pour lui donner une explication plus explicite et plus complète », pour « convaincre durablement l'utilisateur ».

Néanmoins, « *essayer de séparer Justification et Explication est une tâche complexe qui demande discussion et concertation. Le problème est aussi complexe que le problème de la séparation du corps et de l'âme !* » [RapportTechnique1].

Il est important de signaler que cette séparation du champ des explications en deux fonctions distinctes « justification » et « explication » n'a aucun équivalent dans la littérature, ni dans aucun système actuel, on parle toujours d'expliquer et justifier [Swartout81].

On peut néanmoins mentionner les travaux de JB Grize sur la différenciation entre « explication » et « justification » [Grize96] :

1. Une explication fait toujours appel à des causes physiques, psychologiques ou finales.
Pourquoi la lampe s'est-elle éteinte ? Parce que les fusibles ont sauté (cause physique). Pourquoi a-t-il pris la porte ? Parce qu'il était en colère (cause psychologique). Pour montrer son indignation (cause finale).
2. La justification (de *justus* conforme au droit et à la coutume) est une autre façon de répondre à une question *Pourquoi*. Elle consiste en un appel non à des causes mais à des raisons.
Pourquoi souffrez-vous d'insomnies ? Vous digérez mal (cause = explication). À votre âge, c'est tout à fait normal (raison = justification).
Pourquoi dites-vous que le train aura du retard ? Parce que la voie est coupée par la neige (cause = explication). Parce que le haut-parleur l'a annoncé (raison = justification). Parce que dans ce pays, les trains ont toujours du retard (raison = justification).

Cependant il est évident que les choses ne sont jamais aussi claires que dans ces exemples. Comme l'a précisé M. JB Grize, « *il n'est jamais facile de différencier explication et justification* ».

8.3.2.5 La fonction d'explication dans le projet SACHEM

Le système SACHEM a démarré en 1992. La fonction d'explication a été prévue dès le début dans le cahier des charges, la réalisation de la fonction de justification a démarré en même temps que la réalisation du système et des premières fonctions. En revanche, le projet de réalisation de la fonction d'explication a démarré plus tard.

Le positionnement du projet de la fonction d'explication par rapport au système complet est donc le cas intermédiaire décrit dans le paragraphe 3.4 : c'est le cas *SBC en cours de développement*. Le SBC est démarré, ou déjà bien avancé, lorsque l'on met en œuvre la réalisation du système explicatif. Néanmoins les travaux sur les informations à fournir aux utilisateurs pour justifier et expliquer les résultats du système ont démarré très tôt dans la vie du projet, le cas du système SACHEM est donc plus difficile à *cataloguer*.

La fonction de détection (d'après le paragraphe 3.3.1) était déjà réalisée et presque livrée lors des premières réflexions sur le besoin en explications des opérateurs de conduite.

La fonction de conseil d'action (voir le paragraphe 3.3.4), appelée fonction de recommandation d'action au sein de SACHEM, a été réalisée plus tard.

Des propositions correspondant à la fonction d'état courant du procédé (voir le paragraphe 3.3.2) ont été faites pour les fonctions nommées « Etat Tendance du Haut-Fourneau (ETHF) » et « Etat Global du Haut-Fourneau (EGHF) ». Cette fonction est encore à l'étude pour obtenir des indicateurs complets et synthétiques qui permettent aux utilisateurs d'obtenir rapidement l'état courant du haut-fourneau et les évolutions possibles.

De même, la fonction de diagnostic (voir le paragraphe 3.3.3) est en cours de développement pour le système SACHEM. Elle vise à obtenir les causes profondes des problèmes en cours. Une étude, visant essentiellement à structurer les connaissances de diagnostic, a été réalisée en 1998 et 1999 en utilisant nos travaux de reformulation sur le graphe de raisonnement, présenté au paragraphe 8.4.3.2.

Les introductions des différentes fonctions dans le système SACHEM ont eu de fortes répercussions sur le projet de création de la fonction d'explication. Néanmoins ces influences concernent la gestion de projet et la vie du projet SACHEM ; nous n'en parlerons donc pas dans ce document.

Le lecteur intéressé pourra cependant se reporter au dernier chapitre qui reprend les différentes phases d'un projet de système explicatif et contient quelques conseils tirés de notre expérience.

8.4 Acquisition des connaissances explicatives

Nous allons détailler ici les différentes étapes que nous avons suivies pour effectuer la phase d'acquisition des connaissances explicatives. Pour cela nous nous sommes basés sur les travaux, décrits dans les paragraphes précédents, relatifs à la définition du besoin des opérateurs en explications.

Nous avons réalisé cette acquisition des connaissances explicatives en nous basant sur la proposition détaillée au chapitre 4 comportant cinq étapes.

Nous allons tout d'abord, de même que dans le chapitre 4, définir les différents interlocuteurs, puis nous décrirons les cinq étapes que sont l'analyse générale de la documentation technique, l'analyse approfondie de documents experts, les observations, les interviews et les autoconfrontations. Nous détaillerons pour cela au paragraphe 8.4.4 le protocole de recueil utilisé.

8.4.1 Les interlocuteurs

Afin d'identifier les destinataires cibles et leurs compétences tant en matière de connaissances du métier qu'en ce qui concerne les connaissances de mise en œuvre des connaissances dans SACHEM, nous avons introduit plusieurs catégories d'utilisateurs que nous détaillons dans la figure 8.5 [RapportTechnique3]. Ces catégories complètent les trois niveaux représentant les compétences de conduite des opérateurs.

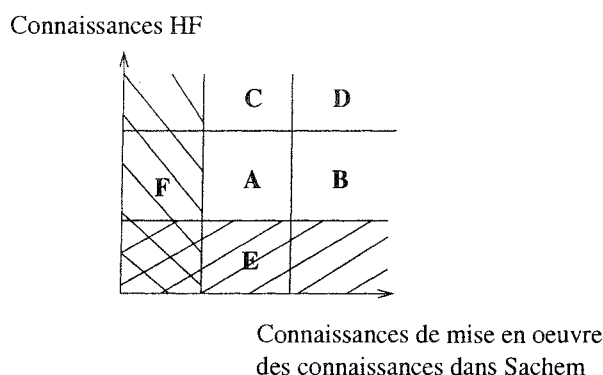


FIG. 8.5 – Classement des utilisateurs

Sur cette figure, les populations différentes sont :

- E : débutants sur le plan des connaissances haut-fournistes (la population la plus éloignée de l'axe des ordonnées est, par exemple, celle constituée des informaticiens de l'équipe SACHEM),
- F : populations ignorant les principes de mise en œuvre des connaissances dans SACHEM,
- A : opérateurs confirmés, tant au niveau des connaissances haut-fournistes, qu'au niveau de la mise en œuvre des connaissances dans SACHEM,
- B : opérateurs confirmés (connaissances du HF) bien au fait de la mise en œuvre des connaissances dans SACHEM,
- C : opérateurs experts n'ayant pas une connaissance parfaite de la mise en œuvre des connaissances dans SACHEM,
- D : opérateurs experts tant au niveau des connaissances haut-fournistes, qu'au niveau de la mise en œuvre des connaissances dans SACHEM.

Les populations E et F ne sont pas concernées par les explications, les opérateurs cibles sont ceux des catégories A et B et peuvent aussi concerner les experts de la catégorie C. Les experts de la catégorie D sont les experts avec lesquels il faut travailler, ce sont les *producteurs* des explications à formuler dans SACHEM.

En conclusion, pour la conduite de hauts-fourneaux, en utilisant les idées avancées dans le paragraphe 4.1.1 et la petite classification ci-dessus, l'« expert en explication » sera donc un expert du domaine ayant de préférence une bonne connaissance de la mise en œuvre des connaissances dans le système et possédant des connaissances de psychologie, de didactique et d'écoute.

Pour l'utilisateur *lambda* (voir le paragraphe 4.1.2) qui est un opérateur confirmé dans le domaine de la conduite des hauts-fourneaux, nous chercherons à demander à plusieurs utilisateurs d'effectuer les mêmes exercices, que ce soit pour la phase d'acquisition des connaissances ou celle de validation des explications proposées.

Le rôle du cogniticien dans cette phase a été assuré par plusieurs personnes, des ingénieurs informaticiens ayant des compétences en matière d'ingénierie de la connaissance, avec l'appui d'un ergonome expert, psychologue de formation, sollicité régulièrement sur le projet SACHEM (voir le paragraphe 8.2.3).

8.4.2 Analyse de la documentation technique

Avant de chercher à recueillir des exemples d'explication des raisonnements experts, il est important de bien connaître les différents types de connaissances manipulées, les différents raisonnements possibles, les connaissances de base du métier, etc. (voir le paragraphe 4.4).

Nous avons donc cherché ces renseignements dans les documents existants, principalement dans les documents de synthèse des connaissances de métier.

Pour SACHEM, nous nous sommes essentiellement appuyés sur les documents issus de la phase appelée « Phase1Bis » (phase de synthèse et de validation de l'expertise de conduite des hauts-fourneaux commune à plusieurs sites industriels), les documents « XPRF » (reformulation de l'expertise) et le document hypertexte de synthèse des expertises, le document « XPerDoc ».

8.4.3 Analyse approfondie de documents experts

Une fois le travail préliminaire décrit au paragraphe précédent effectué, il faut analyser en profondeur quelques documents experts bien choisis.

Nous avons, pour cela, utilisé la typologie des concepts, présentée au paragraphe 4.5, sur un document expert, et analysé un graphe de raisonnement.

8.4.3.1 Document de raisonnement expert reformulé

Il est difficile de trouver un document contenant une expertise complète, c'est-à-dire un raisonnement complet depuis l'analyse des données jusqu'aux actions choisies, et des explications sur les choix effectués lors de ce raisonnement. C'est ce type de document riche en explications qu'il faut analyser.

Nous avons étudié un document décrivant l'analyse d'un cas réel de Garnissage/Dégarnissage sur le HF2 de Fos. Ce cas était traité par un expert et reformulé par des cognitivistes.

Le cas traité est un cas réel pour lequel les opérateurs ont eu à réagir en temps réel et à choisir les opérations à effectuer.

Nous l'avons tout d'abord analysé suivant la typologie « Concept, Conduite, Détection, Diagnostic, Action » présentée au paragraphe 4.5.

Voici ci-dessous les exemples les plus représentatifs de notre travail classés suivant la typologie choisie. Nous présentons également en annexe notre travail sur le document original. Nous détaillerons ensuite les questions que nous nous sommes posées par rapport aux concepts identifiés.

Exemples tirés du texte et structurés suivant la typologie :

1. description d'un concept

(a) description générale,

Exemple : *Un garni est une couche épaisse de matières qui se fixe sur les parois. La capacité des matières à se fixer dépend des conditions thermodynamiques qui règnent au niveau de la cuve d'un HF (essentiellement température et débit de gaz en parois). Ces matières sont agglomérées par un liant. Deux natures de liant sont identifiées : le zinc et les alcalins. Partant de cela, trois types de garni sont possibles (garni de zinc, garni de K_2O et garni mixte). Pour les garnis de haut de cuve, le liant est le zinc, alors que pour les étalages et le bas de cuve le liant est le K_2O . Entre les deux, le liant peut-être le zinc et/ou les alcalins.*

(b) description des données utilisées

Exemple : *Les talutages sont utilisés pour déterminer le profil des matières cédées (coke et mine) et calculer le rapport des épaisseurs de couche $C/(C + M)$. Ces mesures sont obtenues à l'aide des sondes de talutage. Elles sont effectuées d'une manière apériodique (i.e. à la demande) à la suite par exemple d'une modification de la position des plaques d'un Gueulard à Géométrie Variable (GGV) ou d'une action sur le mode de cédage.*

Exemple : *[données utilisées] Mu est élaboré par le modèle CLEF dont nous ne disposons pas des résultats sur la période considérée. L'analyse sera menée à partir du débit d'azote en parois, qui est un bon traceur du flux gazeux.*

Exemple : *[données utilisées] La mesure de la température sur la génératrice 5 (rang 4) est indisponible le 23 à partir de 7H00.*

Exemple : *[Conditions d'application/ indice de descente des charges] Cet indice est élaboré journallement.*

(c) description de l'importance du concept,

Exemple : *[Débit du vent soufflé] Il s'agit d'un paramètre fondamental qui permet de situer la marche d'un HF. Ce paramètre doit donc être considéré en préalable à toute analyse.*

(d) description des risques pour la conduite liés au concept,

Exemple : *En présence d'un garni, le niveau des pertes thermiques globales est bas. Cependant un garni peut se détacher inopinément des parois et tomber dans le creuset du HF. Cette arrivée de matières solides mal préparées et froides au niveau du creuset provoque une baisse de la température des liquides qu'il contient et peut entraîner des dommages sur les tuyères. Il existe donc un risque de blocage du creuset (i.e. la chute de température des liquides peut être telle que le laitier se fige dans le creuset et empêche l'évacuation des liquides).*

(e) éléments de diagnostic liés au concept,

Exemple : *En effet, à conditionnement du vent et débit constant, une baisse de la teneur en azote localisée signifie une baisse de débit de gaz provoquée par une baisse de perméabilité locale.*

(f) description des liens avec les autres concepts,

Exemple : *Le concept de descente des charges est lié à celui de répartition gazeuse.*

Exemple : *Les pertes thermiques sont utilisées pour quantifier les actions sur le réglage de l'état thermique du HF.*

(g) description des actions possibles liés au concept;

Exemple : *[Talutage -> modification de la position des plaques d'un Gueulard à Géométrie Variable (GGV) ou d'une action sur le mode de cédage] Dans de tels cas, il est nécessaire de vérifier l'effet des nouveaux réglages sur la répartition des matières (les mesures peuvent être effectuées environ 1H00 après l'action).*

2. analyse du comportement des opérateurs (Conduite),

(a) raisonnement des opérateurs à propos d'un concept,

Exemple : *[Stabilité d'un paramètre] Il est à noter que les opérateurs utilisent indifféremment les termes d'écart type et de variation (d'amplitude). Dans cette formulation, seule l'expression variation d'amplitude sera utilisée, la notion d'écart type possédant une définition mathématique très précise qui n'est pas forcément celle employée par les opérateurs.*

(b) raisonnement des opérateurs pour la conduite,

Exemple : *[Stabilité d'un paramètre]* L'opérateur analyse le niveau moyen de la courbe (au sens de la tendance) et les variations d'amplitude.

Exemple : *Le flux thermique n'étant pas mesuré directement, les opérateurs utilisent les températures des staves et des margelles.*

- (c) raisonnement des opérateurs à propos des courbes, et de l'analyse des signaux,

Exemple : *[Evolution d'un paramètre]* Pour l'essentiel, l'opérateur analyse le niveau moyen de la courbe (au sens de la tendance) et les variations d'amplitude.

Exemple : *[WU]* L'opérateur s'en sert pour se fixer une référence lui permettant de raisonner en tendance.

- (d) mode opératoire habituel des opérateurs,

Exemple : *[Influence des alcalins]* L'opérateur est chargé de fixer les conditions thermodynamiques du laitier (température, teneur en chaux, silice et magnésie influençant la capacité en alcalins du laitier CK) favorables à l'évacuation des alcalins (contrainte de bilan K_2O équilibré). Cela se traduit par des visées en température de la fonte et sur les indices i et ib . Pour cela il dispose de l'analyse des matières enfournées et des quantités. Son action consiste donc à faire sortir ce qui entre.

Exemple : *L'opérateur doit détecter au plus tôt l'amorçage du phénomène et dans un second temps estimer son ampleur (i.e. le phénomène se produit-il dans le bon sens ? si oui, estimer son amplitude environ 1H00 après l'amorçage).*

- (e) critique d'une action des opérateurs;

Exemple : *Les feuilles de marche montrent que les opérateurs ont effectué une action tendant à rendre le HF plus périphérique et plus central: -2cm sur C1 et C2 le 24 à 14H30. Mais cette action est trop timide pour qu'elle ait une influence sur le comportement du HF.*

3. description du cas présent (Détection),

- (a) description de l'état (chiffré) des différents concepts,

Exemple : *Température Fonte (TF): la moyenne est de 1480° C*

- (b) évaluation du niveau des concepts et synthèse d'un concept,

Exemple : *Dans le cas, le conditionnement du vent est stable à partir du 21/05 à 5H00. En fait les aléas subis au cours de la journée étant expliqués et maîtrisés, l'opérateur considère stable le conditionnement à partir du début de la semaine.*

Exemple : *Entre le 20 et le 22, le bilan K_2O est plutôt équilibré. A partir du 23 à 9H00, le HF tend à stocker du K_2O .*

Exemple : *La descente des charges, sans être idéale, n'est pas catastrophique.*

Exemple : *Cela signifie qu'aucune perturbation n'a été introduite via le conditionnement du vent.*

- (c) description des déductions faites à partir du cas présent pour l'état global ou général du HF,

Exemple : *L'analyse de la période de marche précédent le 24 indique une marche bonne et stable, sans autres problèmes que celui d'un garni. Une préoccupation secondaire demeure au niveau de la centralité du HF*

- (d) description des déductions faites à partir du cas présent pour les analyses complémentaires à effectuer

Exemple : *[Descente des charges]* Pour préciser la qualification, il faut analyser le nombre d'accrochages et leurs durées.

- (e) analyse critique des données traitées

Exemple : *[Perméabilité]* La courbe indique un niveau moyen de 10 (nombre sans unité)

qui est manifestement faux (i.e. habituellement le niveau de perméabilité se situe entre 14 et 16). En fait, on sait par ailleurs que la mesure de la pression circulaire est faussée.
Exemple: *[rendement Hydrogène] Un problème de cohérence des mesure se pose donc.*

4. description du diagnostic des problèmes en cours (Diagnostic),

(a) description (statique) d'un diagnostic associé à un concept,

Exemple: *A conditionnement du vent et débit constant, une baisse de la teneur en azote localisée signifie une baisse de débit de gaz provoquée par une baisse de perméabilité locale.*

(b) description des différents diagnostics possibles suite à la détection de phénomènes survenus,

Exemple: *Les courbes sont globalement en baisse, ce qui montre la présence d'un garni formé ou en formation.*

(c) description des critères de choix du diagnostic,

Exemple: *L'analyse des températures de staves rang par rang permet de conclure à la présence d'un garni réparti sur le HF. Ce garni est friable et récent.*

Exemple: *[OMEGA] Ce niveau est faible et renforce l'idée de l'insuffisance du flux gazeux en paroi. Ces indications vont dans le sens du garnissage.*

(d) description des déductions faites pour le diagnostic négatif des problèmes,

Exemple: *[Températures moyennes des staves] Ces courbes montrent que le dégarnissage n'a pas été provoqué par une modification de la répartition des matières (en lien avec les actions au niveau du chargement).*

(e) description des analyses complémentaires à effectuer pour établir le diagnostic,

(f) description du diagnostic final établi à partir des problèmes en cours au vu des éventuelles analyses complémentaires effectuées.

Exemple: *Le rendement CO au centre est trop élevé le 22 et encore plus le 23. Par conséquent le HF n'est pas assez central.*

5. description des actions à effectuer (Action),

(a) description (statique) d'une action associée à un concept,

Exemple: *En présence d'un garni, deux types d'actions sont envisageables :*

-répartition gazeuse: Une action sur la répartition gazeuse est efficace lorsque le garni est friable. L'objectif visé par ce type d'action consiste à éroder le garni de manière à ce qu'il s'élimine en douceur.

-charge dégarnissante: Une charge dégarnissante est utilisée lorsque le garni est solide (compact) et que les actions sur la répartition gazeuse n'ont pas produit un effet suffisant. Cependant ce type d'action est très traumatisant sur la répartition gazeuse du HF.

Exemple: *[contexte d'application de l'action] Une action sur la répartition gazeuse est efficace lorsque le garni est friable.*

Exemple: *[contexte d'application de l'action] Une charge dégarnissante est utilisée lorsque le garni est solide (compact) et que les actions sur la répartition gazeuse n'ont pas produit un effet suffisant.*

Exemple: *[objectif de l'action] L'objectif visé par ce type d'action consiste à éroder le garni de manière à ce qu'il s'élimine en douceur.*

(b) description des différentes actions possibles suite à l'identification du problème courant,

Exemple: *En présence d'un garni, deux types d'actions sont envisageables ...*

- (c) description des analyses complémentaires à effectuer pour aider au choix de l'action cible,
 Exemple : *Puisque un doute subsiste au niveau de la centralité du HF, il est nécessaire de qualifier la répartition gazeuse afin de choisir l'action la plus judicieuse en l'état du HF, c'est-à-dire qui règle tous les problèmes.*
- (d) description des critères de choix de l'action cible et description de l'action cible,
 Exemple : *Dans le cas présent, le garni étant friable, une action sur la répartition gazeuse devrait être suffisante.*
 Exemple : *Puisque un doute subsiste au niveau de la centralité du HF, il est nécessaire de qualifier la répartition gazeuse afin de choisir l'action la plus judicieuse en l'état du HF, c'est-à-dire qui règle tous les problèmes.*
 Exemple : *Dans la panoplie d'actions possibles au niveau du chargement, il existe une action qui permet de rendre simultanément le HF plus périphérique et plus central. Cette action consiste à déplacer vers la paroi la crête de coke sur le premier cédage de coke sans toucher au second coke, ce qui provoque une diminution de l'angle de talus.*
 Exemple : [objectif de l'action] *L'action à mener sur la répartition gazeuse consiste à augmenter le flux gazeux en paroi dans le but d'éroder le garni : il s'agit donc de rendre le HF plus périphérique.*
 Exemple : [objectif de l'action] *L'objectif de cette action est de rendre le HF nettement plus périphérique et plus central.*
 Exemple : [effet attendu suite à l'action] *L'effet attendu d'une telle action est l'augmentation du flux gazeux en paroi (le coke est plus perméable que les matières minérales) et au centre (renforcement de l'effet cheminée).*
 Exemple : [effet attendu suite à l'action] *L'effet escompté peut être observé 4 à 5H00 au delà de l'action (i.e. le temps de passer une demi cuve avec la nouvelle charge).*
 Exemple : [description des éléments à surveiller] *Il est donc nécessaire de surveiller de près l'évolution des températures des staves pour réagir dès que les premiers signes de dégarnissage se manifesteront. Il est en effet impossible de dater l'instant du début du dégarnissage.*
 Exemple : [description des éléments à surveiller] *Pour assurer la détection des premiers signes de dégarnissage, les températures des staves seront surveillées sur une période de 15mn.*
 Exemple : [description des éléments à surveiller] *L'observation/détection de cet effet sur la répartition gazeuse est réalisée sur les paramètres suivants :*
 -rendement CO : le RCO doit diminuer d'une manière importante en paroi et au centre,
 -teneur en azote (N_2) : la teneur en azote en paroi doit augmenter,
 -consommation spécifique MU : Mu paroi doit augmenter,
 -température de gaz en paroi (-4 et -8m) : la température de gaz en paroi doit augmenter,
 -pic central : la température du pic central doit augmenter légèrement.
 Exemple : [description des éléments à surveiller] *Si aucun effet n'était détecté dans les 24H00, l'opérateur devrait réagir et répondre aux deux questions :*
 -l'action était-elle suffisante ?
 -un autre phénomène s'est-il produit de telle sorte que les effets de l'action ne soient pas visibles ?

A l'aide de l'analyse effectuée sur le document expert, on peut établir la liste des concepts décrits.

Il faut ensuite se poser plusieurs questions importantes relatives à l'utilisation et à la *fabrication* des informations relatives aux différents concepts pour la fonction d'explication :

- Quelle est l'importance du concept dans le texte?
- Quelle est sa place dans les explications au vu de son importance dans le texte?
- Ce concept est-il utile pour l'explication? (a-t-il sa place dans l'explication?)
- Où positionner ce concept, à quoi le raccrocher?
- Comment le récupérer ou le fabriquer?

Nous avons donc commencé à faire ce travail de synthèse et de réflexion sur les concepts décrits pour proposer une maquette d'explication (voir le paragraphe 8.5.6). Nous nous sommes appuyés également sur un graphe de raisonnement décrit au paragraphe suivant. Néanmoins nous n'avons pas effectué complètement ce travail relatif à la liste des concepts et à leur utilisation dans la fonction d'explication puisque nous nous sommes focalisés sur une maquette de cette fonction. Ce travail devra être complété et fini lors de la réalisation effective de la fonction d'explication pour SACHEM.

8.4.3.2 Le graphe de Duperray

Nous avons pu, à l'aide d'un document commentant un raisonnement expert, établir une liste des différents concepts utilisés, leur importance pour la conduite et acquérir des exemples relatifs au diagnostic ou à l'élaboration d'une action.

Nous avons ensuite essayé d'affiner le raisonnement des experts qui aboutit au choix d'une action en nous focalisant sur les éléments importants utilisés lors de raisonnement. Ces éléments indispensables au raisonnement font partie des éléments qu'il est indispensable d'expliquer aux opérateurs, ceux qu'ils doivent connaître.

Nous avons cherché également les liens entre les principaux problèmes en nous plaçant à un niveau plus synthétique que les éléments utilisés dans la fonction de détection (c'est-à-dire les phénomènes HF). Ce niveau est primordial pour pouvoir espérer créer des explications globales ou synthétiques (voir le paragraphe 5.3.2) et pas seulement des explications locales.

Pour cela, nous avons utilisé un document important établi par un expert : le graphe de raisonnement des opérateurs de conduite. M. Duperray a schématisé le *cerveau des opérateurs de conduite*. Ce document est considéré comme le plus représentatif de la complexité de la tâche de conduite.

Le document initial était très complexe, très emmêlé et difficilement compréhensible au premier coup d'œil. Il comportait de nombreuses connexions mais aucune hiérarchie entre les modules ni aucune légende des concepts introduits. Il était difficile de l'exploiter dans sa forme initiale (voir l'annexe présentant ce document initial).

Nous avons reformulé ce graphe suivant le schéma de raisonnement présenté au chapitre 3, depuis l'analyse des données, en passant par les traitements effectués ou les raisonnements suivis jusqu'au choix d'une action.

Nous avons préservé le sens global et local du graphe puisque toutes les connexions et tous les modules ont été conservés. Nous avons regroupé et ordonné les modules en fonction de leur influence sur le haut-fourneau (répartition gazeuse, réglage thermique ...). Notre seule modification a été de nommer les différentes actions. Celles-ci étaient séparées mais pas identifiées.

La figure 8.6 présente la nouvelle version complète de ce graphe. Elle est difficilement lisible puisque sa taille réelle est environ six fois plus grande. La version complète, à échelle normale, est donnée en annexe.

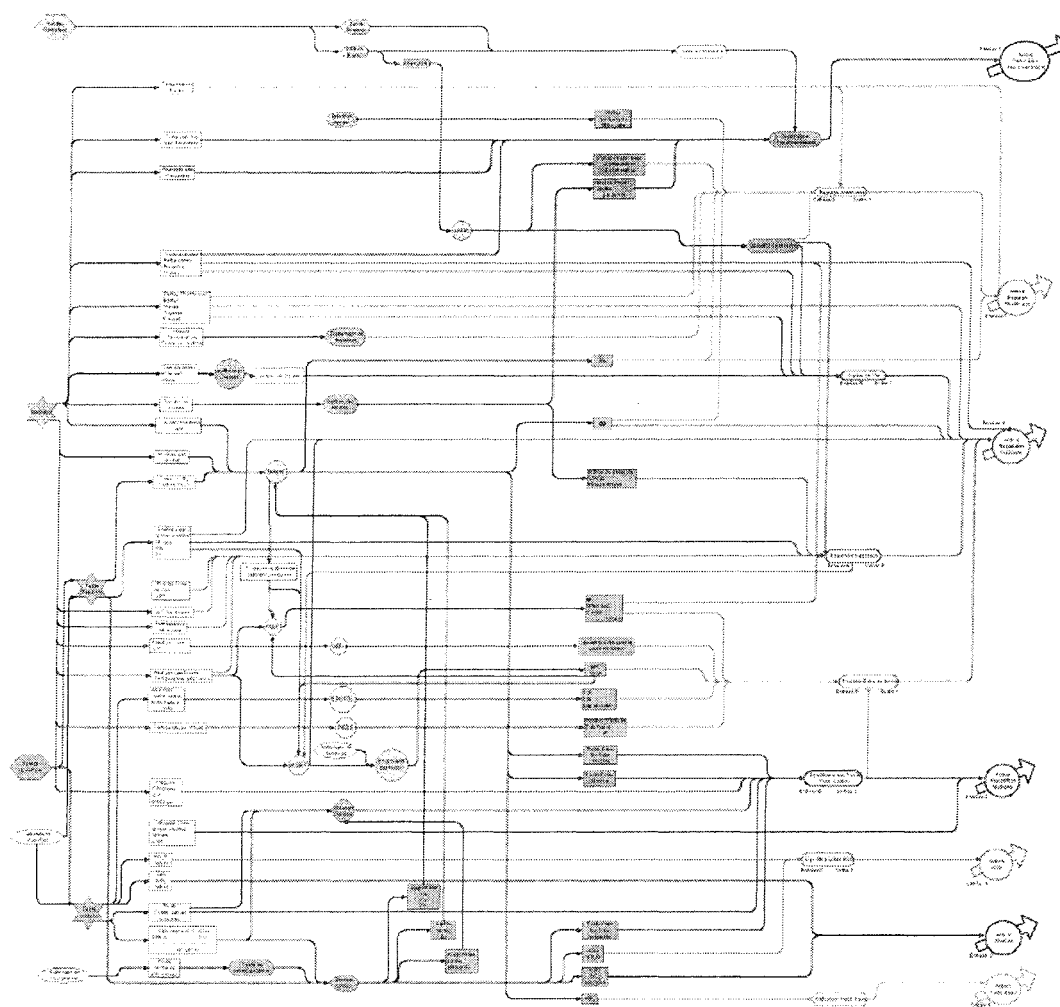


FIG. 8.6 – Le graphe complet reformulé de M. Duperray (échelle 1/6)

Sur la figure 8.7, nous présentons en détail la partie du graphe couverte par la fonction de recommandation d'action de SACHEM, celle concernant le réglage thermique. Tous les modules aboutissant directement ou indirectement (via un ou plusieurs modules) à l'action de réglage thermique ont été conservés. Sur cette figure, tous les types de formalismes sont utilisés. Sur l'extrême gauche, nous trouvons les modules de données extraites des capteurs (niveau III) (étoiles et octogones) par exemple « saisies opérateur » ou « table de coulée », puis les données simples (rectangles blancs), par exemple « conditionnement vent » ou « température fonte ». La partie suivante, au milieu, comprend les traitements effectués sur les données (cercles et ovales), par exemple « MMHF » ou « prévision cycle », et les données élaborées (rectangles gris) « Wu » ou « pertes thermiques ». La partie droite rassemble les modules des différentes rubriques du HF (ovales), par exemple « Objectifs de marche », et les actions directes sur le HF à l'extrême droite, ici « Action Réglage Thermique ».

A partir du graphe présenté sous sa nouvelle forme, nous pouvons dégager des exemples d'explications à donner correspondant aux objectifs assignés à la fonction d'explication.

Pour convaincre l'opérateur de la validité des résultats de SACHEM, et pour des actions correspondant à des recommandations d'action de SACHEM (réglage thermique), on peut lui

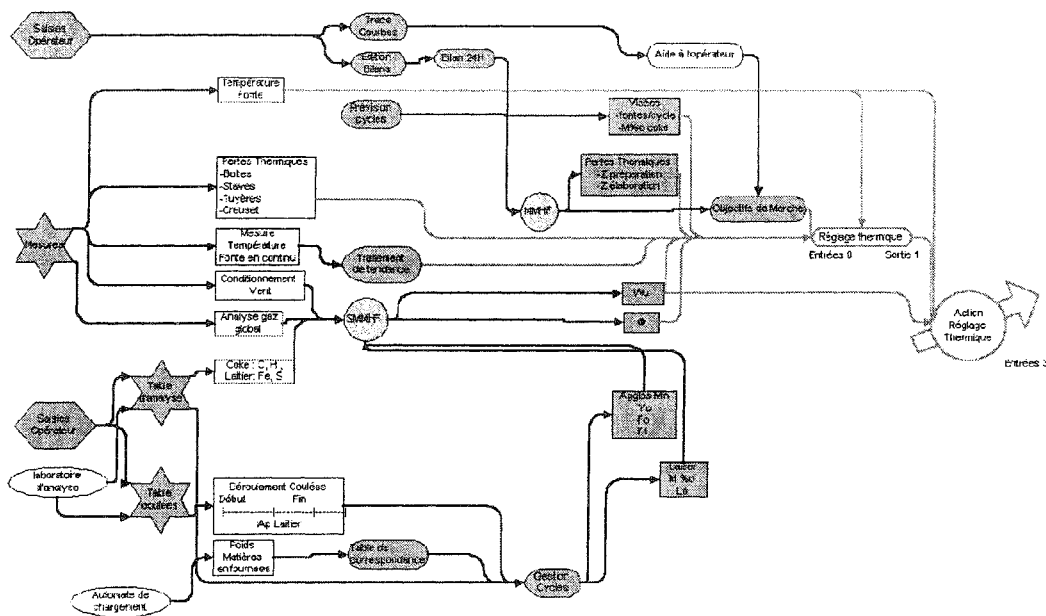


FIG. 8.7 – Le graphe reformulé réduit au réglage thermique

présenter en détail, les données utilisées, les connaissances mises en œuvre et le raisonnement utilisé.

Pour améliorer ses compétences, nous pouvons présenter, à l'opérateur, des éléments décrivant les types d'action non implémentés (la recommandation d'action dans SACHEM est restreinte au réglage thermique), ou les liens entre l'action spécifique au réglage thermique et les autres actions.

Afin d'aider les opérateurs à comprendre le procédé grâce aux résultats du système, il est possible d'obtenir un résumé de la dynamique du procédé au travers des données utilisées, des détections faites par SACHEM et des actions engagées par les opérateurs.

8.4.4 Protocole de recueil des connaissances explicatives

Avec l'aide d'un ergonome expert, nous avons défini un protocole de recueil des connaissances d'explications [Rapport Technique2]. Ce protocole inclut les phases d'observation, d'interviews et d'autoconfrontation détaillées dans les trois paragraphes suivants.

8.4.4.1 Objectif et principe de fonctionnement

L'objectif et le principe de fonctionnement étaient définis ainsi :

« L'objectif principal est de recueillir des exemples d'explications en vue de réaliser un cahier des charges (sûrement incomplet) pour la fin de l'année 1996.

L'idée est d'initier puis filmer ou enregistrer un dialogue explicatif entre un expert et un opérateur ou Contre-Maitre Process. Les séances se déroulent en trois phases : l'observation, le recueil puis l'autoconfrontation. Elles sont du type verbalisation provoquée sur le modèle d'un magicien d'Oz réduit.

La finalité n'est pas de recueillir des explications pour apprendre mais des explications pour comprendre, pour accepter le résultat. Le contexte n'est donc pas une situation d'apprentissage

mais de communication, de compréhension. »[RapportTechnique2]

8.4.4.2 Résultats attendus du protocole de recueil

« A partir des exemples d'explications, les résultats attendus peuvent être de six types principaux.

validation du protocole de recueil

Dans le but final d'établir un recueil exhaustif des explications pour la réalisation complète de la fonction, il est important de critiquer le protocole mis en œuvre. Cette critique est d'autant plus importante qu'il n'existe pas dans la littérature de méthodologie de recueil de l'explication.

Stratégie d'explication

Ceci concerne le côté étude cognitive des explications. Le but n'est pas de faire une étude complète mais d'avoir une idée des stratégies d'explications. Ce point est à approfondir. On regroupe sous ce terme plusieurs notions : style de l'explication, caractéristique de l'explication, typologie des explications, stratégies d'explication ...

Point d'entrée de l'explication

Répondre à la question « Quel va être le point d'entrée naturel des explications ? » est important.

Ce peut être par une fonction de haut niveau (type ETHF ou RCA), par les phénomènes, par un menu détaillé, par une liste de questions (Quoi, Comment, Pourquoi, Pourquoi pas, Et Après) ...

Niveau de l'explication

A quel niveau doit-on arrêter l'explication, ou autrement que supposera-t-on connu et compris par l'opérateur ?

Ceci correspond à la profondeur de l'explication.

Formalisme de représentation

Le meilleur moyen de fournir de l'information peut être du texte, des schémas, des diagrammes, du texte schématisé ...

Influence du contexte

Le contexte de conduite peut avoir une influence sur la détection, la résolution, la recommandation d'action, ainsi il peut avoir une influence sur l'explication proposée. Nous essayerons de savoir dans quelle mesure ce contexte peut influencer sur l'explication et peut-être dégager des invariants. »[RapportTechnique2]

A la suite de ce protocole, nous avons analysé les recueils et généralisé la démarche pour l'acquisition de connaissances explicatives. Le résultat de nos réflexions a été présenté dans la partie précédente, au chapitre 4.

Ce recueil nous a permis de définir complètement le cahier des charges dont les points les plus significatifs ont été présentés dans les paragraphes précédents.

Nous allons maintenant revenir brièvement sur les trois phases principales de ce recueil, l'observation, les interviews et les autoconfrontations.

8.4.5 Observations pour le recueil de connaissances explicatives

Avant la mise en place du protocole de recueil, nous avons suivi la formation des utilisateurs à SACHEM (formation du 19 septembre 1996 des contremaîtres Process) pour noter les questions posées et les problèmes soulevés. Nous avons également suivi des séances de compagnonnage

réalisées par des experts auprès des opérateurs de conduite de Sollac-Fos. Le compte-rendu complet est détaillé dans le document [RapportTechnique5] (non public).

Les questions posées concernaient le système dans sa globalité. Elles ont été regroupées en quatre catégories: « Manque », « Problème », « Question » et « OK » et quatre rubriques « SACHEM », « le haut-fourneau », le logiciel de consultation des données « ENQUET » et « l'environnement ».

En voici quelques exemples :

Problème-Environnement: « Ca va être dur à apprendre à manipuler. » « Mais non c'est comme Windows » ...

Problème-Environnement: Les écritures sont trop petites !

OK-Sachem: Les vues de Justif correspondent à une toute autre approche. Ce ne sont pas les mêmes courbes utilisées, mais elles sont quand même de la même famille.

Problème-Sachem: La sonde pilote devrait plutôt être présentée en cm/s que m/s.

Question-Sachem: A quel moment une alarme disparaît-elle ?

Problème-Sachem: Que signifie KO sur vidange creuset et état thermique ?

Question-Haut-Fourneau: Comment le système va-t-il détecter le passage de bloc aux tuyères ? Par une baisse du débit vent, mais la meilleure solution reste d'aller voir aux tuyères ...

Question-Haut-Fourneau: Pourquoi est-ce un avertissement ? C'est pourtant quelque chose de bien ! (c'était, *a priori*, un refroidissement du HF).

Question-Enquet: Que signifie les données *apériodiques* dans les catégories des données d'ENQUET ? Pourrait-on avoir un exemple ?

Question-Environnement: Quelle va être la position de la hiérarchie sur les données sorties de SACHEM ? Par exemple, comment le contremaître Process va-t-il devoir travailler si ITHF et SACHEM donnent des résultats opposés ? Que va-t-il devoir faire ?

Exemple d'explication donnée lors du compagnonage

Pour avoir une idée de la répartition des gaz dans le HF, on peut regarder Mu, le Rendement CO (RCO), ou la température T^o . Pourtant, regarder une seule valeur ne donne pas une indication parfaite du HF. On prend donc plutôt un rapport X-local/X-global en une zone précise ($X = \text{RCO}$, ou Mu, ou T^o) qui donne une idée plus précise de la tendance du HF. Par exemple une augmentation de la Température de Pic vient du fait qu'il y a moins de matière au centre, le gaz chaud montant rencontre donc moins de matière à réchauffer, il est moins refroidi. Regarder TPic seul est ainsi moins fiable que de regarder le rapport TPic/TG.

Grâce au modèle CLE, on dispose au niveau 3 de Mu-local/Mu-Global. Ce rapport donne une indication du flux sur le HF, il donne une idée du débit gaz par rapport au débit de matière. C'est donc la meilleure manière d'avoir une idée de la répartition gazeuse.

En conclusion, les questions posées concernaient donc directement le système d'aide, très peu les connaissances métallurgiques, et leur mise en œuvre dans SACHEM. Elles ont permis d'évaluer la compréhension des utilisateurs et leur disponibilité vis-à-vis du système.

Ensuite, nous avons effectué la phase d'observation définie dans le protocole de recueil.

« Cette phase a pour but de définir les zones d'incompréhension des utilisateurs. Pour cela on prévoit d'interroger les opérateurs (ou plutôt les contremaîtres Process) en salle de contrôle pour leur demander de nous expliquer le fonctionnement du système, ou certaines fonctionnalités de SACHEM. » [RapportTechnique2]

Nous avons donc interrogé plusieurs opérateurs de conduite en situation de travail. Nous leur avons demandé de nous expliquer comment SACHEM élaborait les résultats, quelles données étaient prises en compte.

Nous avons conclu que les opérateurs, en général comprenaient bien le fonctionnement du système, en tout cas suffisamment pour leurs activités de conduite. Comme nous avons déjà fortement observé les futurs utilisateurs du système pendant les formations, ces dernières séances d'observation ont apporté peu d'informations nouvelles.

Afin de vérifier le type des questions posées une fois le système compris, maîtrisé et utilisé, nous avons également suivi la formation des opérateurs à la version V2 du système SACHEM en août 1998 [RapportTechnique8].

8.4.6 Interviews pour le recueil de connaissances explicatives

Nous souhaitions pouvoir mettre en situation d'interview deux ou trois experts et deux ou trois contremaîtres Process (CMP) pour constituer des séances croisées (E1-CM1, E1-CM2, E2-CM1, E2-CM2 ...).

Nous cherchions des informations *pour conduire*, nous avons prévu de faire les séances de recueil en salle de contrôle ou en salle séparée sur les données réelles.

Dans cette phase, afin d'éviter les explications artificielles ne correspondant pas à des besoins réels, nous avons prévu de ne pas diriger le dialogue. Nous avons laissé essentiellement l'opérateur poser ses questions, et l'expert éclaircir certains points [RapportTechnique2].

Interviews réalisés

Nous avons réalisé deux séances d'interviews de mise en situation que nous avons complété par des interviews séparés d'experts.

Intervenants

Les deux séances se sont déroulées sur le site industriel, à Sollac-Dunkerque [RapportTechnique6]. Un seul expert était disponible, en revanche les interviews ont eu lieu avec quatre opérateurs de conduite différents. Notre idée était d'avoir deux experts mais cela n'a pas été possible.

Les séances étaient préparées et analysées avec l'aide d'un ergonome expert, avec qui nous avons préparé le protocole de recueil.

Mise en situation

Le système SACHEM était déjà en place à Sollac-Dunkerque au moment des interviews. La fonction de détection était complètement opérationnelle mais pas utilisée au quotidien par les opérateurs de conduite. Néanmoins ceux-ci avaient déjà reçu des formations à l'utilisation du système SACHEM.

La première séance a eu lieu sur la version du système installé. Elle se déroulait sur les données réelles, actuellement disponibles, dans une salle séparée de la salle de contrôle. Les problèmes visibles étaient donc exactement ceux qui étaient en cours sur le haut-fourneau et préoccupaient les opérateurs.

Cette situation a été pauvre en événements. Dans la majorité des cas, il y a peu de problème en même temps sur le haut-fourneau. Leur traitement est assez long.

Afin de recueillir des exemples d'explications basés sur des données réelles, nous avons réalisé la deuxième séance sur des données enregistrées. Ces données sont des données réelles, extraites d'un jeu d'essai antérieur. Il a alors été possible d'accélérer le déroulement des événements et montrer l'apparition d'un phénomène perturbateur et sa résolution.

Il y a donc eu quatre interviews de mise en situation réalisés avec quatre opérateurs différents.

Problèmes traités par les explications

Le document [RapportTechnique6] présente les principaux exemples recueillis lors des entretiens et des propositions relatives aux explications à proposer.

Les questions posées et les réponses données étaient relatives à :

- la présentation globale du système SACHEM,
- la présentation de l'interface,
- les mécanismes généraux de l'interface,
- la façon dont il faut utiliser les vues de l'interface,
- la structure des vues de justification,
- quelques vues de justification particulièrement complexes,
- l'utilisation des informations des vues de justification,
- l'importance des informations implicites,
- les liens entre les informations,
- la structure de la vue de prévision de la température de fonte,
- la vue des visées,
- l'intégration du système dans l'environnement de travail,
- l'impact du système sur l'activité des opérateurs de conduite,
- la plus-value du système,
- la structuration de l'expertise,
- les rubriques de l'expertise,
- la différence entre les Phénomènes HF et les Phénomènes Signaux,
- le mécanisme de qualification des alarmes et des avertissements,
- les données utilisées,
- les mécanismes d'invalidation,
- la nature des données utilisées,
- le choix des données utilisées,
- les mécanismes généraux de détection d'un phénomène,
- le lien Phénomène-canal
- les mécanismes de détection reposant sur les canaux,
- les actions de conduite à effectuer,
- les suites du projet SACHEM

Exemples

Voici quelques exemples extraits des interviews [RapportTechnique6] :

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -12 Février 1997 DK (cassette 6A 06'30) :

Ce qu'on n'aura jamais dans SACHEM, c'est la thermodynamique du creuset, parce que c'est un

process qui est lent. On regarde les choses sur 1 semaine, 15 jours, donc ça n'a plus rien à voir avec la conduite temps réel.

⇒ Explication négative: sur SACHEM, on n'a pas ...

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -13 Février 1997 DK (cassette 8A 49'40) :

Vues CHT 1 & 2: La manière dont on regarde les choses sur ces 2 vues, elle permet de voir qu'il y a un phénomène qui est détecté à 12H04, le phénomène est marqué ici, avec depuis le 12H04 le plus fort qualificatif, en l'occurrence hausse brutale. C'est entre le temps présent et la dernière heure, donc là depuis 30mn. Ici (vue 1) on voit le temps présent à 12H36, 32 mn plus loin, tu vois la tendance revenue à la baisse, les fortes hausses ont disparu sur 4 plaques. Donc tu as bien l'image de ce qui s'est passé dynamiquement sur le fourneau. Tu n'en as pas besoin d'une manière pointue actuellement mais tu as une détection qui est à la minute. [...] La tendance, tu l'as sur cette vue là (CHT1), où tu as tout ce qui est en cours sur la cuve. [...] Tu as bien une notion dans le temps d'informations différentes.

⇒ Explication de la philosophie générale des 2 vues, avec l'exemple du cas présent.

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -12 Février 1997 DK (cassette 6A 26'00) :

L'alarme sur laquelle tu as cliqué, c'est hausse brutale de la charge thermique des parois sur les rangs 3 à 6 génératrices 34 à 39. Donc je commence par t'expliquer cette vue là (CHT2) peut-être que c'est plus facile pour expliquer. Ce que tu connais sur le niveau III [...]

Extrait- Rommelaere & Tischendorf -4 Février 1997 DK (cassette 1 12'30) :

On a un rapport qui a été clairement introduit par SACHEM, c'est la température du pic sur la température de Gaz Gueulard. Le rapport doit être compris entre 3,5 et 5, si tu as température du pic 600°C, la température Gaz Gueulard environ 150°C, ça fait un rapport de 4.

⇒ Choix d'un exemple pour expliquer une nouvelle donnée (une fois son introduction justifiée).

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -12 Février 1997 DK (cassette 6A 48'40) :

Op : Je ne suis pas inquiet, mais je me demande si on aura vraiment le temps de l'utiliser !

⇒ Cette inquiétude est fortement présente !

⇒ Quid de l'explication si les opérateurs n'ont déjà pas le temps de regarder les justifications et ÉNQUET ?

Extrait- Rommelaere & Tischendorf -5 Février 1997 DK (cassette 3A 24'00) :

A propos des consignes, des actions non habituelles pour les opérateurs :

Par exemple les actions sur le cé dage des fourneaux, il y a des moments où tu as un pic trop bas. Il est classique d'avoir des températures basses les mois d'hiver, il est fréquent que les marais soient saturés d'eau, le coke arrive à 7, 8% au gueulard, et il te *tue la température*, les matières. On va modifier le conditionnement du vent pour baisser la température de flamme et augmenter la température du gaz au gueulard. Pourquoi? Parce que tout ce qui est en périphérie concerne la plus grande surface du fourneau donc en pourcentage le plus gros volume de gaz passant, donc on va réhausser de 20 ou 30 ce côté là, du coup la température globale du gueulard va monter.

⇒ Bon exemple de conduite d'optimisation.

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -12 Février 1997 DK (cassette 6A 02'45) :

Le HF est découpé en huit morceaux. C'est comme le tableau d'une voiture, tu regardes le niveau

de l'essence, tu regardes le compte-tours ...

- répartition gazeuse;
- état parois : c'est les sollicitations des pertes thermiques;
- conditions aux tuyères : c'est le conditionnement du vent, débit, température, oxygène, charbon, vapeur etc.
- état thermique;
- tout ce qui concerne la descente des charges;
- la perméabilité : c'est l'aptitude au fourneau à prendre le vent;
- la vidange du creuset : est-ce que l'on évacue bien l'ensemble des masses liquides fonte et laitier;
- qualité fonte et laitier.

⇒ Description rapide des informations disponibles dans chaque rubrique.

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -12 Février 1997 DK (cassette 6A 08'45) :

Lorsque tu as une invalidation critique sur descente des charges, c'est par exemple parce que tu n'as plus la sonde des matières. Si cette sonde n'est pas disponible, tu ne peux plus détecter le niveau.

⇒ Description des invalidations critiques.

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -12 Février 1997 DK (cassette 6A 34'00) :

Il fait la moyenne par rapport à quoi ? Il prend quelle donnée en compte ?

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -12 Février 1997 DK (cassette 6A 15'20) :

Vue DCH :

Là il te montre le bilan fonte enfournée et mesurée sur le plancher de coulée, pour voir si tu as un problème de rétention.

⇒ Explication du rôle du canal : il sert à voir si il y a problème de rétention.

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -12 Février 1997 DK (cassette 6A 15'20) :

Vue DCH : si tu as un problème de rétention, la pression va « s'envoyer en l'air », si la pression « s'envoie en l'air », la perméabilité d'étalement va diminuer; si c'est plus grave, si ça dure, la pression augmente, la perm globale va diminuer. Donc tu as tout un scénario qui est enclenché. On prend l'exemple que tu as là, on voit que c'est une perte de fond ponctuelle, donc c'est une panne de chargement. Si tu regardes ici ? là il n'a pas cédé un moment, il a ralenti le fourneau. De fait tu vois la pression circulaire qui descend en ralenti selon les paliers de ralentissement du débit vent, ici tu vois qu'il commence à ralentir l'allure parce qu'il rattrape le fond, tu vois le palier là ?

⇒ Déroulement d'un scénario d'événements à partir de la lecture *intelligente* de plusieurs canaux mis en parallèle → débouche sur le diagnostic !

⇒ Focalisation sur un point précis de la courbe.

Les questions et les réponses étaient donc nombreuses et couvraient tous les aspects, y compris des aspects qui ne nous intéressaient pas directement, comme la plus-value du système SACHEM, ou la modification de la structure des équipes pour faire face à son introduction dans les activités des opérateurs.

Néanmoins, nous avons cherché à intervenir le moins possible pour laisser les discussions suivre leur cours. C'est lors de la phase d'autoconfrontation que nous avons obtenu le plus d'exemples et le plus d'informations sur les choix d'explication.

Synthèse des interviews

Les différentes vues de SACHEM ont été décrites dans différents exemples, mais elles ont surtout servies de support à des explications concernant d'autres items, ou objets. C'était les vues de conduite, de justification, des visées et PTF.

Les explications concernant l'expertise du métier, la manière de conduire le HF apparaissent dans la plupart des exemples [RapportTechnique6].

Nous nous sommes servis des interviews pour voir quelles vues de l'interface étaient particulièrement importantes pour la conduite, quels mécanismes étaient expliqués, quels phénomènes posaient des problèmes aux opérateurs, l'importance de la description du choix des conducteurs présentés, l'importance des données, l'importance des mécanismes d'invalidations, la nature des invalidations, l'importance de la focalisation sur les courbes présentées, l'accès à la fonction d'explication ...

Ces points seront plus particulièrement décrits dans le paragraphe 8.5.

Interviews complémentaires d'experts

Nous avons également effectué des interviews ponctuels avec des experts pour obtenir des exemples d'explication complets, ou compléter les informations recueillies lors des interviews.

Nous avons pour cela constitué des fiches descriptives du recueil contenant [RapportTechnique4] :

- Référence du recueil : personnes, poste, contexte, date, lieu, durée, source,
- Destinataire de l'explication : destinataire, niveau du destinataire, prérequis pour la compréhension,
- Sujet : item expliqué, finalité, but poursuivi, type de l'explication,
- Déclenchement de l'explication : motivation, besoin initial, moyen d'accès, point d'entrée,
- Stratégie du discours explicatif : du général au particulier, du particulier au général, avec aparté, en entonnoir, avec choix de bifurcation ...
- Propriétés de l'explication : structuration, précision, continuité, redondances, concision, pertinence, compréhension, généralité, spécificité ...
- Style de l'explication : technique, théorique, pragmatique, avec un ou plusieurs exemples ...
- Formalisme de représentation : texte, schéma, diagramme, texte schématisé ...
- Influence du contexte : influence du contexte pendant le recueil (en quoi il influe sur l'explication recueillie), influence du contexte sur la génération de l'explication, contexte bonne conduite générale, RCA à traiter, problème en cours, phénomène(s) détecté(s), HF en allure, marche optimisée, personnel réduit (Poste 3) ...
- Interaction avec l'utilisateur : lors du recueil, lors de la consultation de l'explication, Question/Réponse, Question/Réponse incrémental, dialogue dirigé par l'utilisateur ...
- Positionnement par rapport aux outils existants : les Justifications, XPerdoc, le Didacticiel, le manuel utilisateur, HYREF (version hypertexte des reformulations XPRF), complémentaire en prolongeant l'outil existant, complémentaire avec rappel, redondante mais sous une autre forme, orthogonale (différente), l'explication peut être un point d'entrée vers un des outils pré-cités pour plus d'information,
- Appréciation de l'opérateur : explication compréhensible (respectivement incompréhensible), explication complète (resp. incomplète), explication suffisante même si incomplète,

- explication comportant des parties inutiles (resp. pas assez développées), explication trop détaillée (resp. pas assez détaillée), explication trop profonde (resp. pas assez profonde), explication en attente d'informations complémentaires,
- Production de l'explication : explication statique ou dynamique, éléments d'architecture, généralisation à d'autres items.

Ainsi que l'on peut voir, ces éléments sont les points qui nous ont servi précédemment, la majorité des éléments cités ont été décrits dans la partie précédente. Ils ont servi à la réalisation effective de la fonction d'explication pour SACHEM et seront repris dans le paragraphe 8.5.

8.4.7 Autoconfrontations pour le recueil de connaissances explicatives

« L'autoconfrontation consiste à visionner les films (paroles et gestes doivent être étudiés) des séances de recueil avec les acteurs pour critiquer les différentes paroles ou attitudes. Elle doit avoir lieu peu de temps après la deuxième phase (maximum une semaine), la meilleure solution étant de faire toutes les séances de recueil puis toutes les séances d'autoconfrontation, pour que les acteurs n'adaptent pas leurs discours d'un intervenant à l'autre.

Après épiluchage des dialogues, ces séances doivent avoir lieu avec les mêmes acteurs (en trio) maximum une semaine après, éventuellement croisées avec les séances de dialogue. Elle peuvent durer deux à trois heures. » [Rapport Technique2]

A la suite des séances d'interviews, nous avons réalisé des analyses des dialogues enregistrés. Nous avons montré (c'est-à-dire visionné) des séquences de dialogues enregistrés et questionné les intervenants sur leurs discours ou leurs gestes.

Autoconfrontations réalisées

Les autoconfrontations ont été réalisées le lendemain des interviews. Certaines parties des dialogues filmés ont été sélectionnées et discutées avec les deux intervenants, l'expert et l'opérateur. Nous avons donc réalisé quatre autoconfrontations à la suite des quatre interviews.

Problèmes traités par les explications

Les problèmes traités sont les mêmes que ceux de la phase d'interviews. Néanmoins nous n'avons pas cherché à revenir sur les dialogues concernant la plus-value du système ou la description de son fonctionnement. Les exemples recueillis sont donc plus focalisés par rapport à nos besoins.

Exemples

Voici quelques exemples extraits des autoconfrontations :

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -12 Février 1997 DK (cassette 8A 35'30) :

La veille, j'avais présenté à Rommelaere la présentation normale de la justification, en commençant par CHT1, en point d'entrée tu as bien un phénomène hausse brutale rangs 3 à 6 génératrices 34 à 39, je l'ai pris par la main pour lui expliquer déjà ce qu'était un phénomène HF sur la charge thermique, les 6 plaques qui évoluent dans le même sens, les températures, les contrôles de cohérences, les surfaces élémentaires. Puis du coup j'ai une éclatée du fourneau où tu as plein de dissymétries, alors le gars, il dit « tu me dis ça et tu me montres autre chose » ! La veille j'avais bien montré le phénomène pour que le gars se racroche à la détection, il est 12H36

alors que le phénomène est daté de 12H04, je me suis rendu compte que la visibilité de ce que je lui montrais n'était plus conforme avec ce que l'on allait voir de l'autre côté : les phénomènes signaux avec le plus fort qualificatif dans la dernière heure.

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -13 Février 1997 DK (cassette 8A 55'40) :

A propos des légendes des Vues CHT:

Question : Lors du dialogue, vous avez dit «On manipule plein d'informations implicites», qu'entendiez-vous par là? (film visionné)

Expert : Effectivement, on manipule plein d'informations implicites : si tu as un passage de bloc, par exemple tu as un dégarnissage, ça veut dire que tu sais que des blocs vont tomber, tu vas les voir passer à l'aplomb de ces tuyères, et tu sais que si tu coules sur ce trou, « c'est pour ta pomme à couler dans 2H ». Si tu as un dégarnissage dans une zone où tu ne coules pas, par définition, c'est une zone où le creuset est moins bien vidé, tu sais que si tes blocs tombent et si c'est éventuellement un garni important, tu peux avoir des remontées avec des tuyères qui barbouillent. Si c'est dans une zone où tu as les 2 trous de coulée en exploitation, que tu es en train de couler sur l'un et que tu vas couler l'autre après, tu sais que c'est forcément une zone qui est bien vidée du creuset et tu dis bon on va pas en faire un vélo (sic) ça va bien se passer.

Question : Et c'est des conséquences que tu déduis de toute la vue?

Expert : Là, rien que la légende, les informations qui sont là avec les canaux qui sont au dessus.

⇒ Beaucoup d'inférences à partir de ces quelques explications spaciales de la légende.

Extrait- Fauchoit & Tischendorf -13 Février 1997 DK (cassette 8A 03'30) :

Question : La différence entre phénomène HF et phénomène signal correspond-t-elle à une notion que vous utilisez à peu près ou est-ce quelque chose de complètement nouveau pour vous?

Opérateur : Non c'est quelque chose qu'on vit tous les jours au niveau de la marche du Haut Fourneau. On a un défaut qui sort, on a un problème, on essaie tout de suite de savoir d'où ça provient.

⇒ La différence de granularité entre les phénomènes Signaux et HF semble comprise, ou au moins ne choque pas les opérateurs.

Synthèse des autoconfrontations

Ainsi que nous l'avons expliqué au paragraphe 4.2 décrivant le mécanisme de l'autoconfrontation, cette phase d'analyse des exemples recueillis est généralement plus riche que la phase d'interviews non dirigés. Cela a également été notre cas, nous avons obtenu des justifications des choix pris précédemment, des explications plus synthétiques. Nous avons également questionné les opérateurs à propos des concepts ou notions utilisés par l'expert.

8.4.7.1 Résultats du protocole de recueil des connaissances explicatives

Le protocole de recueil en trois phases d'observations, d'interviews et d'autoconfrontations est venu compléter les analyses de la documentation experte. Nous avons mentionné au paragraphe 8.4.4.2 les résultats attendus. Nous allons rapidement revenir sur chacun d'eux et l'évaluer.

- **validation du protocole de recueil :** le protocole s'est révélé intéressant et riche. Nous avons constaté l'intérêt d'effectuer ces recueils sur des exemples réels, soit en ligne, soit

hors ligne. Nous avons également constaté l'importance de la phase d'autoconfrontation. Les remarques principales ont été intégrées dans la proposition donnée au chapitre 4.

- **Stratégie d'explication** : nous avons cherché à distinguer des stratégies d'explication. Néanmoins nous n'avons pas réussi à distinguer précisément des stratégies particulières différentes en fonction du sujet de l'explication. Nous avons cependant distingué les stratégies d'explications classiques identifiées par les psychologues, comme du général au particulier, avec aparté, etc. Cette remarque est assez classique, dans [Lemaire92c] et à propos des travaux sur le projet AIDE (décrit dans la première partie), l'auteur concluait pareillement sur plusieurs corpus d'explications en médecine.
- **Point d'entrée de l'explication** : le point d'entrée *naturel* des explications a été identifié puisque nous avons pu conclure sur l'importance des explications locales aux principales fonctions du système et des explications globales en complément. Nous reviendrons sur ce point pour l'application SACHEM au paragraphe 8.5.3.4.
- **Niveau de l'explication** : nous nous sommes aperçus que le niveau de profondeur des explications défini à partir des compétences des opérateurs confirmés était tout à fait correct. Il n'est pas utile de donner en priorité des explications sur des données par exemple, néanmoins il est important, voire indispensable que les opérateurs puissent accéder, sous forme de complément ou de rappel à des informations supposées connues. C'est ce que nous proposerons au paragraphe 8.5.3.4 et au paragraphe 8.5.4.1 avec le mécanisme de « en savoir plus » déjà décrit dans la partie précédente.
- **Formalisme de représentation** : lors des explications orales, les discours s'appuient sur des schémas, des illustrations ou des focalisations (par exemple : « *tu vois là sur ce conducteur* »). Il est donc cohérent de proposer du texte structuré complété par des schémas et des positionnements géographiques des problèmes sur le HF.
- **Influence du contexte** : le contexte a une influence sur la détection et les recommandations d'actions. Cette influence est prise en compte dans le système, essentiellement par les qualifications en alarmes et avertissements. Il a également une influence sur les explications, mais, malheureusement, il a été difficile de dégager des invariants.

8.4.8 Evaluation des explications

L'évaluation des explications a eu lieu en direct par les futurs destinataires puisque les opérateurs de conduite ont été interrogés directement sur leur compréhension des explications données par l'expert.

Nous avons également confronté nos propositions d'explications au comité directeur du projet SACHEM et aux experts lors des présentations de la maquette.

Néanmoins, nous n'avons pas mis en place le processus d'évaluation des explications décrit au paragraphe 4.10 puisque la maquette servait essentiellement à vérifier l'étude du besoin, le cahier des charges et les propositions majeures.

Cette évaluation devra être faite lors de la réalisation effective de la fonction d'explication juste avant son intégration définitive dans le système SACHEM.

8.4.9 Structuration et modélisation des connaissances explicatives

La démarche de structuration des connaissances explicatives a toujours été importante lors des recueils.

Lors de la revue des documents techniques, nous avons utilisé la typologie « Concept, Conduite, Détection, Diagnostic, Action » présentée au paragraphe 4.5. Lors des observations, les

questions posées étaient regroupées en plusieurs catégories et plusieurs rubriques comme expliqué au paragraphe 8.4.5. Lors des interviews et des autoconfrontations, enfin, nous avons établi une liste des points concernés par les questions et réponses posées, ainsi que des fiches descriptives de recueil lors des interviews complémentaires d'experts comme présenté au paragraphe 8.4.6.

Les explications recueillies ont donc toujours été enregistrées dans un souci de structuration. La structuration en explication locale et globale décrite dans la partie précédente nous y a beaucoup aidés.

Néanmoins nous n'avons pas établi de modèle général d'explication, c'est une étape que nous pouvons réaliser maintenant avec le recul obtenu par le recueil et la réalisation du système explicatif.

8.4.10 Volume des connaissances explicatives

Comme nous l'avons déjà mentionné dans la description du système SACHEM, les différentes connaissances expertes de conduite sont réparties dans les 500 000 lignes de code du système (5% du code pour l'acquisition des données, 15% pour l'acquisition des données, 32% pour la détection de phénomènes en fonction du contexte, 9% pour les recommandations d'action, 21% pour l'interface homme-machine, 10% pour les accès dans les bases de données et 9% pour le *reporting* dans la version V2.0 du système).

Il est difficile d'évaluer le volume des connaissances explicatives par rapport aux connaissances expertes. Néanmoins, à partir de notre expérience pour SACHEM, nous pouvons évaluer les connaissances explicatives à environ 20% maximum des connaissances de résolution. Ces connaissances explicatives sont moins nombreuses, plus difficile à identifier et concernent tous les problèmes de résolution délicats. C'est sur les connaissances de résolution de haut niveau (détection, état du procédé, diagnostic et choix de l'action à effectuer) que portent les explications. Par exemple, dans SACHEM, on n'expliquera pas les mécanismes de reconnaissance des formes, d'acquisition des données ou d'agrégation des données numériques alors que les mécanismes mis en œuvre ne sont pas triviaux et représentent presque la moitié du code de la version V2.0 du système.



8.5 Réalisation et intégration de la fonction d'explication dans le système SACHEM

Ce paragraphe reprend les éléments du chapitre 5. Les premiers paragraphes ont été traités dans le paragraphe 8.3 concernant le cahier des charges de la fonction d'explication pour SACHEM.

8.5.1 Des explications : A qui? Pourquoi?

8.5.1.1 Finalité de la fonction

A partir de la finalité précisée au paragraphe 8.3.2.1 concernant le cahier des charges, on peut distinguer trois niveaux de description :

- les justifications pour agir (traitées dans la fonction de justification);
- les explications pour agir : la fonction d'explication est destinée à l'aide à la conduite en temps réel (en ligne) en complément de la fonction de justification, c'est la demande majeure ;
- les explications pour la formation : la fonction d'explication est hors ligne, destinée à la formation à l'aide à la conduite avec des données réelles rejouées, par exemple dans un objectif d'optimisation, ces explications ne sont pas demandées prioritairement, mais apparaissent néanmoins comme un besoin.

8.5.1.2 Destinataire cible

Le destinataire cible des explications est l'opérateur confirmé.

8.5.1.3 Interactivité avec l'utilisateur

Les contraintes d'interaction ont également été identifiées dans le cahier des charges, elles restreignent les interactions entre le système explicatif et l'utilisateur.

8.5.2 Des explications : Quoi? Sous quelle forme?

8.5.2.1 Contenu des explications

Le contenu des explications a été identifié assez tôt, « *Pour les experts, une explication dont le contenu est au bon niveau est une des descriptions de l'outil XPERDOC* » [RapportTechnique3].

8.5.2.2 Niveau des explications

Dans la même philosophie que pour la fonction de justification, les informations transmises à l'utilisateur par la fonction d'explication sont censées être pertinentes et suffisantes. L'utilisateur n'a pas la possibilité de choisir les informations qu'il souhaite consulter (il choisit uniquement une vue ou un type de vue). Cependant pour s'adapter au mieux aux besoins disparates du collège d'utilisateurs, il est utile de prévoir un deuxième niveau d'explication, c'est-à-dire une deuxième vue d'explication plus détaillée accessible à partir d'une première vue d'explication et comportant des informations voire des liens directs vers d'autres fonctions (l'outil hypertexte de consultation de l'expertise validée, le manuel utilisateur, les vues d'invalidation, les vues de rubrique, le résumé pour prise de poste, le didacticiel ...). Ce deuxième niveau d'explication, voire un troisième ou plus, est indispensable dans l'optique « explications pour la formation ».

8.5.2.3 Forme des explications

Le « texte schématisé » est la forme qui a été retenue pour les explications. Il peut être complété par des schémas.

Néanmoins, dans les premières versions de la maquette de la fonction, pour focaliser les remarques sur le contenu des explications et non la forme, c'est généralement du texte simple qui a été choisi.

Cette forme d'explication est la plus simple, mais la possibilité d'ajouter à chaque vue d'explication une brève bande-son qui synthétise les informations transmises est une éventualité très intéressante que nous avons évoquée plusieurs fois.

8.5.3 Des explications : Comment les créer ?

8.5.3.1 Liens avec les autres fonctions d'aide et d'apprentissage

Au sein du système SACHEM, de nombreuses fonctions ou de nombreuses vues sont liées avec la fonction d'explication :

- les vues de justification,
- le didacticiel,
- le manuel utilisateur,
- l'aide en ligne,
- la formation des utilisateurs,
- les vues rubriques,
- la vue de conduite,
- les vues de synthèse,
- XPerDoc, l'outil hypertexte de consultation de l'expertise validée,
- l'outil HYREF,
- résumé pour prise de poste ...

La fonction d'explication présente plusieurs possibilités d'interactions avec ces fonctions ou ces vues. Elle peut compléter certaines informations, reprendre des éléments de description ou comporter un lien direct vers une de ces fonctions :

- la fonction d'explication peut être appelée depuis cette fonction (la vue de conduite ou les vues de justification, par exemple),
- la fonction d'explication peut comporter un lien vers cette vue ou cette fonction (les vues de justification, les vues rubriques, l'outil hypertexte XPerDoc ...),
- la fonction d'explication peut comporter des informations extraites de ces fonctions (la formation des utilisateurs, le didacticiel, l'outil hypertexte XPerDoc ...),
- la fonction d'explication peut, par les recueils ou les discussions, permettre de trouver de nouvelles informations à insérer dans une fonction ou une vue (formation des utilisateurs, vues de synthèse, résumé pour prise de poste ...).

8.5.3.2 Point d'entrée des explications

Nous proposons de construire des explications locales et des explications globales.

Les premières concernent les explications de la détection et des recommandations d'actions pour l'instant, elles concerneront le diagnostic et l'état du procédé lorsque ces fonctions seront réalisées. Plusieurs possibilités d'appel ont été analysées : depuis un menu, depuis la vue de conduite ou depuis les vues de justification.

Les explications locales sont attachées à un type de résultat. Or chaque résultat comporte une justification qui doit être vue obligatoirement par l'opérateur (c'est-à-dire intégrée par lui). Ces justifications ont un objectif proche des explications, il paraît donc raisonnable de choisir les vues de justification comme point d'appel des explications.

Notre choix a donc été celui-ci : les vues d'explication sont appelées depuis les vues de justification.

Les explications donnent une vision synthétique ou globale du procédé, nous avons alors choisi d'accéder à ces explications depuis la vue de conduite ou la vue ETHF (Etat tendance du HF).

Si les explications globales consistent en une agrégation des explications locales, il est logique de les appeler depuis la vue de conduite. En revanche si les explications globales s'appuient sur un niveau plus synthétique que les phénomènes HF, c'est-à-dire sur une dizaine de problèmes majeurs, il est utile d'avoir une vue synthétisant l'état des différents problèmes et permettant d'accéder aux explications. C'est ainsi que nous avons proposé une vue ETHF comportant la synthèse des problèmes et accédant aux explications globales [Lejeune97].

8.5.3.3 Comprendre ou prolonger le raisonnement

Les explications proposées doivent permettre de « dérouler » ou de « prolonger » le raisonnement, ainsi qu'il a été expliqué au paragraphe 5.3.3.

8.5.3.4 Construction des explications

Nous nous basons, pour les paragraphes suivants, sur le document de travail [RapportTechnique7] (non public).

8.5.3.5 Explications des résultats de détection

Les explications locales des résultats de détection sont accessibles depuis les vues de justification des phénomènes détectés. Les explications données concernent donc en priorité un phénomène HF particulier appartenant à une rubrique donnée.

Les informations données peuvent concerner :

- des rappels sur la rubrique : les objectifs de la rubrique, les principes généraux, les différents types de phénomènes traités,
- le phénomène étudié : le type du phénomène (niveau, baisse...), la description rapide du phénomène si nécessaire,
- des éléments pour l'action : l'utilisation du phénomène pour l'action, les liens avec d'autres phénomènes HF;

et de façon moins prioritaire :

- la vue de justification associée (du même phénomène HF) : le choix des conducteurs présentés, des rappels sur les conducteurs utilisés (par exemple la définition de la poutre représentative),
- les mesures utilisées, les invalidations,
- les phénomènes signaux ayant permis la détection de ce phénomène HF,
- des idées de raisonnement ou de diagnostic concernant le phénomène ou la rubrique,

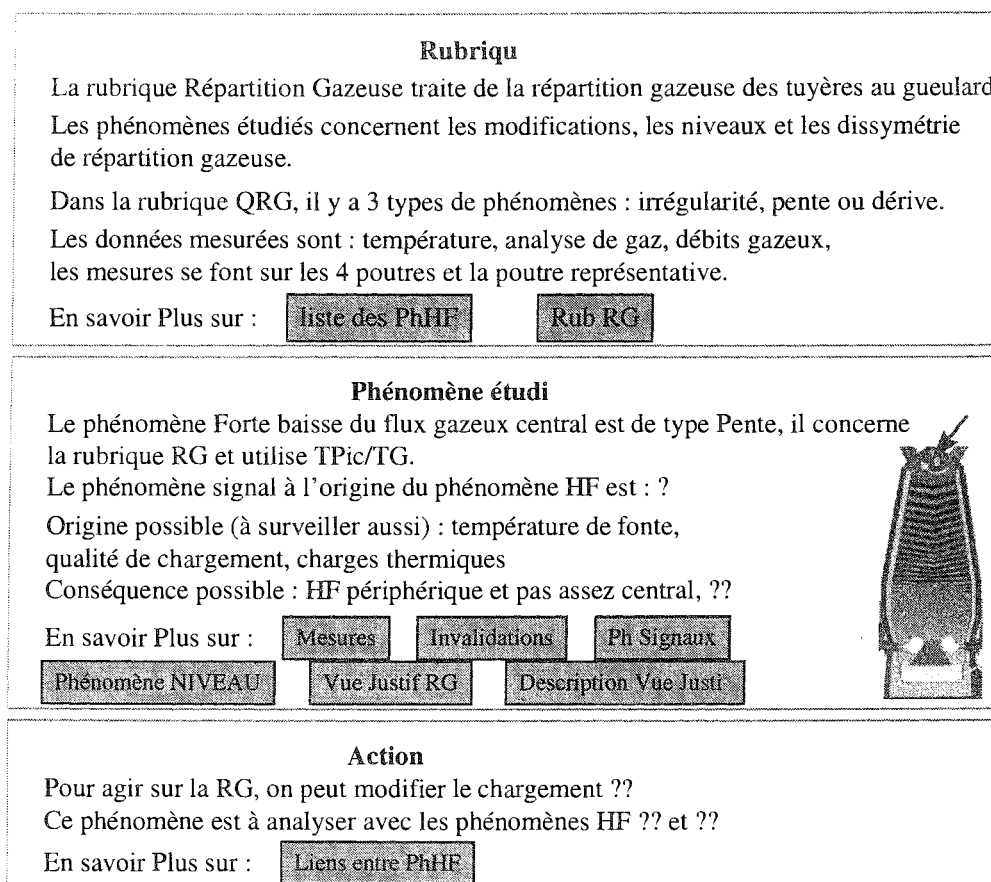


FIG. 8.8 – Exemple d'explications de la détection de SACHEM

- des informations provenant directement de, ou un lien vers les fonctions ou vues suivantes : XPerDoc, la vue « Aide Rubrique », la vue « Invalidations », la vue « Liste des phénomènes passés ».

Dans le cas d'une explication hors-ligne, les informations données seraient plus complètes et pourraient concerner : des rappels plus importants sur la rubrique, le processus de validation des données, le processus de détection (passage données depuis le Niveau III, puis phénomène signal et enfin phénomène HF), des mises en exergue de points particuliers sur les courbes des vues de justification (type bulle d'aide, loupe ou post-it comme sur le logiciel ENQUET).

Nous proposons d'inclure dans l'explication de la fonction de surveillance/alarme les informations suivantes (nous utilisons pour cela le mécanisme « En savoir Plus » présenté au paragraphe 5.4.4.1) :

- **Rubrique**
 - objectifs de la rubrique,
 - principes généraux,
 - des idées de raisonnement ou diagnostic sur la rubrique,
 - les différents types de phénomènes étudiés,
 - En savoir Plus sur : la liste des phénomènes étudié, les principes plus détaillés (extrait de XPerDoc ou une vue remaniée),

– **Phénomène étudié**

- le type de phénomène (Niveau, ...),
- description du phénomène,
- origine (le ou les phénomènes signaux),
- les conséquences possibles,
- En savoir Plus sur : la description d'un phénomène Niveau, les mesures utilisées, les invalidations, les phénomènes signaux, la vue de justification, la description du choix des conducteurs utilisés dans cette vue de justification, des rappels sur les conducteurs,

– **Action**

- comment utiliser le phénomène pour agir (action réflexe, liens, ...),
- En savoir Plus sur : les liens entre les phénomènes.

La figure 8.8 présente un exemple d'explication de ce type structurée en trois parties. Elle concerne le phénomène de forte baisse du flux gazeux central appartenant à la rubrique de répartition gazeuse. Le contenu métallurgique de cet exemple n'a pas été validé par un expert, c'est pourquoi certaines parties comportent un point d'interrogation.

8.5.3.6 Explications des résultats concernant l'état présent du procédé

Cette fonction est en cours de réflexion pour le système SACHEM. Il nous est donc difficile de proposer des explications concernant ces résultats. Pour la réaliser, nous nous baserons sur le paragraphe 5.3.4.3.

Néanmoins, nos travaux sur les explications globales et l'introduction du niveau des problèmes (voir le paragraphe 8.5.3.9 des explications globales) nous ont amenés à travailler sur la fonction ETHF qui pourrait devenir cette fonction d'état du procédé.

8.5.3.7 Explications des résultats de diagnostic

De nombreuses réflexions se déroulent en ce moment au sein du projet SACHEM pour mettre en place une fonction de diagnostic des causes profondes. Les explications seront donc amenées à expliquer les diagnostics possibles ou à permettre de comprendre le graphe des causes. A l'heure actuelle, la forme de cette fonction n'est pas arrêtée, il est difficile de faire une proposition cohérente. De la même façon que pour les explications concernant l'état du procédé, nous nous baserons sur les propositions du chapitre 5, et plus particulièrement le paragraphe 5.3.4.4.

On pourra se baser sur les travaux sur les chaînes causales effectués à la suite des nôtres sur le graphe de Duperray (décrits au paragraphe 8.4.3.2). D'après ces travaux, dus à Magali Tardif et Marc Le Goc, toute la connaissance des XPRF sur le diagnostic est organisée autour de quatre problèmes : Wu*-Température de fonte, Mu-Omega, K2O et fuite d'eau. Le but était d'explicitier toutes les chaînes causales disponibles afin de mieux cerner ces quatre problèmes identifiés par M. Duperray. Ils ont ainsi tiré sept sous-problèmes correspondant plus ou moins aux différentes rubriques de SACHEM : DCH (descente des charges), Perm (perméabilité générale et locale), QCharb (qualité du charbon), BilanRet (bilan de rétention de la fonte), QF (qualité de la fonte), TParois (température des parois) et ZDF (zone de fusion). La figure 8.9 présente un schéma synthétique des liens entre les sous-problèmes et les problèmes, extrait de ces travaux. Ce schéma a été élaboré par Magali Tardif à partir de la version remaniée du graphe de Duperray et de la liste des phénomènes HF.

Les 4 problèmes et leurs origines.

Les 7 sous -problèmes $\longrightarrow$ Les 4 problèmes

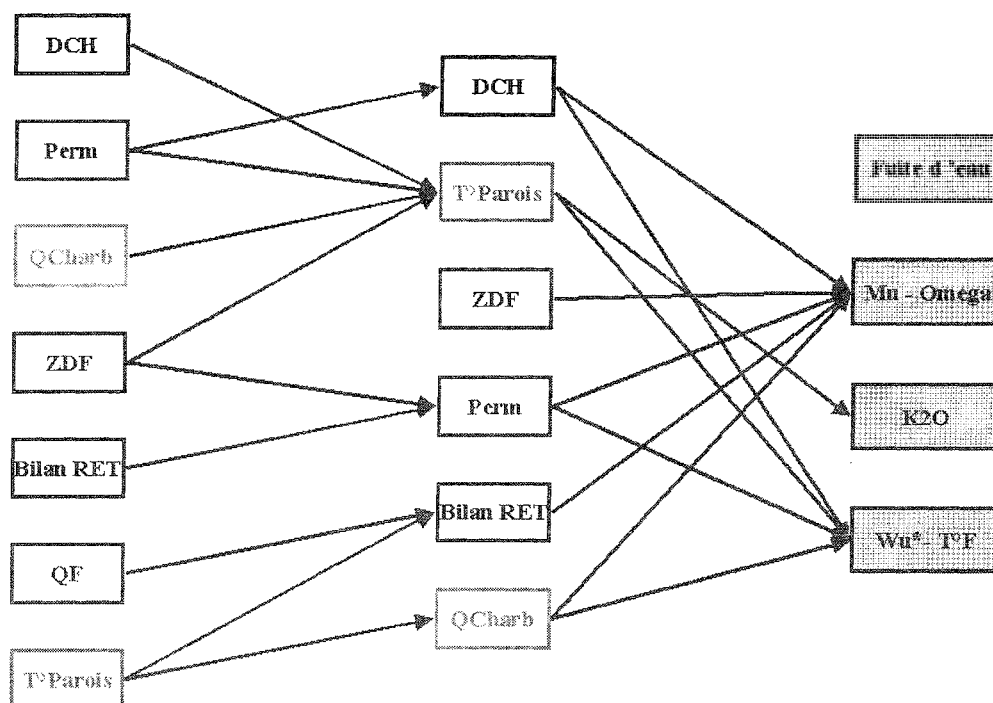


FIG. 8.9 – Le passage des sous-problèmes aux problèmes majeurs, d'après Duperray

8.5.3.8 Explications des résultats concernant l'action à entreprendre

Les explications locales des résultats de recommandation d'action sont accessibles depuis la vue de justification de la recommandation d'action. Les explications données concernent donc en priorité la recommandation globale proposée.

Les informations données peuvent concerner :

- l'actionneur prioritaire,
- l'actionneur choisi,
- les conséquences attendues de l'action (qualitativement et temporellement),
- l'état courant du HF,
- la stratégie employée,
- le graphe causal : origine de la dégradation qui a amené une RCA, diagnostic ...

et de façon moins prioritaire :

- la construction de la RCA : RCA apériodique et RCA périodique, utilisation des modèles ITHF ou MMHF, ...
- des explications négatives : pourquoi telle RCA est moins bien ou n'a pas été choisie.

Nous proposons d'inclure dans l'explication de la fonction de recommandation d'action les infor-

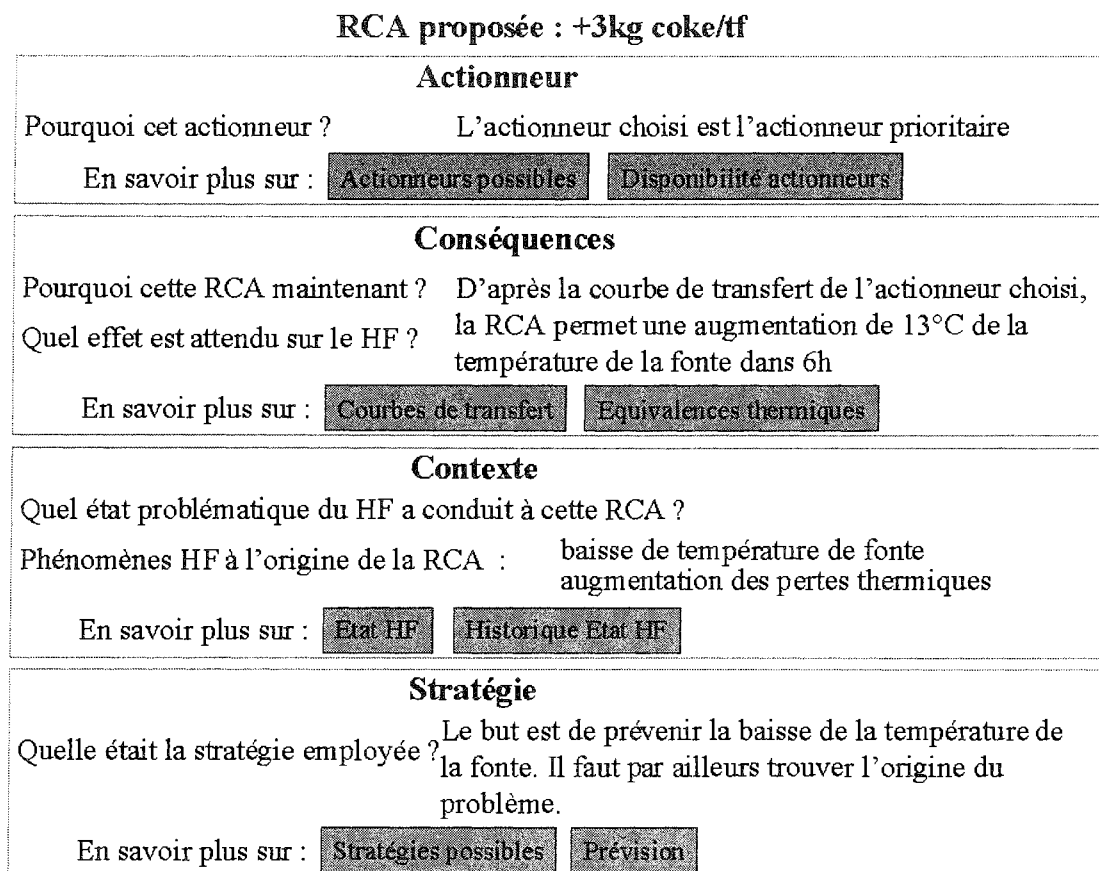


FIG. 8.10 – Exemple d'explications des recommandations d'action de SACHEM

mations suivantes :

- **Actionneur**
 - Pourquoi cet actionneur ?
 - Pourquoi l'actionneur prioritaire n'a pas été choisi ? (dans le cas où il n'a pas été choisi)
 - En savoir Plus sur : les différents actionneurs possibles, les disponibilités des actionneurs,
- **Conséquences**
 - Pourquoi cette recommandation maintenant ?
 - Quel effet est attendu sur le HF ?
 - En savoir Plus sur : les courbes de transfert des actionneurs,
- **Contexte**
 - Quel état problématique du HF a conduit à cette recommandation ?
 - En savoir Plus sur : l'état complet du HF, l'historique de l'évolution du HF,
- **Stratégie**
 - Quelle était la stratégie employée ?
 - En savoir Plus sur : les stratégies possibles, des idées sur la prévision.

La figure 8.10 présente un exemple d'explication de ce type. Cet exemple n'a pas été validé sur le contenu métallurgique, c'est pourquoi certaines parties ne sont pas remplies.

8.5.3.9 Explications globales

Nous proposons que les explications globales se basent sur les problèmes en cours sur le procédé plutôt que sur une agrégation des explications locales.

Cette notion de problème plus synthétique que les phénomènes HF a été clairement remarquée comme le support prioritaire des explications pendant les recueils. Ce n'est pas une idée nouvelle, d'autres travaux avaient mis en évidence l'intérêt et l'importance des problèmes. Par exemple dans [Thirion et al.95], on peut trouver : « *certaines problèmes process mettent en jeu plusieurs rubriques. Il est souhaitable de favoriser une vision intégrée des problèmes en donnant une qualification du problème en lui-même et en ne renvoyant pas le conducteur à l'exploration des rubriques concernées.* » Nous pensons donc que ce serait un support adéquat pour les explications globales.

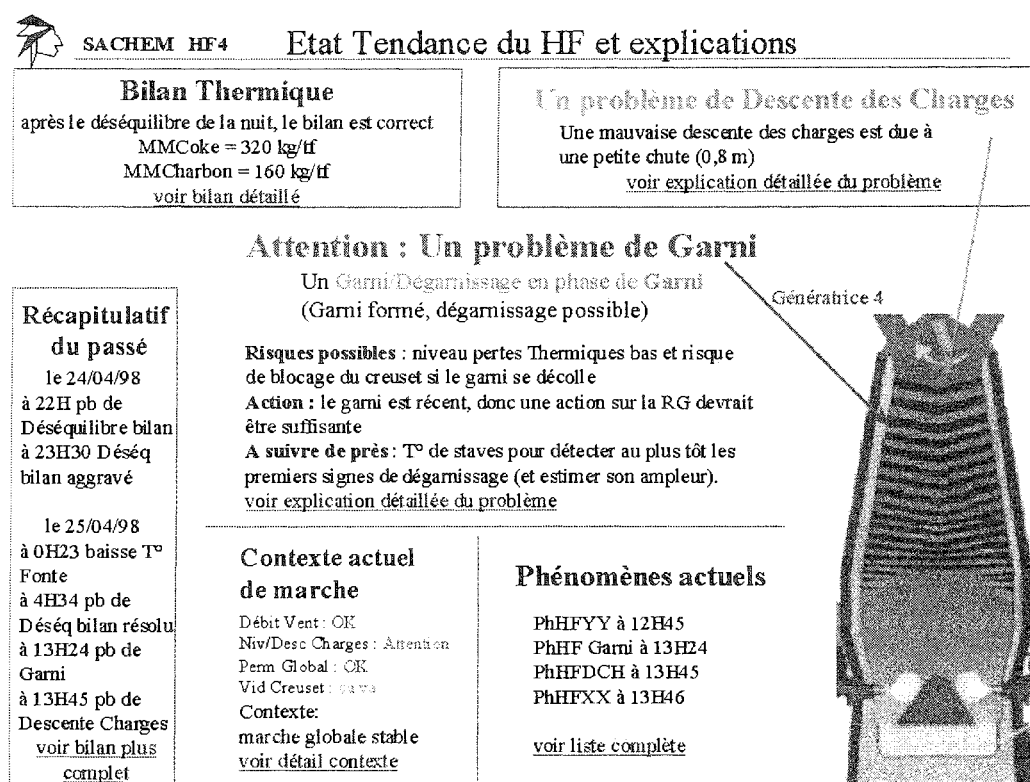


FIG. 8.11 – Exemple de vue d'explication globale

Nous proposons d'accéder aux différents problèmes par une vue de synthèse des problèmes. Cette vue est alors le meilleur moyen de transmettre des explications globales.

Elle comporterait des informations fixes comme le nombre de problèmes et de phénomènes HF détectés, avec un récapitulatif sur les dernières heures ou les dernières 24 heures. Elle peut se baser sur les variables de synthèse de la vue ETHF (débit vent, niveau et descente des charges, perméabilité globale, vidange creuset), comme la vue de la maquette à la figure 8.19 page 203. La figure 8.11 présente un exemple de vue d'explication globale sur le principe d'une « Une de Journal ». Les problèmes actuels (c'est-à-dire en cours) et récents sont répertoriés puis classés.

En fonction de l'importance de chacun sur la conduite du HF, une hiérarchie est établie entre ces problèmes pour mettre en valeur les plus importants. Dans l'exemple choisi, le problème de Garni est considéré comme le plus problématique pour la conduite. Il occupe donc plus de place sur la vue et comporte les informations majeures le concernant (résumé, risques possibles, action, suivi). Le problème de descente des charges est considéré comme moins important, le problème de bilan thermique est maintenant résolu, il est néanmoins rappelé.

Cette explication globale suppose qu'une liste des problèmes majeurs soit établie, avec des informations disponibles pour chacun. Ces informations doivent pouvoir être accessibles même si le problème n'est pas détecté, elles seront différentes en fonction de l'état du problème. Par exemple le principal problème de l'exemple présenté comporte différents états : « Rien à signaler », « Garnissage (garni en formation) », « Garni (garni formé, dégarnissage possible) » et « Dégarnissage ». La dynamique de détection des problèmes pourra reposer par exemple sur les phénomènes HF. Plusieurs phénomènes HF détectés amèneront au changement d'état d'un problème.

On pourra également utiliser les travaux sur les graphes causaux, comme ceux présentés à la figure 8.9, qui identifient quatre problèmes majeurs tirés du graphe de Duperray présenté précédemment.

Cette explication globale suppose également qu'il soit possible d'établir une hiérarchie des problèmes en fonction du contexte, ce qui est *a priori* possible.

Ainsi que nous l'avons expliqué au paragraphe 5.3.4.6, nous proposons de présenter plusieurs informations concernant chaque problème :

1. l'origine du problème : les phénomènes HF qui ont amené à l'apparition de ce problème, le positionnement géographique du problème sur le HF, l'état actuel du problème (qui peut être « Rien A Signaler actuellement ») ;
2. en quoi c'est un problème : l'objectif général concernant le problème, l'état de référence, l'importance relative du problème pour la conduite ;
3. le contexte de marche ou l'état de criticité du HF ;
4. les conséquences du problème, les liens avec les autres problèmes ou les influences sur les autres problèmes ;
5. des éléments pour l'action : soit sous forme de conseil d'action lorsque un tel conseil existe (c'est-à-dire un résultat de la fonction de conseil d'action), soit, dans le cas contraire, sous forme d'un conseil à suivre dans l'absolu. C'est ce que l'on peut appeler un *bon conseil*, par exemple « En présence d'un problème de garnissage, deux types d'action sont possibles, soit une action sur la répartition gazeuse, soit une charge dégarnissante ». Ce bon conseil est construit de manière statique mais appliqué au contexte. C'est l'opérateur qui vérifie la validité du conseil et qui choisit l'action à entreprendre ;
6. le suivi du problème : la description des capteurs à suivre qui permettent de détecter au plus tôt le problème, ceux qui permettent de suivre l'évolution du problème et ceux qui permettent de vérifier l'effet attendu d'une action effectuée sur le procédé, ces informations sont choisies en fonction de l'état du problème.

Ces informations sont accessibles à tout moment pour chaque problème, soit à partir d'une vue de synthèse, soit directement par une liste des problèmes. Les informations présentées évoluent en fonction de la dynamique des problèmes. La maquette présentée décrit quelques exemples (voir la paragraphe 8.5.6).

8.5.3.10 Production des explications

Les explications sont construites et produites à la demande des utilisateurs. Pour les explications locales aux résultats de détection et de recommandation d'action, les explications sont accessibles depuis les vues de justification. A la demande de l'utilisateur, c'est-à-dire lorsqu'il clique sur le bouton d'explication de la vue de justification, on produit la vue d'explication correspondante. Les explications globales sont accessibles depuis la vue de conduite. De la même façon que pour les explications locales, lorsque l'utilisateur souhaite consulter cette vue d'explication globale, il en exprime la demande en cliquant sur le bouton correspondant. Pour compléter cette vue, il peut aussi aller consulter la liste des problèmes, l'état actuel de chacun d'eux et accéder aux informations détaillées sur chaque problème.

Les différentes vues d'explication sont donc structurées et préparées, en revanche, elle ne sont générées que sur demande explicite des utilisateurs.

Il faudra néanmoins vérifier s'il n'est pas utile de générer automatiquement certaines explications. Cela pourrait se faire lors du changement de poste, pour aider à la prise de poste ou à une heure précise pour un historique.

De même, dans l'optique d'aider l'utilisateur à manipuler l'interface homme-machine, on peut décider de lui rappeler les grandes notions de l'IHM ou la description des principales vues. Ces explications, proche du didacticiel, seraient générées lorsque l'utilisateur effectue des opérations inadéquates (non consultation de la vue de justification, vue de justification laissée affichée pendant plusieurs heures, appel simultané de plusieurs vues identiques ...). Les informations mentionnées seraient extraites du didacticiel ou de l'aide en ligne et ne correspondent pas au but premier des explications. Néanmoins il serait dommage de ne pas les envisager dans la mesure où elles aident l'utilisateur dans sa tâche de conduite.

8.5.3.11 Interactions avec le SBC

Les interactions avec les différentes fonctions de SACHEM ont été mentionnées tout au long de ce chapitre. Elles sont nombreuses, la fonction d'explication repose beaucoup sur le système (ce qui est normal, bien sûr).

Voici un résumé des principales interactions entre la fonction d'explication et les différentes fonctions de SACHEM :

- les explications sont appelées depuis les vues de justification de la détection, les vues de justification des recommandations d'action et la vue de conduite ;
- les vues d'explications reprennent des informations extraites des autres fonctions : l'outil hypertexte de présentation de l'expertise XPerDoc, l'outil HYREF, les vues rubrique, la détection des phénomènes HF, les recommandations d'action, les données numériques, les valeurs des données symboliques ...
- les vues d'explications comportent des liens vers d'autres fonctions : les vues de justification, les vues de synthèse, le didacticiel, l'aide en ligne, l'outil XPerDoc, ...

8.5.4 Des explications : Et après ?

Nous prévoyons de mettre en place les mécanismes mentionnés au paragraphe 5.4 pour faire face à l'évolution des utilisateurs, de leurs besoins, des connaissances, du système et des données.

8.5.4.1 En savoir plus

Lors de chaque explication, comme nous l'avons décrit dans les paragraphes précédents, nous prévoyons un renvoi vers une page plus complète sur les sujets abordés, voire directement sur l'outil concerné. On renverra par exemple l'utilisateur vers le document hypertexte XPerDoc pour les détails de l'expertise et vers le didacticiel pour des problèmes de manipulation du système. Bien sûr, il ne faut pas simplement signaler à l'utilisateur l'emplacement des informations mais accéder directement à ces informations.

8.5.4.2 En présenter moins

Le but est de permettre un mécanisme simple de « fermeture » d'une rubrique ou d'une partie de l'explication donnée qui n'est plus considérée comme prioritaire. Cette partie fermée garde néanmoins un titre et la possibilité d'être accédée, plutôt dans une nouvelle fenêtre créée pour la circonstance.

La décision de *fermeture* d'une rubrique d'information doit être prise par les utilisateurs. Il semble logique que le comité des utilisateurs chargé de la validation du projet prenne en charge ces décisions.

Les décisions doivent être prises en compte et intégrées dans la fonction. Cela nécessite donc une maintenance de la fonction d'explication.

8.5.4.3 En ajouter

De même le comité des utilisateurs chargé de la validation du projet pourra décider d'ajouter des éléments à la fonction d'explication. Cela pourra se faire sur la proposition des experts ou des utilisateurs du système.

Ces décisions nécessitent également une maintenance de la fonction d'explication.

8.5.5 Retour d'expérience sur la mise en place de la fonction d'explication

Comme mentionné au paragraphe 5.4.5, nous proposons d'introduire des mécanismes permettant d'analyser l'utilisation de la fonction d'explication et son impact sur les utilisateurs.

Nous pouvons reprendre les quelques possibilités mentionnées dans la partie précédente ou introduire de nouveaux mécanismes.

8.5.6 Maquettage de la fonction d'explication pour le système SACHEM

La maquette introduite avait pour buts [Lejeune97] :

- l'identification des connaissances :
 - vérifier si les informations données au travers des exemples correspondent au besoin ;
 - vérifier le niveau d'explication des exemples : devons-nous plus expliquer, être plus synthétique ? C'est le choix de l'utilisateur cible et des autres utilisateurs potentiels ;
 - identifier les besoins auxquels la maquette ne répond pas ;
- le choix des moyens de représentation des informations,
- l'étude de la structure de la fonction d'explication :
 - étudier l'architecture globale de la fonction,
 - vérifier les points d'entrée des explications, depuis toute vue de SACHEM ou depuis une fonction unique,
 - étudier les liens de la fonction avec les autres fonctions : la vue de Conduite, les vues de justification, les recommandations d'actions, la vue de prévision de la température de fonte (PTF), le résumé pour prise de poste, la vue ETHF, la vue EGHF, le diagnostic,
 - positionner la fonction par rapport aux éléments ou fonctions qui contiennent des notions d'explication : les justifications, le didacticiel, la formation, le manuel utilisateur, le résumé pour prise de poste, la vue ETHF, le document XPerDoc,
 - étudier les liens de la fonction avec les bases de données BDN, BDS et les bases de connaissances.

Une première maquette destinée à recueillir des exemples d'explications a été réalisée.

La maquette d'interface homme-machine (IHM) a été réalisée suivant un cycle incrémental. Trois versions majeures sont identifiables [Lejeune98] :

1. une maquette d'explication de la détection à partir des phénomènes HF et des justifications,
2. une maquette d'explication des recommandations d'action et des autres vues (résumé pour prise de poste, EGHF, invalidations ...),
3. une maquette d'explications globales à partir de la vue ETHF et des problèmes en cours.

Nous présentons dans les paragraphes suivants la maquette destinée au recueil d'exemples d'explications, ainsi que ces trois versions de la maquette d'IHM.

8.5.6.1 Maquette de recueil des explications

La figure 8.12 présente la vue de la maquette de recueil des explications. Cette maquette est établie à partir de la liste des items sur lesquels peuvent se baser les explications d'après le document [RapportTechnique1] : phénomènes signaux, phénomènes HF, invalidations, alarme, justifications, diagnostic, prévision et recommandation d'action. L'exemple pris concerne les phénomènes HF. La figure 8.13 présente la même vue de la maquette à propos des mécanismes d'invalidation. Les exemples comprennent le besoin exprimé, l'exemple recueilli et les commentaires éventuels. Les exemples sont structurés en plusieurs niveaux d'explications dans l'optique de positionner plusieurs niveaux (voir le paragraphe 5.2.2).

Par exemple, pour les invalidations, au premier niveau, on trouve les mécanismes généraux des invalidations, le deuxième niveau concerne une invalidation précise, au troisième on trouve les raisonnements en présence d'invalidation (c'est-à-dire les canaux de remplacement) et les conséquences sur les phénomènes HF.

Cette maquette a servi au tout début pour structurer le recueil des exemples d'explications.

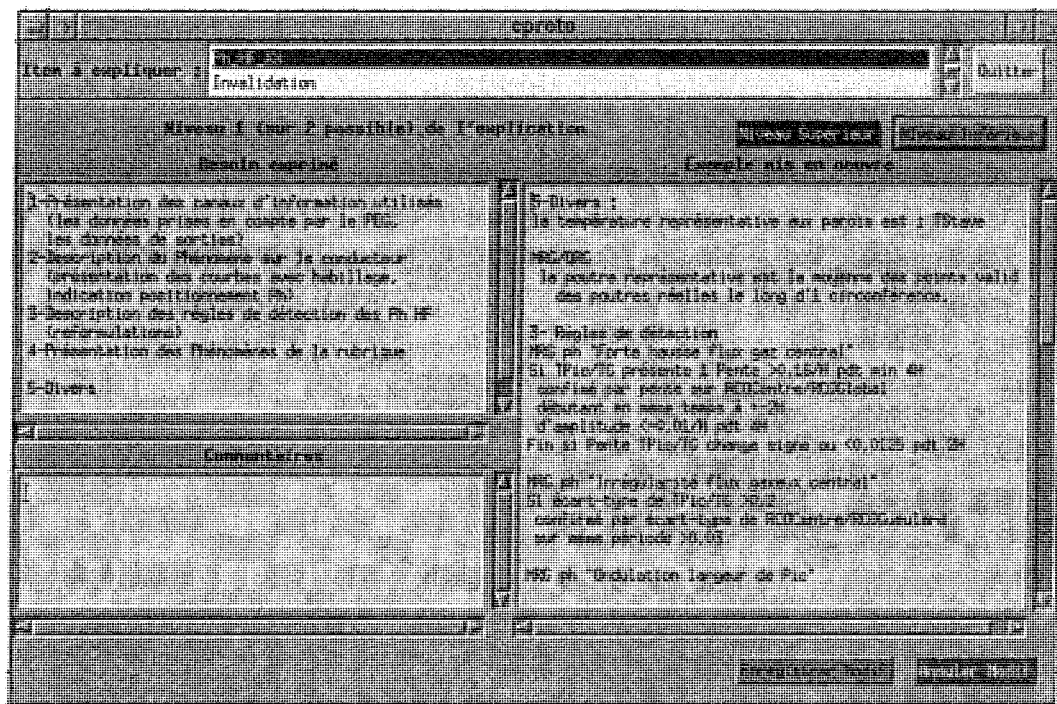


FIG. 8.12 – Maquette de recueil des explications

8.5.6.2 Maquette d'explication de la détection

Nous avons présenté deux types de vues pour les explications de la détection, l'un plutôt orienté explication de la vue de justification et l'autre plutôt explication de la rubrique concernée. La figure 8.14 présente un exemple d'explication de la détection : la détection du phénomène CHT Garni. La figure 8.15 est un exemple de vue d'explication de la rubrique RG (répartition gazeuse).

Les explications de la détection à partir des phénomènes HF détectés comportaient quatre parties : la rubrique, le type de phénomène HF, des explications de la vue de Justification associée, des éléments pour l'action. La deuxième catégorie de vue comportait quatre parties : les concepts et principes de base, les mesures, les dysfonctionnements (phénomènes HF), le diagnostic et le raisonnement.

Ces deux types de vues nous ont permis de réfléchir aux explications locales de la détection effectuées dans SACHEM. Cette première version de la maquette date de l'été 1997.

8.5.6.3 Maquette d'explication des recommandations d'action

Pour les explications des recommandations d'action, nous avons présenté deux types de vues, l'un concernant directement la recommandation d'action, l'autre s'appuyant sur le graphe causal. La vue d'explication de la recommandation d'action, présentée à la figure 8.16, comportait des informations regroupées en cinq rubriques correspondant chacune à une question : Pourquoi cet actionneur ? Pourquoi pas l'actionneur prioritaire (dans le cas où celui-ci n'a pas été choisi) ? Pourquoi cette quantification maintenant ? Quel état du HF a conduit à cette RCA ? Quels ont été les buts poursuivis ? Pour la vue d'explication du graphe causal, présentée à la figure 8.17, nous proposons d'inclure directement le graphe causal établi, de permettre à l'utilisateur de cliquer sur les phénomènes ou les liens présentés pour accéder à plus d'informations (la vue de

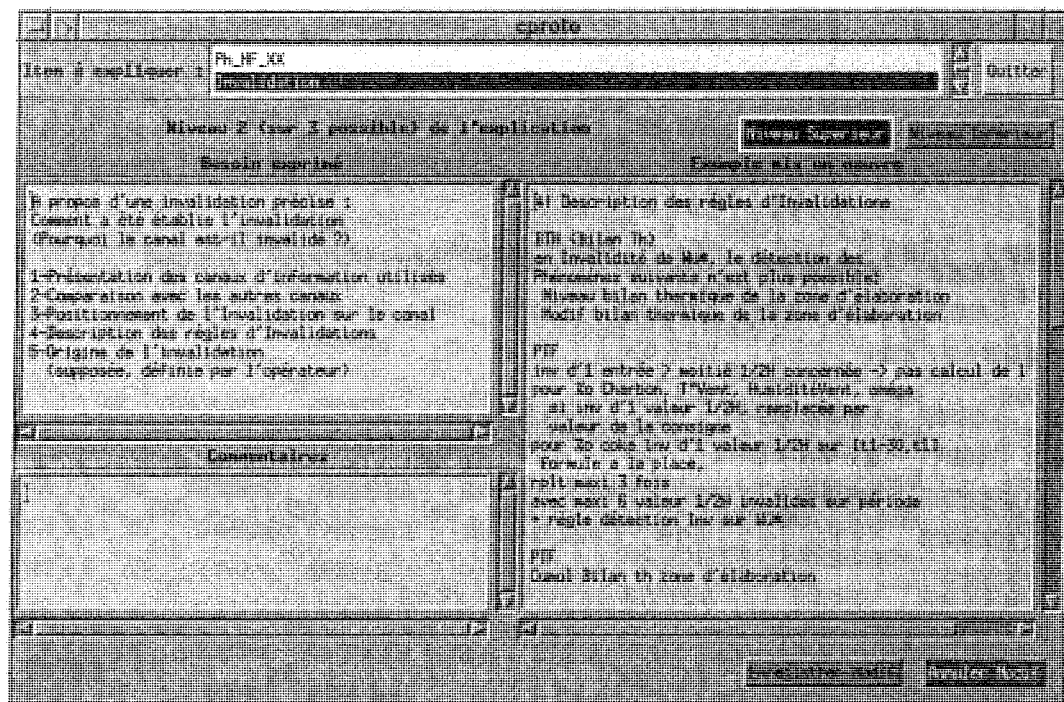


FIG. 8.13 – Maquette de recueil des explications (deuxième exemple)

justification du phénomène ou une vue d'explication), et d'inclure un complément d'explication concernant la structure ou la construction de ce graphe.

La figure 8.18 présente également une vue d'explication de la vue EGHF. Elle propose de reprendre la structure en 3D de cette vue et d'ajouter des commentaires explicatifs.



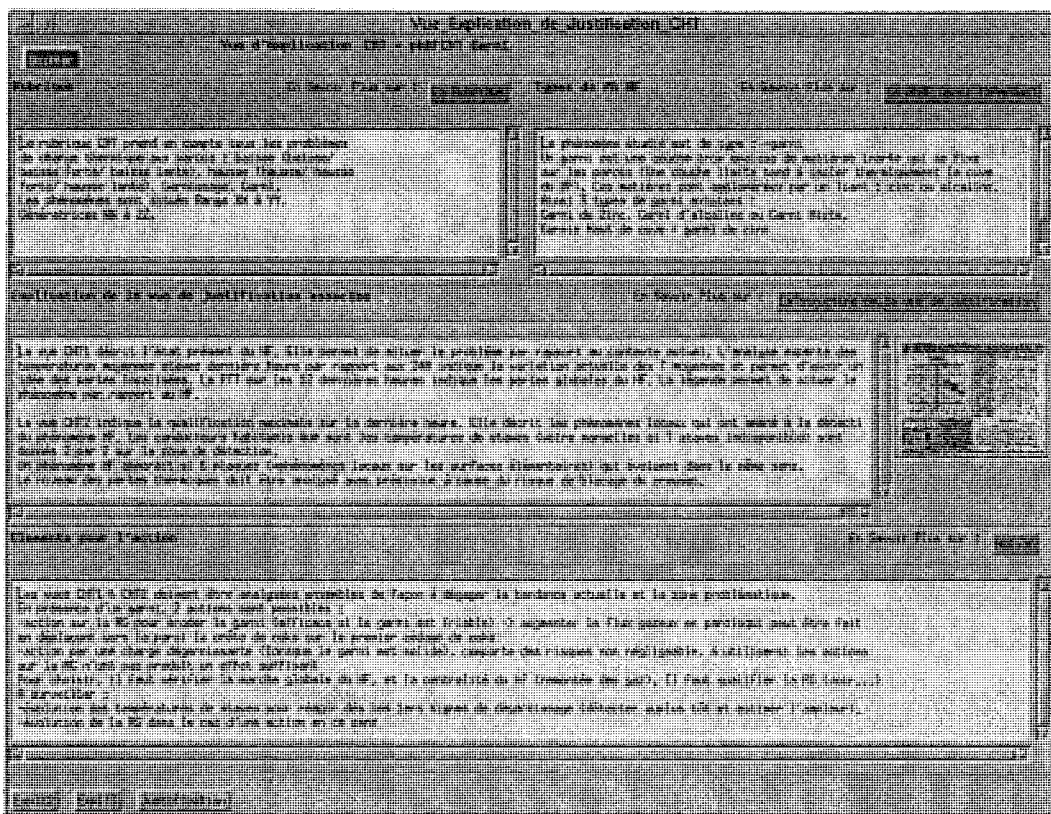


FIG. 8.14 – *Maquette, vue d'explication de la détection du phénomène HF de Garni*

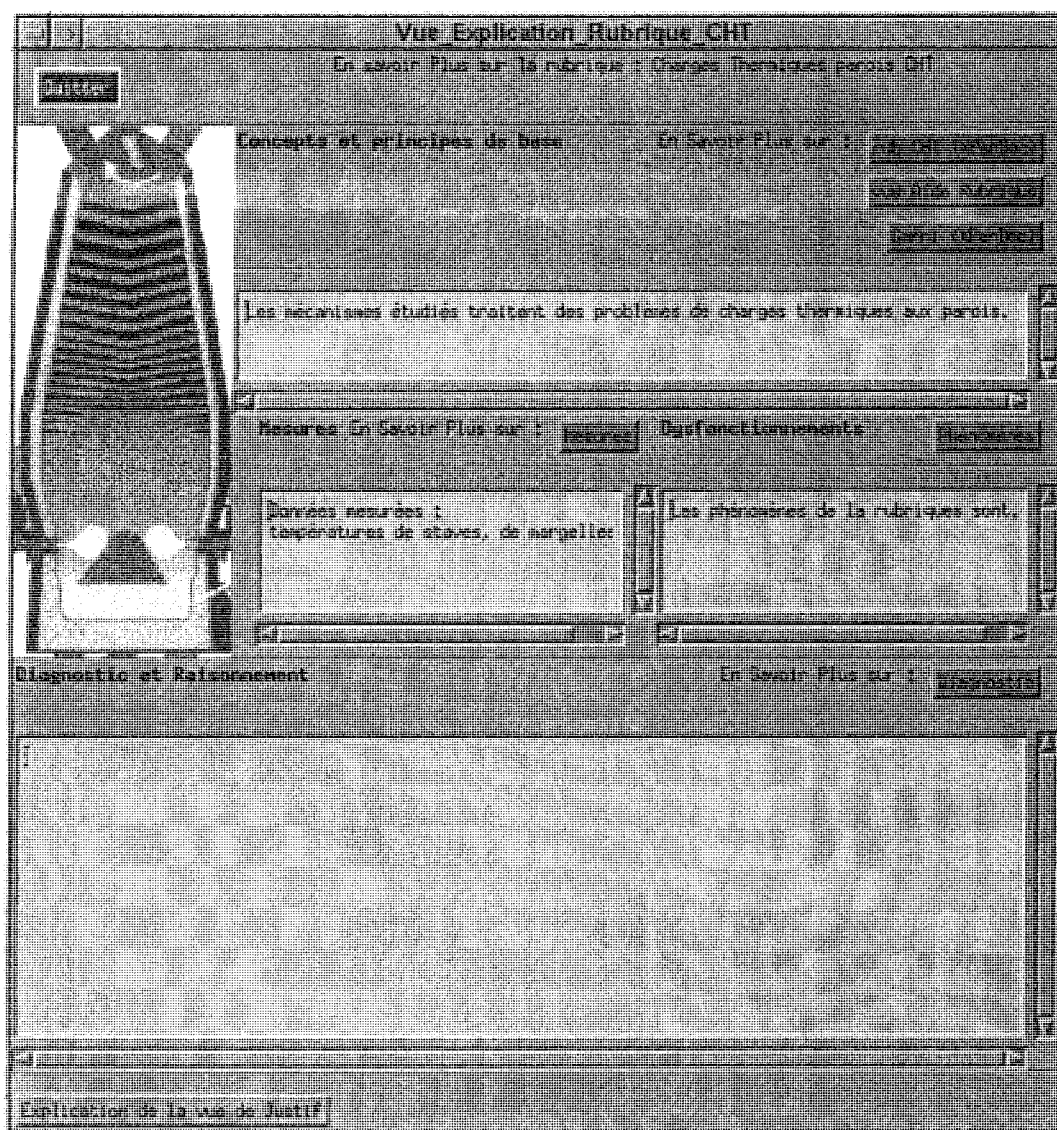


FIG. 8.15 – Maquette, vue d'explication de la rubrique CHT

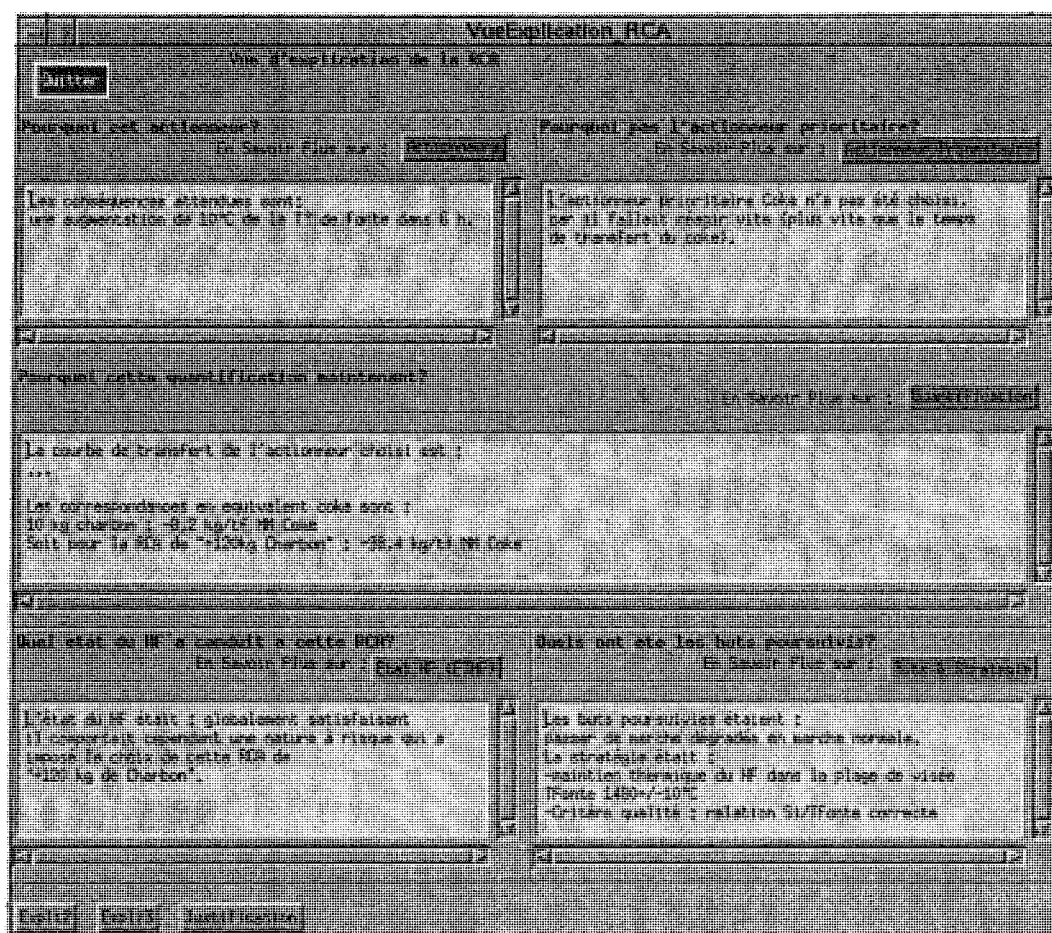


FIG. 8.16 – Maquette, vue d'explication de la recommandation d'action

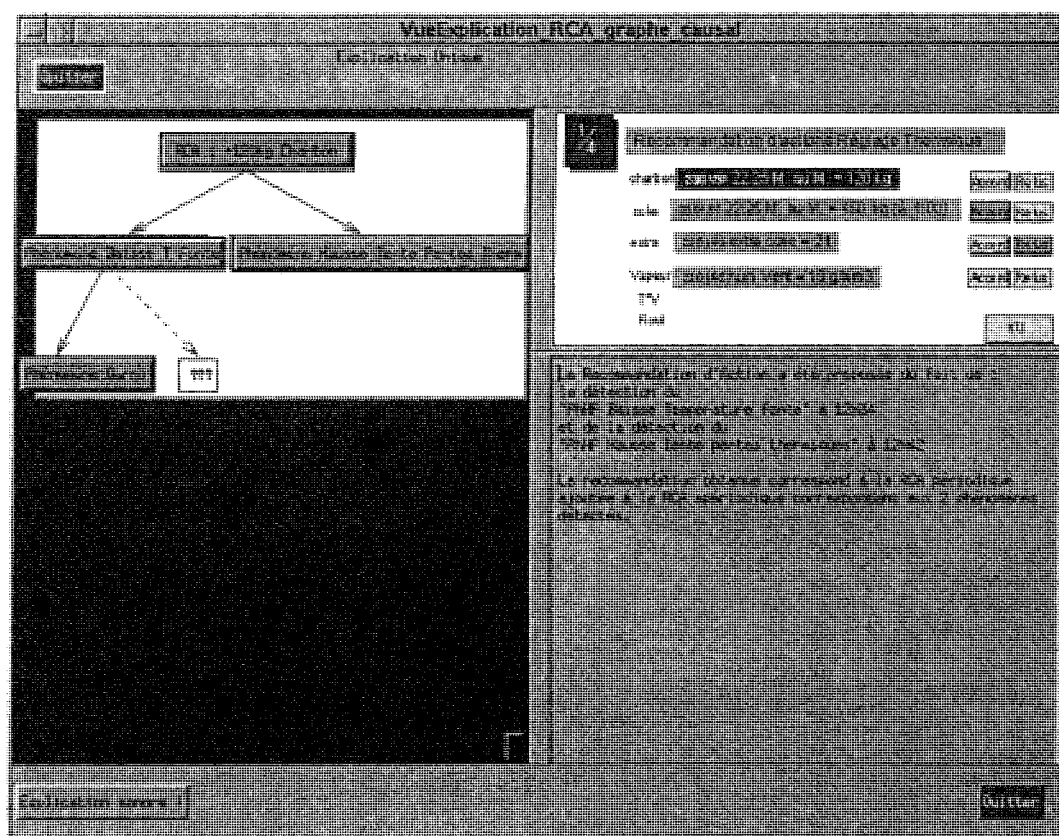


FIG. 8.17 – Maquette, vue d'explication du graphe causal

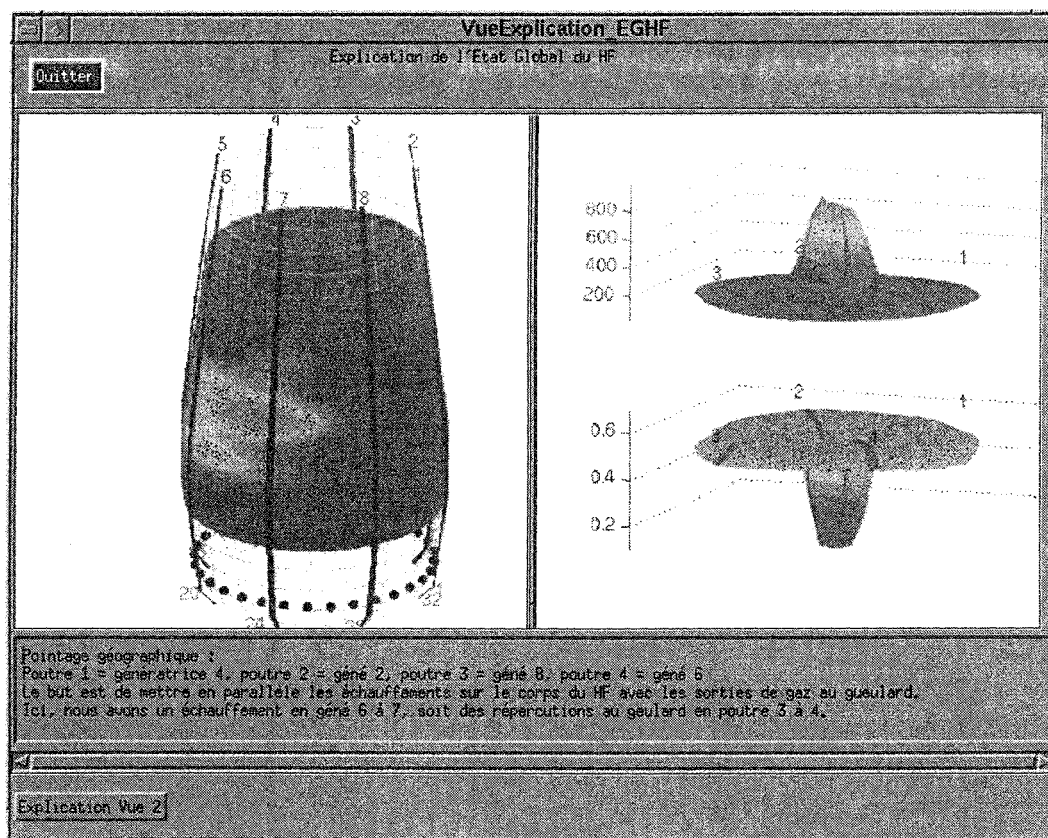


FIG. 8.18 – Maquette, vue d'explication de la vue EGHF

8.5.6.4 Maquette des explications globales

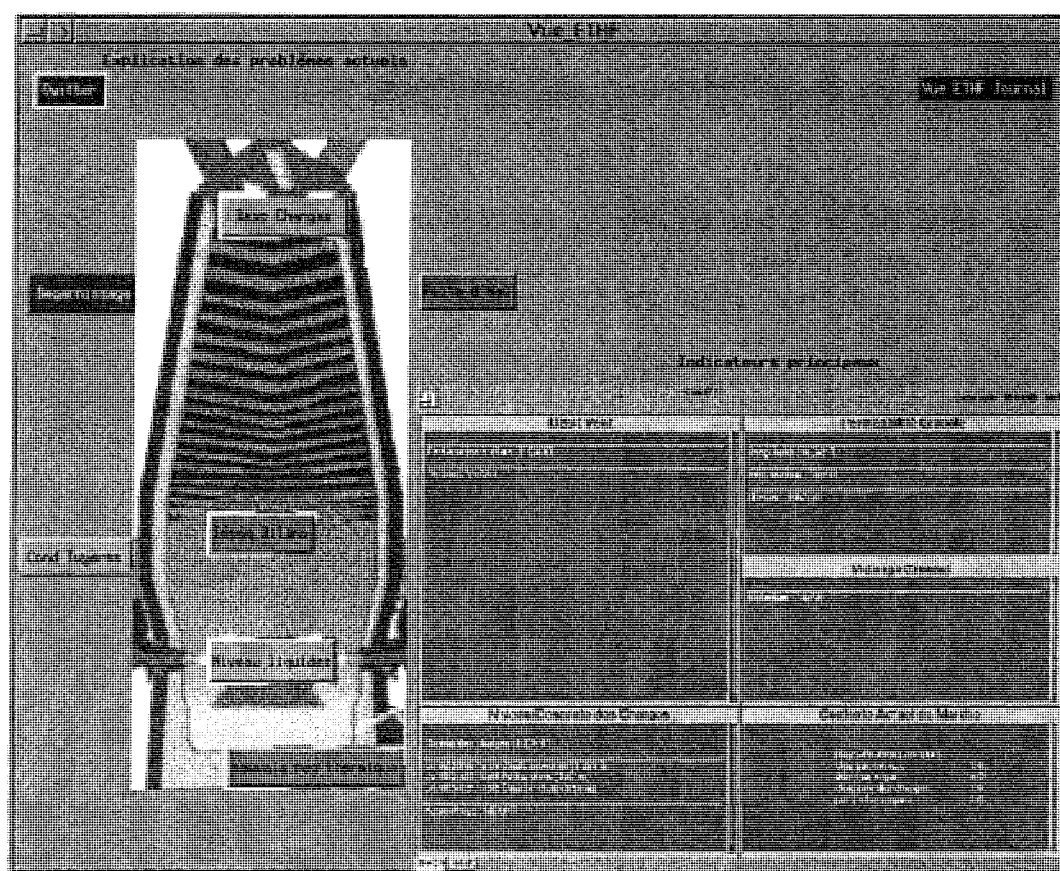


FIG. 8.19 – Maquette, vue de synthèse des problèmes ETHF

Nous nous sommes ensuite intéressés aux explications globales. Pour cela, nous avons tout d'abord travaillé sur les problèmes majeurs en cours sur le HF. L'idée était de permettre aux opérateurs d'obtenir des explications sur chaque problème. Ces explications étant différentes en fonction de l'état dans lequel se trouve le problème. On présente ainsi plus d'informations sur la détection d'un problème s'il n'est pas apparu, alors que l'on présentera plutôt les moyens d'y remédier lorsqu'il est effectivement détecté. Les mêmes types d'informations sont néanmoins toujours présentés sur la maquette, ce choix peut être remis en cause pour que ne soit présentées que les informations importantes.

La figure 8.19 présente la vue ETHF remaniée sur laquelle nous proposons d'inclure les différents problèmes. Ces problèmes permettent d'accéder aux différentes explications.

Les figures 8.20, 8.21, 8.22 et 8.23 présentent les explications concernant le problème de Garni. Quatre phases sont possibles pour ce problème : rien à signaler, garnissage, garni formé et dégarnissage. Les quatre figures présentent les vues d'explications correspondant à ces quatre phases.

Nous avons également présenté des vues d'explication pour les problèmes de niveau des liquides, de descente des charges et de conditions aux tuyères.

A la suite des travaux sur les problèmes, nous avons réfléchi à une proposition de vue d'explication globale se basant sur les problèmes détectés. Cette vue est la dernière proposée, elle

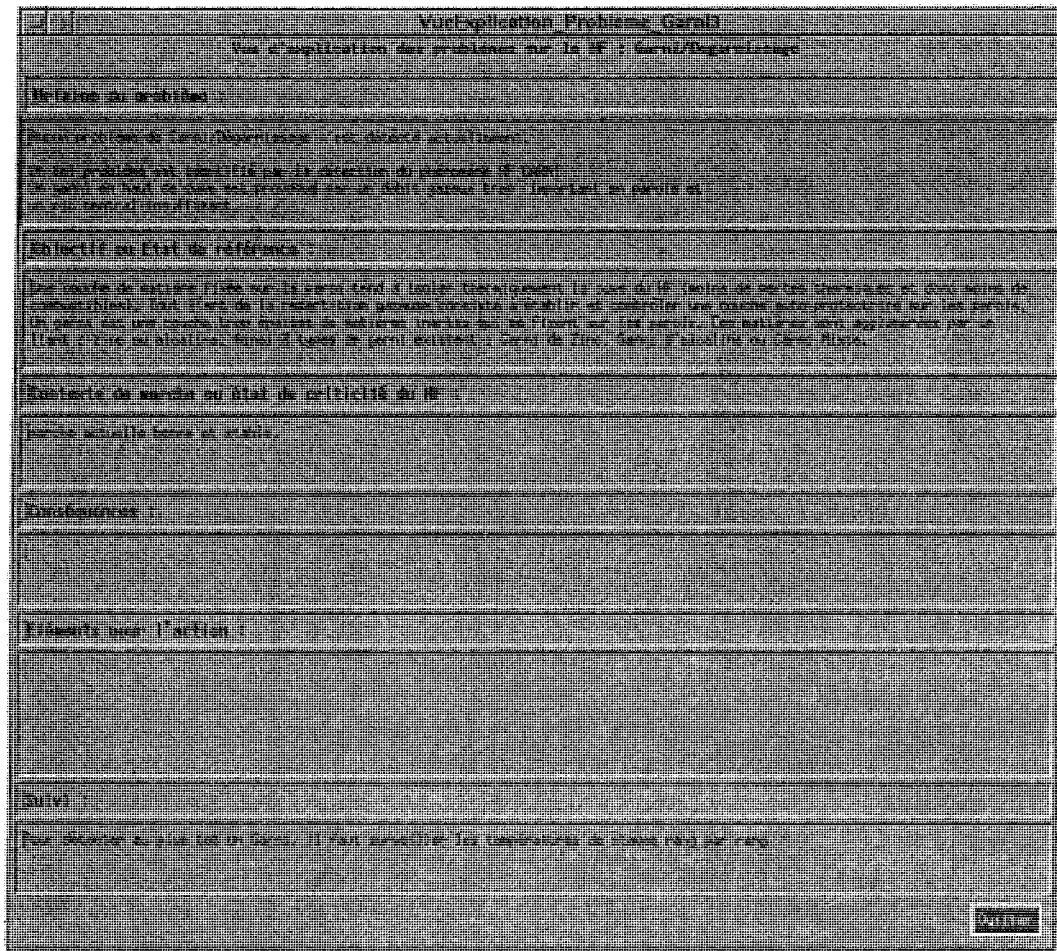


FIG. 8.20 – Maquette, vue d'explication du problème de Garni non détecté

intégrait nos réflexions sur les points d'entrée des explications et la nécessité d'une vue de synthèse. La vue de la maquette présentée est la figure 8.11 (page 191) déjà présentée comme un exemple de notre proposition concernant les explications globales.

On a pu voir dans cette dernière version de la maquette que les vues réalisées sont très proches de nos propositions faites au paragraphe 8.5.3.4.

La maquette a évolué de manière incrémentale au cours du temps en fonction de notre avancée sur les possibilités d'explications. Elle a permis de présenter des exemples concrets d'explications aux experts et aux utilisateurs à partir des exemples recueillis. Néanmoins, comme nous l'avons déjà mentionné, il est difficile de placer les remarques et les commentaires sur les exemples de la maquette à un haut niveau de discussion. Les remarques faites, notamment par les utilisateurs, concernent généralement la forme des explications présentées (par exemple : « *On ne pourrait pas avoir le titre en plus gros* », « *mais pourquoi le bouton n'est pas comme sur la vue de conduite ?* », ...). C'est pourquoi nos premières propositions ou nos propositions concernant les problèmes étaient volontairement sous forme de texte brut, simplement structuré en rubriques. Ainsi nous avons pu discuter du bien fondé des différentes rubriques, des autres possibilités, des accès aux explications, du positionnement de la fonction d'explication par rapport aux autres fonctions et pas seulement des évolutions des vues présentées.

[illegible]

FIG. 8.21 – Maquette, vue d'explication du problème de Garni en phase de garnissage

La maquette nous a également permis de déterminer quelques caractéristiques de l'architecture logicielle de la fonction d'explication à partir des contraintes majeures identifiées. Nous allons discuter, au paragraphe suivant, de cette architecture élaborée à partir des propositions du chapitre 6.

[illegible]

FIG. 8.22 – *Maquette, vue d'explication du problème de Garni en phase de garni formé*

[illegible]

FIG. 8.23 – *Maquette, vue d'explication du problème de Garni en phase de dégarnissage*

8.6 Architecture du système explicatif de SACHEM

Comme dans la partie précédente, après avoir étudié les contraintes dues au contexte industriel, effectué l'acquisition des connaissances explicatives, proposé des explications répondant au besoin, nous allons réfléchir à l'architecture logicielle de la fonction d'explication. Nous nous baserons sur le chapitre 6 et les propositions d'architecture modulaire et d'architecture multi-agents.

Nous reprenons dans ce paragraphe la structure du chapitre 6.

8.6.1 Les éléments à prendre en compte dans l'architecture

Les éléments à prendre en compte sont les mêmes que ceux détaillés au paragraphe 6.2 : les bases de données numériques et symboliques, les bases de connaissances du domaine et les bases de connaissances explicatives. Il faut ensuite étudier les interactions possibles. En revanche, il n'est pas possible d'établir et d'utiliser un modèle de l'utilisateur au sein de SACHEM.

Les bases de données numériques et symboliques sont distinctes au sein de SACHEM. Ce sont des bases de données *Oracle*. La fonction d'explication devra accéder à certaines des informations contenues.

Les connaissances du domaine sont soit codées à l'aide du logiciel *K00L4x4* de Bull, soit intégrées directement dans les programmes. Les explications pourront se référer à ces connaissances. Pour information, les connaissances et le savoir-faire intégrés représentent 43 % des 500 000 lignes de code.

Les connaissances explicatives doivent être intégrées au sein de SACHEM. Ainsi que nous l'avons vu dans le chapitre 6, ces connaissances peuvent être stockées avec les connaissances du domaine. Néanmoins, pour permettre des évolutions plus faciles, il est plus logique de réaliser une base spécifique dédiée aux connaissances explicatives. De nouveaux canaux d'information, nécessités par les explications, comme les problèmes majeurs, pourront néanmoins être intégrés directement dans les bases de données numériques ou symboliques. Les connaissances du domaine pas encore représentées, comme les conséquences possibles d'un phénomène HF, ou les objectifs de chaque rubrique, seront ajoutées à la base de connaissances explicatives. Cette base contiendra également les éléments définissant la structure des explications, les liens vers les autres fonctions ou les accès aux informations. On cherchera alors à respecter les principes d'implantation définis dans SACHEM, par exemple en utilisant les fichiers de paramétrage des vues d'explications.

Ainsi que nous l'avons déjà mentionné, notamment au paragraphe 8.3.2.3, la conduite collective du haut-fourneau par un collège d'utilisateurs et le manque de connaissance de l'utilisateur effectif du système ne permettent pas de réaliser un modèle de l'utilisateur qui aurait été utilisé pour la génération des explications.

8.6.2 Architecture modulaire

Sur la base de la proposition du paragraphe 6.3, nous proposons une architecture modulaire comportant trois couches principales regroupant les différents modules pour la fonction d'explication.

La proposition peut donc être directement établie à partir de celle de la partie précédente :

- une couche regroupant les modules ayant accès aux données et aux connaissances. Ces modules utilisent les bases de données numériques (BDN) et symboliques (BDS), les bases de connaissances du métier et les bases de connaissances explicatives (BC) ;

- une couche regroupant les mécanismes de construction des explications en fonction de la demande;
- une couche regroupant les modules de traitement de l'interface Homme-Machine : construction des vues d'explication, renseignement de l'ensemble des objets graphiques qui composent les vues à l'aide d'un fichier de paramétrage, traitement des interactions avec l'utilisateur et les autres fonctions (demande d'explication, appel d'une autre vue ...) et production de la fenêtre ou des fenêtres d'explication.

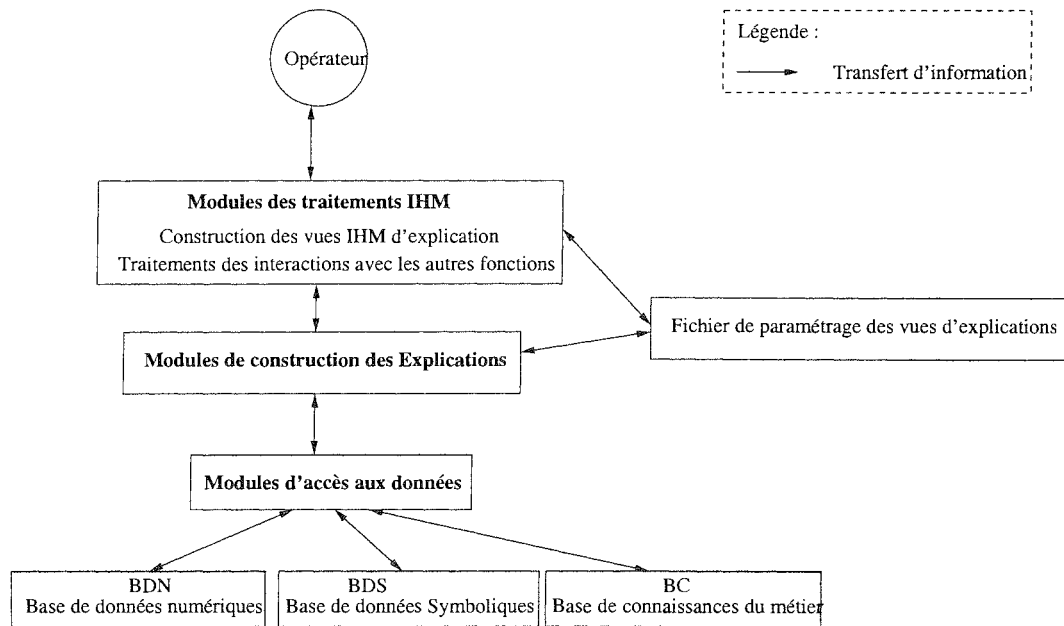


FIG. 8.24 – Architecture modulaire de la fonction d'explication pour le système SACHEM

La figure 8.24, inspirée de la figure 6.10, présente ce schéma de regroupement en trois couches de la fonction d'explication pour le système SACHEM.

Les différentes modifications, dues aux utilisateurs, aux évolutions des connaissances, ou du système, seront intégrées au sein de la couche ou du module correspondant. L'intégration des explications locales à la fonction de diagnostic ou d'état du HF ne remettra pas en cause cette architecture.

8.6.3 Architecture multi-agents

Ainsi que nous l'avons fait au paragraphe 6.4 du chapitre 6, nous proposons d'utiliser les avantages du paradigme multi-agents pour proposer une architecture de la fonction d'explication.

Nous proposons de conserver la structure multi-agents hiérarchique à quatre niveaux réduisant les interactions entre les différents agents :

1. le niveau supérieur ne comprend qu'un seul agent, qui **reçoit** une demande d'explication locale ou globale, **transmet** la demande, ainsi que les données utiles aux agents du niveau inférieur, **réorganise** les demandes et **compose** la vue ou les vues d'explication à afficher ; agent `exn_Composition` ;
2. au deuxième niveau, on trouve les agents correspondant aux explications locales et l'agent correspondant à l'explication globale. Pour l'instant, seules les explications locales de la

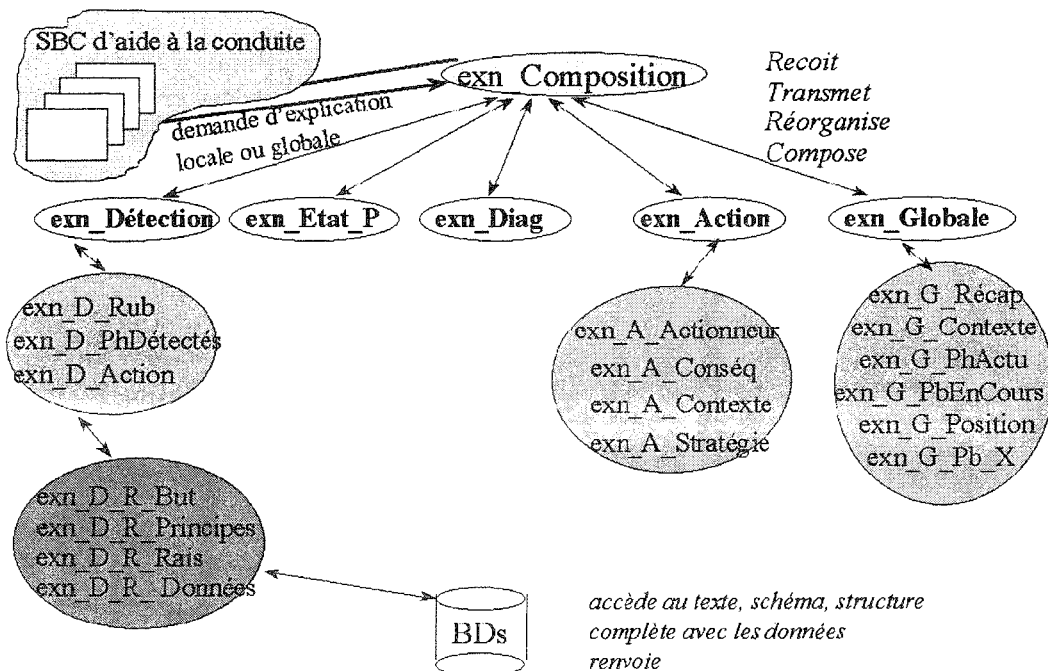


FIG. 8.25 – Architecture multi-agents de la fonction d'explication pour le système SACHEM

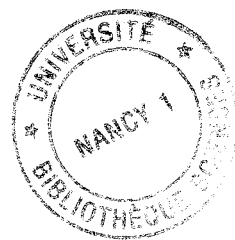
détection et des recommandations d'action sont implantées, néanmoins les autres sont déjà prévues. La mission de ces agents est de rassembler les différents éléments permettant de construire l'explication demandée ;

agents *exn_Détection*, *exn_Action*, *exn_Globale* et en prévision, les agents *exn_Etat_Présent*, *exn_Diagnostic* ;

- ce niveau regroupe des agents spécifiques correspondant aux différentes parties des explications. Chaque agent du niveau supérieur fait appel à ces agents spécifiques ; agents *exn_D_Rubrique*, *exn_D_PhénomèneDétecté*, *exn_D_Action*, pour les explications locales de la détection, *exn_A_Actionneur*, *exn_A_Conséquence*, *exn_A_Contexte*, *exn_A_Stratégie* pour les explications locales des RCA, *exn_G_RécapitulatifPassé*, *exn_G_Contexte*, *exn_G_PhénomènesActuels*, *exn_G_ProblèmesEnCours*, *exn_G_Positionnement*, *exn_G_ProblèmeX* pour les explications globales ;
- le dernier niveau de la hiérarchie rassemble les agents qui accèdent aux données (correspondant à la couche la plus basse de l'architecture classique). Leur mission est donc de chercher le texte, l'image ou le son correspondant au morceau d'explication, de compléter avec éventuellement d'autres données et de renvoyer la réponse ; agents *exn_D_R_Objectifs*, *exn_D_R_Principes*, *exn_D_R_Raisonnement*, *exn_D_R_PhénomènesPossibles*, *exn_D_R_SavoirPlus*, *exn_D_Ph_TypePhénomène*, *exn_D_Ph_Description*, *exn_D_Ph_Origine*, *exn_D_Ph_Conséquences*,

exn_D_Ph_SavoirPlus,
exn_D_A_Agir, exn_D_A_SavoirPlus,
exn_A_A_ChoixActionneur, exn_A_A_AutreActionneur,
exn_A_A_SavoirPlus,
exn_A_C_Maintenant, exn_A_C_EffetsAttendus,
exn_A_C_SavoirPlus,
exn_A_E_EtatProblématique, exn_A_E_SavoirPlus,
exn_A_S_Stratégie, exn_A_S_SavoirPlus pour les explications locales des RCA,
exn_G_R_JourJ, exn_G_R_JourJ-1, exn_G_R_SavoirPlus,
exn_G_C_DébitVent, exn_G_C_NivDescCharges,
exn_G_C_PermGlobal, exn_G_C_VidangeCreuset,
exn_G_C_ContexteSynthétique, exn_G_C_SavoirPlus,
exn_G_Pb1, exn_G_Pb2, exn_G_Pb3, exn_G_Pb_SavoirPlus,
exn_G_P_FlèchePb1, exn_G_P_FlèchePb2, exn_G_P_FlèchePb3,
exn_G_Pb_Origine, exn_G_Pb_Description, exn_G_Pb_Contexte,
exn_G_Pb_Conséquences, exn_G_Pb_Action, exn_G_Pb_Suivi pour les explications globales.

La figure 8.25 inspirée de la figure 6.11 présente cette architecture multi-agents pour l'application SACHEM.



Conclusion

Ce chapitre voulait montrer la façon dont on peut inclure une fonction d'explication pour le système SACHEM. Nous avons repris, autant que possible, la structure des paragraphes des chapitres de la partie précédente.

Nous avons commencé par détailler le contexte sidérurgique de l'application et le fonctionnement des hauts-fourneaux. Les hauts-fourneaux sont des mécaniques complexes pour lesquels il n'existe pas de modélisation dynamique. L'expertise est longue et délicate, un expert haut-fourneuste n'a pas moins de quinze ans d'expériences sur ce procédé.

Le projet SACHEM est un projet ambitieux d'intelligence artificielle, dont l'objectif est d'aider les opérateurs de conduite dans leur tâche. Les fonctions de détection des phénomènes Haut-Fourneau (phénomènes HF) et de recommandation d'action sont actuellement intégrées au système et installées sur les sites de Sollac-Fos, Sollac-Dunkerque et Sollac-Florange. Les fonctions de diagnostic des causes profondes et d'état du haut-fourneau sont à l'étude.

A partir des contraintes imposées par le procédé et par le système SACHEM, nous avons précisé le cahier des charges de la fonction d'explication. Le but de cette fonction est de convaincre durablement les opérateurs et de leur permettre de raisonner aussi efficacement que l'expert.

Ces trois premières parties, description du contexte sidérurgique, du projet SACHEM et du cahier des charges de la fonction, correspondent à l'analyse du contexte.

Ensuite, ont été commentées les grandes phases que sont l'acquisition des connaissances explicatives, la réalisation de la fonction et l'architecture logicielle sur la base des trois chapitres 4, 5 et 6.

Les cinq étapes, de la phase d'acquisition des connaissances explicatives, décrites, avaient été proposées au chapitre 4. Pour cette description, nous nous sommes appuyés sur un document d'expertise, sur un graphe de raisonnement, sur des observations des utilisateurs et des experts, sur des interviews réalisés en situation de conduite et sur des autoconfrontations à la suite des interviews.

La réalisation de la fonction d'explication repose essentiellement sur les propositions d'explications locales aux deux fonctions réalisées et d'explications de synthèse. Nous nous sommes aidés, pour cela, d'une maquette de l'interface homme-machine proposant des exemples d'explications. Cette maquette a évolué tout au long de notre travail et a permis de proposer des explications répondant aux besoins des utilisateurs.

L'architecture proposée pour le système explicatif repose sur les deux propositions principales du chapitre 6. L'architecture peut être modulaire, structurée en trois couches principales en fonction des tâches effectuées par les différents modules, ou basée sur des agents réalisant chacun une partie de la tâche de construction d'une explication. Quatre couches répartissent les agents en fonction de leurs capacités cognitives et de leurs missions.

Ainsi, a été décrit le processus complet de réalisation d'une fonction d'explication et son intégration dans un système à bases de connaissances. Nous reviendrons sur les différentes étapes de ce processus dans le chapitre suivant. Bien sûr, nous utiliserons notre expérience de réalisation d'une application pour le système SACHEM.

La fonction d'explication est bien définie, tant de manière externe pour les utilisateurs, que interne pour les interactions avec les autres fonctions ou pour sa structure logicielle. Néanmoins celle-ci n'a pas été réalisée complètement dans le système SACHEM, elle sera implantée prochainement sur la base de nos propositions. Pour cela les étapes d'acquisition des connaissances explicatives et de validation des explications proposées doivent être faites en intégralité.

Chapitre 9

Démarche de réalisation d'un système explicatif

Sommaire

9.1 Principales étapes	214
9.1.1 Définition du problème et analyse des besoins	214
9.1.2 Acquisition des connaissances explicatives	214
9.1.3 Développement d'une maquette	215
9.1.4 Modèle d'explication et typologie	216
9.1.5 Spécifications	216
9.1.6 Développement complet	216
9.1.7 Intégration	216
9.1.8 Evolution	217
9.2 Quelques conseils sur le cycle de développement d'un système explicatif	217
9.2.1 Cycle de vie d'un SBC	217
9.3 Quelques conseils	218
9.4 Cycle de développement pour l'application SACHEM	219

Introduction

Nous avons décrit les principales idées relatives aux explications à destination des utilisateurs d'un SBC (partie I) puis le contexte de l'aide à la conduite de procédés complexes, les explications qu'il est possible de présenter dans ce cadre et l'architecture d'un système explicatif (partie II), enfin nous avons détaillé la fonction d'explication pour l'application réalisée dans le cadre du projet SACHEM pour les opérateurs de conduite des hauts-fourneaux de Sollac (chapitre 8 de la partie III). Nous allons maintenant revenir sur les différentes étapes à suivre lors de la réalisation d'un système explicatif à partir de notre expérience et chercher à planifier la démarche. Ce chapitre peut donc constituer une synthèse des principales tâches évoquées dans les autres chapitres, et une aide concrète à la réalisation d'un système explicatif au sein d'un SBC pour la conduite de procédés complexes.

9.1 Principales étapes

Nous détaillerons en premier les principales étapes à suivre pour la réalisation d'un système explicatif en précisant à chaque fois les éléments importants ou problématiques. Ces étapes ne sont pas nécessairement bien ordonnées ; ce n'est pas sur l'ordonnancement que nous avons fait porter nos efforts mais plutôt sur les différentes tâches. Néanmoins, nous donnerons quelques conseils dans le paragraphe 9.2.

9.1.1 Définition du problème et analyse des besoins

Comme pour tout projet d'intelligence artificielle et même tout projet informatique, il est important de bien définir le problème à résoudre. Le but de la fonction d'explication est souvent le même, néanmoins nous avons montré précédemment qu'il fallait définir le plus possible les grandes lignes de la fonction d'explication que l'on souhaite réaliser en fonction des besoins précis des utilisateurs. Cette fonction est assez lourde, tant du fait de la phase de recueil des connaissances que des développements ou des évolutions indispensables. Aussi le projet de réalisation de la fonction doit-il être bien défini.

Habituellement, un cahier des charges de la fonction d'explication est rédigé. Il peut être plus détaillé et prendre la forme de spécifications externes (spécifications du point de vue des utilisateurs).

Dans cette étape, il faut bien définir le but des explications, les destinataires principaux et les interactions possibles avec ceux-ci. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 5, cela peut prendre la forme de questions : des explications, A qui ? Pourquoi ? Sous quelles formes ? Comment les créer ? Et après ?

9.1.2 Acquisition des connaissances explicatives

La phase d'acquisition des connaissances explicatives n'est pas une phase évidente. En effet, s'il n'est pas facile de recueillir et de représenter les connaissances du domaine, il est encore plus difficile de se restreindre aux explications. La première difficulté vient du fait qu'il n'existe pas d'expert en explication. Nous conseillons de s'adresser à des experts du domaine possédant des connaissances de psychologie, de didactique et des compétences d'écoute et de pédagogie pour obtenir des explications. Ces explications peuvent être complétées ou améliorées ensuite par d'autres experts, des psychologues, des didacticiens ou des ergonomes.

Pour la réalisation pratique de cette tâche, il faut conjuguer analyse des documents existants et discussions sur des cas concrets. Il faut également intégrer le point de vue des experts et celui des utilisateurs finaux du système explicatif.

C'est pourquoi nous avons proposé cinq étapes complémentaires pour effectuer une bonne acquisition des connaissances explicatives, c'est-à-dire une acquisition riche, fructueuse et sur laquelle il est possible de se baser.

La première étape est l'analyse de la documentation technique. Il faut passer en revue les documents existants pour étudier la structuration des connaissances, les raisonnements employés et les manques du SBC qui peuvent être comblés par les explications.

En complément, on cherchera alors des documents experts contenant une expertise commentée ou des raisonnements de conduite. Ces documents d'expertise seront analysés en profondeur pour en extraire des exemples d'explications, des stratégies pour les explications et éventuellement des indices pour la réalisation effective. Ils peuvent également permettre d'orienter significativement les étapes suivantes du recueil.

Une fois quelques exemples d'explications recueillis à travers les documents, on peut observer les experts et les utilisateurs en situation réelle. On cherchera à déterminer les connaissances bien maîtrisées et celles méritant approfondissement chez les utilisateurs. On observera les informations importantes, les raisonnements utilisés et les choix relatifs à ces raisonnements chez les experts.

Puis vient une phase plus longue : les interviews des utilisateurs et des experts en situation réelle. Ainsi que pour le recueil des connaissances de métier, il est utile d'interviewer plusieurs experts et plusieurs utilisateurs pour ne pas être dépendant d'une manière d'expliquer et d'un seul niveau de compréhension. Nous proposons des interviews non dirigés, ou peu dirigés, pour ne pas fausser les échanges réalisés sur des données réelles. Pour cela, on pourra se baser sur le système existant ou sur les données brutes si le système n'est pas encore opérationnel. Le mieux est d'interviewer simultanément un expert et un utilisateur ; les explications se font alors en direct à partir des données réelles sur le système en ligne, hors ligne ou simulé. Les différents interviews sont filmés.

La dernière phase se révèle souvent plus intéressante que les interviews. A la suite des observations et des interviews, on fait suivre une phase de *debriefing* ou d'analyse des discussions. Cette dernière phase consiste en une série de séances complémentaires pour analyser les différents propos et les différents comportements. Ce sera, au moins, une simple séance de *debriefing* avec le ou les intervenants ou, encore mieux, une véritable autoconfrontation. On présentera alors aux différents intervenants des morceaux des dialogues filmés pour leur demander d'analyser leurs choix, de justifier leurs actes ou vérifier que les explications ont bien été comprises. Bien évidemment, cette phase de discussion ou d'autoconfrontation doit elle-même être analysée.

A la suite de ces cinq étapes, on cherchera à structurer les connaissances, on rassemblera les exemples et on réfléchira aux moyens de valider les explications proposées aux utilisateurs.

9.1.3 Développement d'une maquette

Nous considérons dans cette thèse que l'on peut différencier une « maquette » d'un « prototype ». La maquette, de manière analogue aux maquettes en balsa des architectes en bâtiment, a pour objectif de montrer ce que pourrait être la fonction d'explication sans que celle-ci soit effectivement réalisée. On réalisera plutôt une partie *en largeur* de la fonction sans réaliser le fonctionnement réel. En revanche, un prototype correspond à la réalisation effective d'un morceau de la fonction finale. Il comprend les véritables mécanismes de raisonnement ou d'accès aux données. Il réalise une partie de la fonction *en profondeur*.

Le développement d'une maquette ou d'un prototype est une étape indispensable pour la réalisation d'un système explicatif. Démarrée très tôt, avant la fin de l'acquisition des connaissances explicatives, une maquette peut aider à la définition du besoin et à la structuration des connaissances. Démarrée plus tard, elle permettra de valider les propositions d'explications et la structure globale de la fonction.

La maquette sert à la simulation du futur système explicatif. Elle doit être évaluée pour que les choix pris soit confirmés ou infirmés. La validation finale de la fonction se fera plutôt sur le prototype réalisé. Ce prototype évoluera avec les modifications proposées. Le prototype sera donc plutôt réalisé après la phase de spécification.

Cette étape de simulation n'est pas aussi complexe que la phase d'acquisition des connaissances explicatives mais elle n'en est pas moins utile. C'est une aide importante pour les choix à faire quant à la structure de la fonction et des vues d'explications proposées.

9.1.4 Modèle d'explication et typologie

Les connaissances explicatives recueillies doivent être analysées, détaillées et structurées. On peut proposer une typologie des explications ou si possible des modèles d'explications. C'est dans ce but que nous avons fait des propositions de typologie au chapitre 4 ou de structuration des explications en explications locales aux différentes fonctions du système et explications globales, au chapitre 5.

Cette étape de réflexion et de structuration permet de faire des propositions d'explications cohérentes. Une fois validées et modifiées, ces propositions servent de base pour la rédaction des spécifications.

9.1.5 Spécifications

La rédaction des spécifications du système explicatif suppose que les différentes options possibles aient été regardées et validées. Cette rédaction repose donc sur les choix pris et validés par la direction du projet.

Cette étape de validation des choix n'a pas été effectuée complètement pour notre application. Certaines parties des spécifications ont été rédigées, mais les spécifications entières ne pourront être rédigées que lorsque les propositions auront été validées, infirmées ou modifiées.

Pour le projet SACHEM, nous pouvons mentionner plusieurs documents de spécification : des spécifications externes correspondant au point de vue des utilisateurs du système, des spécifications générales correspondant à l'architecture de la fonction et son intégration dans le système complet et des spécifications techniques ou détaillées destinées aux développeurs de la fonction. Bien que ce découpage soit logique et intuitif, il n'est pas forcément celui choisi pour tout projet de système à bases de connaissances, nous le mentionnons donc de manière indicative.

Cette étape de spécification est, bien sûr, très importante puisque le développement final du système explicatif en dépendra complètement. Il faut faire des choix comme de favoriser les explications prolongeant le raisonnement plutôt que celles le déroulant. Cependant, il est toujours possible de modifier les spécifications ou la fonction réalisée pour les adapter complètement aux besoins.

9.1.6 Développement complet

A la suite de la rédaction des différentes spécifications et à l'aide du prototype réalisé, le développement de la fonction peut être réalisé.

Ce développement aboutit à la version de la fonction décrite dans le cahier des charges et les spécifications, mais cette version doit encore être intégrée au système complet, validée et modifiée pour être définitivement utilisable par les opérateurs de conduite. Toutes ces étapes correspondent au cycle classique de la gestion de projet.

Le développement comprend le choix de l'architecture logicielle définitive. Ce choix aura néanmoins été étudié lors des étapes précédentes.

9.1.7 Intégration

A la suite du développement, on réalise les tests de la fonction et sa validation. Les modifications demandées sont alors réalisées avant son intégration au système à bases de connaissances. Puis validée, elle peut enfin être livrée aux utilisateurs.

9.1.8 Evolution

Nous avons insisté, dans cet ouvrage, sur la nécessité de faire évoluer la fonction d'explication en fonction de l'évolution des utilisateurs, de l'évolution du système ou des connaissances. La livraison effective ne doit pas signifier que la fonction ne changera plus. Cette fonction est clairement destinée pour améliorer la compréhension des utilisateurs et leur formation, il faut donc qu'elle corresponde exactement au niveau des utilisateurs.

On pourra utiliser pour cela les mécanismes mentionnés au paragraphe 5.4 « en savoir plus », « en présenter moins » et « en ajouter ». Il faut donc prévoir régulièrement des phases de recueil avec les utilisateurs pour analyser les évolutions, puis des propositions de modifications de la fonction à valider par un comité des utilisateurs et l'intégration effective des évolutions. La maintenance de la fonction n'est donc pas limitée à la maintenance technique, elle nécessite la prévision de ressources humaines suffisantes.

9.2 Quelques conseils sur le cycle de développement d'un système explicatif

Pour appuyer quelques conseils sur l'enchaînement des étapes mentionnées précédemment et le cycle de développement d'un système explicatif, nous allons tout d'abord étudier des travaux de base relatifs au cycle de vie d'un SBC.

9.2.1 Cycle de vie d'un SBC

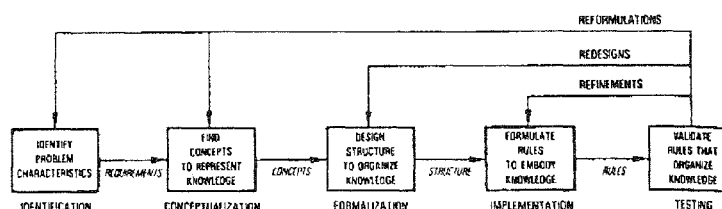


FIG. 9.1 – Processus de développement d'un SBC (extrait de [HR92])

Les premières propositions étaient souvent basées sur le prototypage rapide [Dieng90] qui distinguait essentiellement les phases suivantes :

1. Identification
2. Développement d'une maquette
3. Développement du système complet
4. Validation du système complet
5. Intégration dans l'entreprise et maintenance

Puis l'approche d'acquisition structurée des connaissances a été développée. L'implantation n'a lieu qu'une fois la connaissance représentée suivant le cycle de vie :

1. Définition du problème
2. Modélisation des connaissances
3. Conception du système

4. Implantation et tests.

Enfin l'approche largement utilisée KADS propose un modèle de cycle de vie utilisant un modèle conceptuel, un modèle fonctionnel et un modèle de conception détaillée tout en plaçant ces modèles dans le temps suivant leur niveau d'abstraction. Cette approche repose sur l'hypothèse que les phases d'analyse et de conception doivent être séparées. On effectue donc l'analyse complète, avant la conception et l'implantation du SBC :

1. données
2. modèle conceptuel (analyse et description de l'expertise)
3. modèle fonctionnel (architecture fonctionnelle du futur SBC)
4. modèle de conception détaillée (conception du SBC)
5. implantation

Dans [HR92], Mme Hayes-Roth présente le processus de développement d'un système à bases de connaissances. Ce développement, présenté à la figure 9.1 comprend les étapes suivantes :

1. identification des caractéristiques du problème ;
2. conceptualisation : trouver les concepts permettant de représenter les connaissances ;
3. formalisation : construire la structure d'organisation des connaissances ;
4. implémentation : formuler les règles pour incorporer les connaissances ;
5. tests : valider les règles qui organisent les connaissances.

On trouve, dans [AG et al.92], une démarche de construction d'un SBC assez similaire composée de quatre étapes :

1. acquisition des connaissances dirigée par les données : cette première étape vise à définir les objectifs et les fonctionnalités attendues du futur SBC. Il s'agit de recueillir un ensemble de données brutes sur l'expertise, sans *a priori* sur leur interprétation ;
2. construction du schéma du modèle conceptuel,
3. instanciation du schéma du modèle conceptuel,
4. opérationnalisation du modèle conceptuel.

Ces quelques travaux peuvent permettre d'identifier l'ordre des différentes étapes nécessaires à la réalisation d'un système explicatif. De nombreux autres travaux importants ont été consacrés à ce sujet. Nous pensons que la mention des différentes étapes dans le paragraphe précédent dans l'ordre indiqué est suffisant pour la réalisation pratique d'un tel système et nous invitons les lecteurs qui souhaitent approfondir le sujet du cycle de vie des SBC à lire les travaux dans les principales conférences⁵² ou revues⁵³ traitant des SBC.

9.3 Quelques conseils

Il n'est pas forcément plus intéressant de démarrer la réalisation du système explicatif après avoir réalisé entièrement le système à bases de connaissances, comme nous l'avons mentionné au paragraphe 3.4. Il n'est pas non plus facile ni indispensable de la démarrer en même temps que l'on réalise le système. En revanche, il est important de réfléchir au problème de l'introduction

^{52.} comme *IJCAI*, *ECAI*, *RFIA*, *AAAI*, *AIA*, etc.

^{53.} comme *Applied Artificial Intelligence*, *Artificial Intelligence*, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, *Expert Systems*, *Expert Systems With Applications*, *IEEE Expert*, *International Journal of Expert Systems*, *Journal of the ACM*, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, *Revue d'Intelligence Artificielle*, etc.

des explications et de leur structure le plus tôt possible. Les explications doivent être prises en compte dès le début du projet de réalisation d'un SBC.

On s'aperçoit, à la lecture des paragraphes de la section 9.1, que les différentes étapes ne sont pas indépendantes. Il est pratiquement impossible de démarrer une nouvelle étape en ayant complètement terminé l'étape précédente. Au contraire, il ne faut pas hésiter à revenir sur une étape supposée finie en fonction de nouvelles informations acquises à une étape ultérieure. Ainsi, les retours en arrière, pour améliorer ou compléter le recueil des connaissances, par exemple, sont fréquents et enrichissants.

On s'aperçoit également que chaque étape est importante pour réaliser cette fonction délicate, réaliser rapidement une étape, comme l'acquisition des connaissances explicatives, obligera à passer plus de temps sur une autre, les propositions d'exemples d'explications par exemple. Aucune étape ne doit être négligée.

On peut utiliser l'ordre des paragraphes de la section 9.1 comme l'ordre des différentes étapes. On pourra également améliorer cette chronologie à partir du paragraphe 9.2.1. Néanmoins, le but n'étant pas de proposer une chronologie stricte des étapes à suivre, nous n'approfondirons pas ce travail.

On peut également donner les conseils mentionnés dans [Wick92], à partir de l'expérience de la réalisation de trois systèmes explicatifs AGNESS, JOE, REX :

- ne pas être effrayé par un échec : d'après l'auteur, l'échec d'un projet de système explicatif de satisfaire le but fixé ne signifie pas que le projet est un échec total, certains aspects peuvent être développés ;
- comprendre le contexte et les tendances des travaux précédents : reconsidérer les approches précédentes et regarder les tendances peut indiquer des voies de développement riche pour son propre projet ;
- impliquer les utilisateurs finaux dans la construction du système ;
- examiner les hypothèses fondamentales qui ne peuvent pas être prises pour votre projet.

Ainsi que nous l'avons également dit, il est donc très important de prendre du recul par rapport au projet de réalisation d'un système explicatif. Il faut prendre en compte très tôt ce projet dans le SBC, évaluer son impact sur le SBC et les autres fonctions, identifier précisément les problèmes posés ainsi que les avantages induits par les travaux autour du système explicatif (comme la clarification des connaissances du métier par exemple) et toujours impliquer les utilisateurs aussi bien pour l'analyse des besoins, l'acquisition des connaissances, la validation des explications proposées que pour la réalisation de l'IHM et du système explicatif final.

Il faut également préciser que la réalisation d'une fonction d'explication est un investissement lourd. Il faut donc évaluer précisément les coûts et les apports de cette fonction avant de lancer la réalisation. On vérifiera notamment les disponibilités des experts pour le recueil et la validation des explications.

9.4 Cycle de développement pour l'application SACHEM

Le but de ce paragraphe est de décrire notre expérience du développement d'un système explicatif pour le projet SACHEM en terme de cycle de développement.

En nous basant sur les étapes principales de la capitalisation des connaissances détaillées au paragraphe 7.2 et sur le paragraphe 7.3 définissant la fonction d'explication comme un projet de capitalisation de connaissances, nous pouvons décrire le cycle de développement de la fonction d'explication comme une itération des quatre étapes établies à partir des différentes facettes de la capitalisation de connaissances mentionnées par M. Grunstein [Grundstein95].

Conclusion

Après la définition des systèmes explicatifs, une revue de la littérature dans la première partie et des propositions concrètes pour la réalisation d'un système explicatif dans le contexte de la conduite de procédés complexes dans la deuxième partie, nous avons présenté une application de nos idées au projet SACHEM.

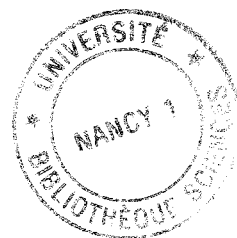
La conduite de hauts-fourneaux est une activité difficile qui demande une expertise complète. Le système SACHEM aide les opérateurs de Sollac dans leur tâche de conduite. C'est un exemple de système d'aide à la conduite de procédés complexes, tels qu'ils ont été présentés dans la partie II. Dès le cahier des charges, il a été demandé une fonction d'explication permettant aux opérateurs de conduite de comprendre le procédé au travers des résultats du système.

Cette dernière partie, visait à illustrer l'étude de systèmes explicatifs, décrite dans la partie II. Après avoir rappelé le contexte industriel et le projet SACHEM, le cahier des charges de la fonction d'explication a été présenté.

Nous avons ensuite suivi le schéma de description qui avait été adopté dans la partie précédente, à savoir acquisition des connaissances, réalisation de la fonction d'explication et architecture logicielle.

L'étape d'acquisition des connaissances s'est appuyée essentiellement sur l'analyse de deux documents d'expertise et un recueil comportant observation, interviews puis autoconfrontation. Une maquette en construction incrémentale, dont on peut dégager trois grandes versions, a été utilisée dans la phase de réalisation de la fonction d'explication. Comme précédemment, nous nous sommes appuyés sur les techniques de l'intelligence artificielle distribuée pour proposer une architecture multi-agents facilement évolutive.

Le chapitre 9 peut être vu comme une synthèse de nos travaux. Nous y avons décrit toutes les étapes du processus de réalisation d'un système explicatif et nous avons donné des conseils pour cette réalisation.



Conclusion générale

Dans le cas de procédés complexes, comme celui des hauts-fourneaux, des centrales thermiques ou des réseaux d'irrigation, la tâche des opérateurs de conduite est de prendre les bonnes décisions d'action permettant de faire fonctionner le procédé au mieux (production maximale, sécurité, non-dégradation des équipements). Pour cela, les opérateurs analysent les données numériques et symboliques extraites des capteurs, ils interprètent ces données pour se faire un modèle de l'état présent et des éventuels problèmes en cours, ils peuvent élaborer un diagnostic, éventuellement à l'aide d'analyses complémentaires et choisissent les actions à effectuer sur le procédé.

Leur tâche peut être grandement facilitée par l'introduction d'un système à bases de connaissances (SBC) leur donnant des informations concernant les données et les problèmes en cours mais aussi des diagnostics possibles et des conseils d'action. Néanmoins ce système ne se substitue pas aux opérateurs, la machine n'est pas connectée aux commandes. C'est l'opérateur humain qui décide effectivement des actions à entreprendre.

Le but d'une fonction d'explication d'un tel système peut être de décrire le raisonnement suivi par la machine pour que l'opérateur soit convaincu du bien-fondé de ce raisonnement, mais il est surtout de décrire le procédé et ses évolutions grâce aux résultats transmis par le système.

Dans cette thèse, nous avons étudié la mise en place d'une telle fonction d'explication, que l'on peut également appeler un système explicatif. Nous nous sommes distingués des travaux existants en nous centrant sur le domaine industriel fortement contraint de l'aide à la conduite de procédés et avons fait des propositions pour permettre la réalisation de cette fonction.

Nous avons vu que les premières explications ont été introduites il y a plus de vingt-cinq ans et que de nombreux travaux ont été consacrés à ce sujet. Les principales applications sont réalisées pour des applications médicales ou pour la formation des utilisateurs. Les explications sont généralement données aux utilisateurs mais peuvent aussi être générées pour aider le concepteur du SBC. Elles peuvent être obtenues par un mécanisme de dialogue avec l'utilisateur.

A partir de l'analyse plus approfondie des principaux travaux (deuxième chapitre), nous avons vu que la tâche de conception d'un système explicatif était reconnue comme une tâche de haut niveau, que les chercheurs qualifient de *tâche de résolution de problème*. De nombreux points, comme la difficulté d'interagir avec l'utilisateur, l'acquisition des connaissances explicatives ou la génération des explications, rendent cette tâche complexe.

Cette étude nous a permis de poser les bases de notre réflexion. Nous nous sommes ensuite intéressés à la construction d'un système explicatif pour la conduite de procédés complexes. Ce domaine est fortement contraint. Les principales contraintes sont dues aux procédés, à l'activité de conduite et aux systèmes d'aide : un procédé continu demandant des réactions rapides et sûres, de nombreuses données numériques de fiabilité incertaine, une conduite généralement collective, une expertise de conduite difficile et des possibilités réduites d'interactions avec les utilisateurs.

En nous appuyant sur ces différents travaux, nous avons identifié les principales tâches des opérateurs de conduite et proposé un modèle simplifié de raisonnement en quatre phases : (1)

analyse des données, (2) interprétation de l'état présent, (3) élaboration d'un diagnostic et (4) choix d'une action à effectuer sur le procédé. A partir de ce modèle, nous avons identifié les quatre fonctions principales des systèmes d'aide à la conduite de procédés complexes : détection, état du procédé, diagnostic et conseil d'action. Ces quatre principales fonctions nous ont permis de poser les fondations pour la construction d'un système explicatif pour la conduite de procédés complexes.

Alors que de nombreux travaux s'intéressent au problème de l'acquisition de connaissances de métier, le recueil des connaissances explicatives est un problème encore peu abordé et pour lequel il n'existe pas de solution performante. Les connaissances traitées sont complexes et s'appuient sur des connaissances théoriques et pratiques du domaine, mais aussi sur des compétences de psychologie, de didactique et d'écoute. Nous avons cherché à identifier les contraintes, dues à la spécificité de la tâche d'explication, imposées à cette étape d'acquisition des connaissances explicatives et à dégager des méthodes permettant de réussir au mieux cette étape dans la construction d'un système explicatif. Pour cela, nous avons effectué une revue des techniques classiques (inspirée des techniques d'acquisition des connaissances de métier) et retenu cinq phases pour cette étape cruciale : (1) analyse de la documentation technique, (2) analyse approfondie de documents d'expertise, (3) observation en situation réelle, (4) interviews avec des opérateurs et des experts et (5) analyse ou autoconfrontation des interviews. Nous avons également abordé brièvement le problème de l'évaluation des connaissances explicatives, en proposant une liste de critères (par exemple : précision, clarté, complétude) avec lesquels on peut qualifier des explications données.

Une fois les connaissances explicatives recueillies et structurées, la *charpente* de notre thèse était réalisée, nous pouvions construire *les murs*. Pour cela, nous avons cherché à définir le cadre des explications : les explications sont destinées en priorité aux opérateurs de conduite, elles peuvent également servir aux experts, aux ingénieurs ou aux responsables de production. Elles ont pour but de faire comprendre et de faire accepter les résultats donnés, de faire partager le raisonnement suivi par le système et de faire apprendre de nouvelles connaissances aux utilisateurs. Le niveau des explications doit être précisément adapté à celui des utilisateurs, mais elles comporteront plusieurs niveaux d'information différents. Elles utiliseront plusieurs supports : texte, image, graphique, son, ...

Après avoir étudié les liens possibles avec les autres fonctions d'aide, nous avons identifié deux formes principales d'accès aux explications : (1) locales aux quatre fonctions du système ou (2) globales. Pour chaque explication identifiée, les éléments ou les informations à proposer peuvent, soit dérouler le raisonnement suivi par le SBC, soit inviter l'utilisateur à prolonger celui-ci.

Nous avons, enfin, évoqué le futur de la fonction d'explication et proposé des mécanismes qui permettent de la faire évoluer facilement pour qu'elle reste toujours en adéquation avec les besoins des utilisateurs et les connaissances incluses dans le système. Ce point est particulièrement important puisque, d'après notre expérience, une fonction d'explication n'est viable que si elle prend en compte les évolutions des utilisateurs, du système et des connaissances.

A la suite des propositions faites, nous avons réfléchi à l'architecture logicielle qu'il était possible de réaliser pour un système explicatif correspondant à nos propositions. Si on conserve la métaphore de la construction d'une maison, cette étape correspond à la mise en place du *système de chauffage* de la maison. Pour cela, nous avons analysé plusieurs exemples d'architecture de systèmes explicatifs et étudié les principales contraintes imposées à l'architecture, soit par la spécificité de la tâche d'explication, soit par les caractéristiques des systèmes d'aide à la conduite de procédés. Il est donc possible de réaliser une architecture logicielle distinguant trois niveaux. Le premier regroupe les modules accédant aux bases de données numériques et symboliques, aux bases de connaissances du métier et aux bases de connaissances explicatives. Le deuxième niveau construit les explications en fonction des structures pré-établies et de la demande d'explication. Le

troisième concerne l'interface homme-machine. Il construit les fenêtres contenant les explications et traite les interactions avec le système et les autres fonctions.

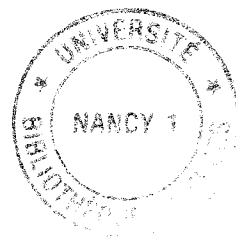
Nous avons également pu bénéficier des avantages de l'intelligence artificielle distribuée en proposant une architecture multi-agents structurée en quatre niveaux hiérarchiques.

Les explications sont données pour faire comprendre et faire accepter un résultat, ou pour faire partager un raisonnement. Elles servent également à la formation des opérateurs. Pour SACHEM, un des objectifs était de « permettre à l'opérateur de raisonner aussi efficacement que l'expert ». Dans ce cadre, la fonction d'explication participe au but de capitalisation des connaissances stratégiques de l'entreprise. Elle apparaît comme un outil du *knowledge management*.

SACHEM est un système d'aide à la conduite des hauts-fourneaux de Sollac. Son objectif est d'améliorer la régularité de la conduite des hauts-fourneaux par l'intégration des connaissances experts et l'amélioration de la perception des événements. Les explications sont nécessaires pour aider les opérateurs à la compréhension des résultats proposés par SACHEM et à leur analyse critique. Elles doivent servir à convaincre durablement l'opérateur et lui permettre de raisonner comme l'expert. Une maquette de fonction d'explication a été développée pour SACHEM pour mettre en application nos idées et répondre aux besoins des opérateurs.

L'analyse d'un document expert traitant d'un cas réel de garnissage/ dégarnissage nous a permis d'obtenir des exemples d'explications variées et complexes. Ce document a été complété par l'analyse d'un graphe de raisonnement expert, reformulé suivant le schéma de raisonnement des opérateurs de conduite. Une phase d'observation des utilisateurs soit pendant des modules de formation au système SACHEM, soit pendant des séances de compagnonage nous ont permis de constater que les opérateurs avaient une assez bonne compréhension du fonctionnement du système. Les interviews filmés et surtout les autoconfrontations réalisées ont conclu à l'importance des explications locales aux principales fonctions du système, complétées par des explications globales. Ils ont servi à identifier le niveau prioritaire des explications, utilisé également pour accéder à des informations complémentaires. Nous avons alors réalisé une maquette de la fonction d'explication intégrant des explications locales aux fonctions de détection et de recommandation d'action et permettant d'accéder à des explications sur la majorité des sujets abordés. Cette maquette comporte également une vue d'explication globale, construite comme la Une d'un journal.

Pour le bon développement d'un système explicatif, il est important de réfléchir au problème de l'introduction des explications et de leur structure le plus tôt possible. Les différentes étapes de réalisation du système explicatif ne sont pas indépendantes, il ne faut donc pas hésiter à revenir sur une étape supposée finie en fonction de nouvelles informations. Ajoutons également qu'aucune étape ne doit être négligée.



Perspectives

A court terme, en ce qui concerne la fonction d'explication pour le système SACHEM, il convient tout d'abord de valider les choix de propositions d'explications. Ces validations permettront d'écrire ou de finir d'écrire les spécifications détaillées de la fonction, puis de l'implanter au sein du système SACHEM. Il serait utile d'envisager une fonction d'explication hors ligne pour la formation. Cette fonction pourrait se baser sur les jeux d'essais enregistrés et comporter des explications rédigées *a posteriori* par les experts.

Nous avons travaillé sur la majorité des aspects relatifs à la réalisation d'une fonction d'explication pour la conduite de procédés. Chaque étape de cette réalisation peut, évidemment être améliorée. Nous allons décrire dans la suite les principales voies d'amélioration et les perspectives de travail.

Nous pensons qu'il est intéressant de se pencher sur les activités des opérateurs de conduite pour modéliser plus finement leur activité. Ce travail permettrait d'améliorer les explications locales et aiderait à la compréhension des besoins des utilisateurs.

La phase d'acquisition des connaissances explicatives nécessite encore de nombreuses améliorations essentiellement pour la typologie des stratégies d'explications utilisées, la modélisation et l'évaluation des connaissances explicatives.

Nous avons toujours été soucieux de structurer les explications recueillies. Ceci nous a permis de proposer plusieurs explications, locales ou globales, et au sein de celles-ci plusieurs types d'explications. Néanmoins améliorer les typologies existantes et proposer de véritables modèles d'explications est sûrement le point sur lequel il est le plus important de travailler à la suite des travaux de cette thèse.

Cette idée de modèle peut également être approfondie selon la technique de raisonnement à partir de modèle. En affinant les modèles d'explication, il serait possible d'utiliser cette technique pour proposer des explications à base de modèle.

De même, on peut évaluer l'apport des explications à partir de cas, mentionnées aux paragraphes 1.1.4 et 2.10.2, pour la conduite de procédés. De telles explications ont été proposées pour des défauts métallurgiques en laminoir dans un projet entre le LORIA et l'IRSID. On pourra s'intéresser particulièrement au raisonnement à partir de cas pour la construction des explications. Ainsi on constituera une base de cas comportant l'état courant avec les différents problèmes et les diagnostic ou les conseils d'action émis, en associant à une solution sous la forme d'explication à proposer. Dans une nouvelle situation délicate, on consultera la base de cas pour trouver la situation la plus proche de la situation courante, on adaptera alors l'explication qui avait pu être proposée en fonction des spécificités de la situation actuelle. L'utilisation du raisonnement à partir de cas pour la construction des explications nécessite que l'on sache définir des mesures de similarité pour comparer des situations. Elle nécessite surtout, ce qui est plus difficile, des méthodes pour adapter les explications de la base de cas à une nouvelle situation. Il faut modifier la structure globale de l'explication, mais aussi chaque éléments, chaque donnée, voire chaque morceau de texte ou d'image proposé.

Une autre voie d'amélioration des explications pour la conduite de procédés réside dans les interactions avec l'utilisateur. Générer des explications interactives, améliorer les interactions pour connaître, même succinctement, les compétences des opérateurs sont des voies de recherche.

La génération des explications est également une perspective de travail intéressante. Nous nous sommes basés sur une architecture à base de multi-agents et nous avons proposé plusieurs perspectives de génération de l'architecture proposée mais ce travail doit encore être approfondi et intégrer les dernières recherches en matière d'intelligence artificielle distribuée.

Nous nous sommes focalisés, dans cette thèse, sur les explications en situation de conduite plutôt que les explications destinées à la formation hors ligne. Cette possibilité mérite d'être étudiée attentivement, on pourra pour cela utiliser les travaux autour des systèmes d'aide à la formation, des simulateurs ou des systèmes d'aide à l'exploitation des simulateurs d'entraînements, ces derniers étant destinés à la formation professionnelle d'opérateurs humains engagés dans des tâches de supervision et de contrôle [Joab99].

Nous proposons enfin de travailler sur l'utilisation des explications pour la capitalisation des connaissances à la suite des idées énoncées au chapitre 7.

De même que nous avons cherché à introduire des explications dans le contexte de la conduite de procédés complexes, on peut chercher à introduire des explications dans d'autres domaines d'activité. En robotique mobile, par exemple, les explications que l'on introduira seront destinées aux concepteurs des systèmes de navigation et de planification. On proposa donc des explications internes permettant de comprendre les choix effectués par le système. Pour la fouille de données ou l'informatique décisionnelle en revanche, les explications seront données aux analystes ou aux experts du domaine afin de les aider dans leur tâche.

Les différentes étapes nécessaires à la réalisation d'un système explication ont été identifiées. Néanmoins, il est utile de travailler sur l'enchaînement de ces étapes à la suite de ce que nous avons esquissé dans le dernier chapitre. Nous pouvons pour cela nous baser sur un autre exemple de réalisation pratique de système explicatif. L'expérience pour la conduite des hauts-fourneaux a été très riche, une deuxième expérience nous permettrait d'améliorer notre démarche. Nous pouvons également envisager de réaliser un outil informatique implantant cette démarche pour aider à la réalisation d'un système explicatif.

Bibliographie

- [Acacia94] Acacia (Projet). – *Rapport d'activité INRIA*. – Rapport technique, Sophia-Antipolis, INRIA, 1994.
- [Afnor88] AFNOR. – *Ergonomie du logiciel*. – Association Française de Normalisation, 1988. recommandation Z 67 110.
- [AG et al.92] Aussenac-Gilles (N.), Krivine (JP) et Sallantin (J). – L'acquisition des connaissances pour les systèmes à base de connaissances. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 6, n1-2, 1992, pp. 7–18. – Editorial.
- [AG et al.93] Aussenac-Gilles (Nathalie) et Matta (Nada). – Enjeux d'une acquisition des connaissances basée sur l'explicitation d'un modèle plus générique de l'expertise. *Actes des 2^{ème} Journées Acquisition des connaissances (JAC-93)*. – Saint Raphaël, France, avril 1993.
- [AG et al.96] Alexis-Girault (Karine), Palies (Odile) et Safar (Brigitte). – Modèles de résolution et d'explication au bridge. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 135–149. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.
- [Alvarez91] Alvarez (Isabelle). – Explication comparative dans les systèmes experts. *Proceedings of 11th International Conference on Expert Systems and their Applications, General Conference, Second Generation Expert Systems*. pp. 173–184. – Avignon, France, mai 1991.
- [Alvarez92] Alvarez (Isabelle). – *Explication morphologique. Un mode d'explication fondé sur la géométrie*. – Orsay, France, Thèse de doctorat, Université Paris Sud, 1992.
- [Amerge et al.94] Amergé (C.) et Corby (O.). – Acquisition de connaissances pour des explications en contexte d'évaluation : application à une tâche de conception. *Actes du congrès ERGO-IA, Ergonomie et Intelligence Artificielle*, pp. 681–692. – Biarritz, France, octobre 1994.
- [Armengol et al.95] Armengol (Eva) et Plaza (Enric). – Explanation-based learning: A knowledge level analysis. *Artificial Intelligence Review*, vol. 9, n 1, 1995, pp. 19–35.
- [Auzende et al.96a] Auzende (Odette) et Joab (Michelle). – Explications dynamiques d'un dispositif simulé. *Actes du 10^{ème} congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*. AFCET, AFIA, pp. 387–394. – Rennes, France, janvier 1996.
- [Auzende et al.96b] Auzende (Odette) et Joab (Michelle). – L'explication temps réel : une aide à l'opérateur. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 93–105. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.

- [Balacheff90a] Balacheff (Nicolas). – Nature et objet du raisonnement explicatif. *Actes du colloque L'explication dans l'enseignement et l'E.I.A.O.*, éd. par Séré (M.G.) et Weil-Barais (A.). pp. 97–113. – Cachan, France, avril 1990.
- [Balacheff90b] Balacheff (Nicolas). – Problèmes de la production d'une explication : aspects conceptuels et langagiers. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 4, n2, 1990, pp. 149–160.
- [Balacheff92] Balacheff (Nicolas). – Modélisation de l'utilisateur dans l'explication. *EXPLICATION-92 2^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 235–236. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992. Table ronde.
- [Barboux et al.90] Barboux (C.), Bouri (M.), Dieng (R.), Kassel (G.) et Safar (B.). – La production et l'emploi d'explications dans les systèmes à base de connaissances. *3^{èmes} Journées Nationales du PRC-GDR IA*, éd. par Bouchon-Meunier (B.). pp. 327–339. – Paris-la-Défense, France, mars 1990.
- [Barletta et al.88] Barletta (Ralph) et Mark (William). – Explanation-based indexing of cases. *Proceedings of 7th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Learning and Knowledge Acquisition*. AAAI, pp. 541–546. – Saint Paul, Minnesota, USA, août 1988.
- [Barthes98] Barthès (Jean-Paul). – Les utilisateurs face à la capitalisation des connaissances. *Méthodes et outils pour la mémoire d'entreprise - Club CRIN Ingénierie du traitement de l'information*. Association ECRIN. – Paris, France, avril 1998.
- [Basseville et al.96] Basseville (Michèle) et Cordier (Marie-Odile). – *Surveillance et diagnostic de systèmes dynamiques : approches complémentaires du traitement du signal et de l'intelligence artificielle*. – publication interne n 1004, IRISA, mars 1996. article présenté à l'occasion d'un tutoriel au congrès RFIA'96.
- [Bassik97] Bassik (Sophie). – Sachem : quand la sagesse devient artificielle. *Alize*, juin 1997.
- [Bayad et al.94] Bayad (Rachid) et Falinower (Clément-Marc). – MAIN pour SACSO : un module d'aide interactif pour le système d'aide à la conduite SACSO. *Actes du congrès ERGO-IA, Ergonomie et Intelligence Artificielle*, pp. 524–531. – Biarritz, France, octobre 1994.
- [Bedou et al.96] Bedou (Isabelle) et Hérin (Danièle). – Le rôle des explications dans la coopération entre systèmes d'informations. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 63–76. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.
- [Beranger et al.94] Béranger (Gérard), Henry (Guy) et Sanz (Germain). – *Le livre de l'Acier*, chap. 56, pp. 1187–1229. – Technique et Documentation- Lavoisier, 1994. réalisé avec le concours de SOLLAC.
- [Berger90] Berger (Alain). – *Ergonomie cognitive de l'interface homme-machine d'un système pédagogique à base de connaissances à finalité industrielle*. – Paris, France, Thèse de doctorat, Université Paris 6, juin 1990.
- [Berry et al.95] Berry (D. C.), Gillie (T.) et Bandury (S.). – What do patients want to know: an empirical approach to explanation generation and validation.

-
- Expert Systems With Applications, Special issue "Explanation: the way forward", vol. 8, n4, 1995, pp. 419–428.*
- [Berry95] Berry (Dianne C.). – Explanation: the way forward. *Expert Systems With Applications, Special issue "Explanation: the way forward", vol. 8, n4, 1995, pp. 399–401.* – Guest Editor's Preface.
- [Blondel96] Blondel (François-Marie). – *Diagnostic et aide en EIAO: étude d'un environnement d'aide à la résolution de problèmes en chimie.* – Nancy, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université Henri Poincaré-Nancy 1, juillet 1996.
- [BM et al.95] Berthomé-Montoy (Aline) et Fouet (Jean-Marc). – Utilisation de méta-connaissances pour adapter l'aide à l'utilisateur. *Actes du 13^{ème} congrès INFORSID, Session 6 Acquisition et Modélisation des connaissances*, pp. 329–342. – Grenoble, France, juin 1995.
- [Bonnet98] Bonnet (Alain). – L'intelligence artificielle existe et elle est opérationnelle. *L'informatique professionnelle*, no161, février 1998.
- [Bourcier et al.92] Bourcier (F.) et Gréboval (M.H.). – Représentation du contenu d'une explication. *Actes des 1^{ères} Rencontres des jeunes chercheurs en IA. AFIA*, pp. 52–65. – Rennes, septembre 1992.
- [Bourcier et al.94] Bourcier (F.), Gréboval (M.H.), Kassel (G.) et Trigano (P.). – Construction d'une explication et génération en langue naturelle. *Actes du 9^{ème} congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle. AFCET/AFIA*, pp. 615–625. – Paris, France, janvier 1994.
- [Bourcier96] Bourcier (Frédéric). – *Représentation des connaissances pour la résolution de problèmes et la génération d'explications en langue naturelle: contribution au projet AIDE.* – Compiègne, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université de Technologie de Compiègne, juillet 1996.
- [Bouri90] Bouri (Mounia). – *L'explication dans les systèmes experts: étude synthétique et extension au raisonnement incertain - Le système SERIN.* – Toulouse, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université Paul Sabatier, décembre 1990.
- [Bredillet et al.94] Bredillet (P.), Delouis (I.), Eyrolles (P.), Jehl (O.), Krivine (JP.) et Thiault (P.). – The AUSTRAL expert system for power restoration on distribution systems. *Proceedings of ISAP-94*, pp. 295–302. – EC2, 1994.
- [Brezillon89] Brézillon (Patrick). – Notion d'interprétation dans les systèmes experts explicatifs. Application au système SEPT. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 3, n3, 1989, pp. 7–18.
- [Brezillon91] Brézillon (Patrick). – Utiliser la structuration des connaissances d'un système à base de connaissances pour expliquer. *Actes du 8^{ème} congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle. AFCET/AFIA*, pp. 1167–1174. – Lyon, France, novembre 1991.
- [Brezillon92] Brézillon (Patrick). – Intervention de l'utilisateur dans les explications. *EXPLICATION-92 2^{èmes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 105–113. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992.
- [Buchanan et al.84] Buchanan (Bruce G.) et Shortliffe (Edward H.). – *Rule-Based Expert Systems The Mycin Experiments of the Stanford Heuristic Program-*

- ming Project*. – Reading, Mass., USA, Addison-Wesley, 1984, *Artificial Intelligence*.
- [Buchanan et al.95] Buchanan (B.), Moore (J.), Forsythe (D.), Carenini (G.), Ohlsson (S.) et Banks (G.). – An intelligent interactive system for delivering individualized information to patients. *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 7, n2, 1995, pp. 117–154.
- [Cadres97] Cadres (Courrier). – Sachem : une technologie spatiale pour optimiser les hauts-fourneaux. *Courrier Cadres*, mars 1997.
- [Camps et al.93] Camps (V.), Carpuat (B.), Cevallos-Sakdavong (N.), Cohen (P.), Beron (F.), Gleizes (M.-P.), Glize (P.), Machonin (A.), Pezet (J.), Piquemal-Baluard (C.), Régis (C.) et Trouillet (S.). – *Rapport d'activité de l'équipe SMI: le projet SYNERGIC*. – rapport interne n IRT/93-46-R, Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, 1993.
- [Canamero et al.92] Cañamero (Dolores), Delannoy (Jean-François) et Kodratoff (Yves). – Explications dans un système de reconnaissance de plan pour l'aide à la décision. *EXPLICATION-92 9^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 115–129. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992.
- [Carcagno et al.92] Carcagno (Denis) et Thomas (Isabelle). – Contructions d'explications pour un système expert. *Proceedings of 12th International Conference on Artificial Intelligence, Expert Systems and Natural Languages*. EC2, pp. 93–104. – Avignon, France, juin 1992.
- [Carletta90] Carletta (Jean). – An architecture facilitating repair and replaining in interactive explanations. *Proceedings of the 5th Alvey UK Explanation Workshop*, éd. par Filer (N.), pp. 1–8. – Manchester, UK, avril 1990.
- [Carriere et al.90] Carrière (Elisabeth), Delozanne (Elisabeth) et Vivet (Martial). – Des connaissances pour produire des explications dans un tuteur intelligent. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 4, n2, 1990, pp. 113–123.
- [Cawsey88] Cawsey (Alison). – Generating tutorial explanatory dialogues. *Proceedings of the 4th Alvey Explanation Workshop*, pp. 87–101. – Manchester, UK, septembre 1988.
- [Cawsey91] Cawsey (Alison). – Generating interactive explanations. *Proceedings of 9th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Generation and Interaction*. AAAI, pp. 86–91. – Anaheim, California, USA, juillet 1991.
- [Cawsey92] Cawsey (Alison). – *Explanation and interaction: the computer generation of explanatory dialogues*. – The MIT press, 1992.
- [Cawsey95] Cawsey (Alison). – Developping an explanation component for a knowledge-based system: Discussion. *Expert Systems With Applications, Special issue "Explanation: the way forward"*, vol. 8, n4, 1995, pp. 527–531.
- [Chandrasekaran et al.89] Chandrasekaran (B.), Tanner (Michael C.) et Josephson (John R.). – Explaining control strategies in problem solving. *IEEE Expert*, vol. 4, spring 1989, pp. 9–24.
- [Chandrasekaran86] Chandrasekaran (B.). – Generic tasks in knowledge-based reasoning: high level building blocks for expert system design. *IEEE expert*, no1, 1986, pp. 23–30.

-
- [Charnay96a] Charnay (Laurent). – Dialogue et explication dans les systèmes à base de connaissances : un modèle informatique pour l'acte de dialogue explicatif. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 31–45. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.
- [Charnay96b] Charnay (Laurent). – Dialogue et explication dans les systèmes à base de connaissances : un modèle pour l'acte de dialogue explicatif. *Actes des 3^{èmes} Rencontres des jeunes chercheurs en IA*, éd. par T. Schanb, L. Siklóssy (P. Lamarre). AFIA, p. 259. – Nantes, Aout 1996. Poster.
- [Chevrier et al.91] Chevrier (Vincent) et Haton (Jean-Paul). – Un mécanisme explicatif pour la mise au point d'un système à architecture de tableau noir. *Proceedings of 11th International Conference on Expert Systems and their Applications*, pp. 67–80. – Avignon, France, mai 1991.
- [Chouvet et al.96] Chouvet (M.-P.), Lallier (M.) et Haton (J.-P.). – Une approche multi-agents pour modéliser et représenter un système d'interfaces homme-machine. *Actes du 10^{ème} congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*. – Rennes, janvier 1996.
- [Chouvet92] Chouvet (Marie-Pierre). – *Un environnement pour faciliter acquisition, représentation des connaissances et explication pour l'aide à la décision. Application à la radiothérapie*. – Nancy, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université de Nancy 1, septembre 1992.
- [Clancey et al.81] Clancey (W.J.) et Letsinger (R.). – NEOMYCIN: Reconfiguring a Rule-Based Expert System for Application to Teaching. *Proceedings 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 829–835. – Vancouver, Canada, août 1981.
- [Clancey83] Clancey (W.J.). – The Epistemology of a Ruled-based Expert System –a Framework for Explanation. *Artificial Intelligence*, vol. 20, 1983, pp. 215–251.
- [Clancey92] Clancey (William J.). – Model construction operators. *Artificial Intelligence*, vol. 53, 1992, pp. 1–115.
- [Clancey93] Clancey (William J.). – Notes on "epistemology of a ruled-based expert system". *Artificial Intelligence*, vol. 59, 1993, pp. 197–204.
- [Colby et al.69] Colby (Kenneth Mark) et Smith (David Canfield). – Dialogues between humans and an artificial belief system. *Proceedings International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 319–324. – Washington, D.C. (USA), mai 1969.
- [Cooke94] Cooke (N.J.). – Varieties of knowledge elicitation techniques. *Int. Journal of Human-Computer Studies*, vol. 41, 1994, pp. 801–849.
- [Cordier et al.97] Cordier (MO.), Thiébaux (S.), Jehl (O.) et Krivine (JP.). – Supply restoration in power distribution systems: a reference problem in diagnosis and reconfiguration. *Proceedings of DX'97, 8th International workshop on Principles of Diagnosis*, éd. par Cordier (Marie-Odile), pp. 27–34. – Le Mont-Saint-Michel, France, 1997.
- [Courtois90] Courtois (Joël). – *SIAM: un système de diagnostic qui s'adapte aisément à de nouveaux domaines et qui enseigne sa méthode*. – Paris, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université Pierre et Marie Curie, octobre 1990.

- [Damme et al.92] Damme (D. Van), Notte (Dina) et Tischendorf (Gérard). – *Rapport phase 1: observations en salle de contrôle*. – Rapport technique, Sollac, avril 1992. réalisé par Ergodin.
- [David et al.90] David (Jean-Marc) et Krivine (Jean-Paul). – Structuration du raisonnement et explications. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 4, n2, 1990, pp. 77–88.
- [Davis et al.77] Davis (Randall), Buchanan (Bruce G.) et Shortliffe (Edward H.). – Production rules as a representation for a knowledge-based consultation program. *Artificial Intelligence*, vol. 8, 1977, pp. 15–45.
- [Davis et al.93] Davis (Randall), Buchanan (Bruce G.) et Shortliffe (Edward H.). – Retrospective on "production rules as a representation for a knowledge-based consultation program". *Artificial Intelligence*, vol. 59, 1993, pp. 181–189.
- [Delozanne et al.92] Delozanne (Elisabeth) et Carrière (Elisabeth). – Définir un processus explicatif, une étude de cas : la conception d'elise. *EXPLICATION-92 2^{èmes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 195–208. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992.
- [Delsart95] Delsart (Fabrice). – *Diagnostic collectif dans la conduite de processus industriel: coopération et ergonomie des systèmes Homme-Homme et Homme-Machine*. – Paris, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université Paris 8, UFR de Psychologie, décembre 1995.
- [Dieng et al.98] Dieng (Rose), Corby (Olivier), Giboin (Alain) et Ribiere (M.). – Methods and tools for corporate knowledge management. *Knowledge Acquisition Workshop, KAW'98*. – Alberta, Canada, avril 1998.
- [Dieng87] Dieng (Rose). – Un système expert explicateur. *Journées Représentation du Raisonnement*. INRIA. – Sophia-Antipolis, janvier 1987.
- [Dieng90] Dieng (Rose). – *Méthodes et outils d'acquisition des connaissances*. – Rapport technique n1319, Sophia-Antipolis, INRIA, Novembre 1990.
- [Dieng98] Dieng (Rose). – Méthodes et outils pour la gestion de mémoire d'entreprise. *Méthodes et outils pour la mémoire d'entreprise - Club CRIN Ingénierie du traitement de l'information*. Association ECRIN. – Paris, France, avril 1998.
- [Dolenc et al.96] Dolenc (N.), Libralesso (J.M.), Thirion (C.C.), Gobrecht (A.), Lessaffre (F.M.), Helleisen (M.), Lallier (M.), Steiler (J.M.) et Lemuet (D.). – The sachem project computer assisted blast furnace control system: prospect and opportunities, development and initial results. *3rd International Iron making congress*. – Gant, Belgium, septembre 1996.
- [dS89] de Siqueira (José L.). – Correction de programmes prolog à partir d'explications. *4^{èmes} Journées Françaises de l'Apprentissage*. INRIA, pp. 183–193. – Saint Malo, France, mai 1989.
- [Dugdale96] Dugdale (Julie). – Cooperative problem-solving using assumption-based truth maintenance. *COOP'96, 2nd International Conference on the Design of Cooperative Systems*. INRIA, pp. 605–624. – Juan-les-Pins, France, juin 1996.
- [Duprez96a] Duprez (Karine). – Aide interactive pour un outil de conception.

-
- EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 107–120. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.
- [Duprez96b] Duprez (Karine). – *Explications et conseils contextuels pour l'utilisation d'un progiciel de conception : application à un simulateur de circuits électroniques*. – Grenoble, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université de Grenoble, INPG, 1996.
- [Eberhart95] Eberhart (Russel C.). – Using evolutionary computation tools in explanation facilities. *International Journal of Expert Systems*, vol. 8, n 3, 1995, pp. 277–285.
- [Ermine98] Ermine (Jean-Louis). – La méthode MKSM pour l'aide à la gestion du patrimoine des connaissances. *Méthodes et outils pour la mémoire d'entreprise - Club CRIN Ingénierie du traitement de l'information*. Association ECRIN. – Paris, France, avril 1998.
- [Eva95] EVA (Groupe). – EVA : modélisation et représentation de connaissances hétérogènes, guidées par les besoins en Explication Validation et Acquisition. *5^{èmes} Journées Nationales du PRC-GDR IA*. pp. 263–282. – Nancy, France, février 1995.
- [Falzon89] Falzon (Pierre). – *Ergonomie cognitive du dialogue*. – Presses universitaires de Grenoble, 1989, *Sciences et technologies de la connaissance*.
- [Falzon96] Falzon (Pierre). – L'explication au travail. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 3–13. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996. conférence invitée.
- [Farreny et al.87] Farreny (Henri) et Ghallab (Mallik). – *Eléments d'Intelligence Artificielle*. – Paris, Hermès, 1987.
- [Farreny et al.90] Farreny (Henri) et Prade (Henri). – Explications de raisonnement dans l'incertain. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 4, n2, 1990, pp. 43–75.
- [Feiner et al.90] Feiner (Steven K.) et McKeown (Kathleen R.). – Coordinating text and graphics in explanation generation. *Proceedings of 8th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Intelligent Interfaces*. AAAI, pp. 442–449. – Boston, USA, août 1990.
- [Ferber95] Ferber (Jacques). – *Les Systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. – InterEditions, 1995, *série Informatique Intelligence Artificielle*.
- [Ferraris92] Ferraris (Christine). – *Acquisition des connaissances et raisonnement dans un univers multi-agents : application à la prise de décision en génie civil urbain*. – Nancy, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université de Nancy 1, février 1992.
- [Flieller et al.96] Flieller et Sautré. – Evaluations d'explications par des juges et par leur caractéristiques formelles. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.
- [Forsythe95] Forsythe (Diana E.). – Using ethnography in the design of an explanation system. *Expert Systems With Applications, Special issue "Explanation: the way forward"*, vol. 8, n4, 1995, pp. 403–417.

- [Frohlich88] Frohlich (David M.). – Conversational dynamics for emergent explanation. *Proceedings of the 4th Alvey Explanation Workshop*, pp. 112–123. – Manchester, UK, septembre 1988.
- [Gabriel96a] Gabriel (Jean-Marc). – Des explications dans un système d'apprentissage. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.
- [Gabriel96b] Gabriel (Jean-Marc). – Explications et système d'apprentissage. *Actes des 3^{èmes} Rencontres des jeunes chercheurs en IA*, éd. par T. Schanb, L. Siklóssy (P. Lamarre). AFIA, pp. 103–109. – Nantes, Aout 1996.
- [Gautier et al.91] Gautier (Patrice O.) et Gruber (Thomas R.). – Generationg explanations of device behavior using compositional modeling and causal ordering. *Proceedings of 11th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Intelligent User Interfaces*. AAAI, pp. 264–270. – Washington, DC, USA, juillet 1991.
- [Gene95] GENE (Groupe). – La génération d'explications négociées dans un système à base de connaissance. *5^{èmes} Journées Nationales du PRC-GDR IA*. pp. 297–316. – Nancy, France, février 1995.
- [Gene96] GENE (Groupe). – Conception d'une interface de discussion d'un diagnostic médical intégrant l'explication, l'argumentation et la négociation. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 17–30. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.
- [Giboin et al.92] Giboin (Alain) et Amergé (Christelle). – L'évaluation des explications : approche multi-évaluateurs. *EXPLICATION-92 2^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 209–220. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992.
- [Giboin95] Giboin (Alain). – Dossier explication et systèmes à base de connaissances. *Bulletin de l'AFIA*, vol. 20, janvier 1995, pp. 21–47.
- [gO92] groupe Opérateur 95. – *Compte-rendu de la réunion du 10/04/96 : Synthèse des compétences requises par niveau d'opérateur*. – Rapport technique, Sollac, avril 1992.
- [Greboval et al.94] Gréboval (Marie-Hélène) et Kassel (Gilles). – The production of explanations, seen as a design task: a case study. *Proceedings of 11th European Conference on Artificial Intelligence*, éd. par Cohn (A.). pp. 351–355. – Amsterdam, Hollande, 1994.
- [Greboval94] Gréboval (Marie-Hélène). – *La production d'explications, vue comme une tâche de conception : contribution au projet AIDE*. – Compiègne, France, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, décembre 1994.
- [Greboval96a] Gréboval (Marie-Hélène). – Représentations et construction d'explications : application au projet AIDE. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 10, n4, 1996, pp. 507–530.
- [Greboval96b] Gréboval (Marie-Hélène). – Vers une représentation du dialogue explicatif. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 263–274. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.

-
- [Grize96] Grize (Jean-Blaise). – Une explication ne prouve rien. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 287–291. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996. conférence invitée.
- [Gruber et al.93] Gruber (Thomas R.) et Gautier (Patrice O.). – Machine-generated Explanations of Engineering Models: A Compositional Modeling Approach. *Proceedings 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1502–1508. – Chambéry, France, août 1993. Natural Language.
- [Grundstein95] Grundstein (Michel). – La capitalisation des connaissances de l'entreprise: système de production de connaissances. *symposium L'entreprise apprenante et les sciences de la complexité*. – Aix-en-Provence, France, mai 1995.
- [Grundstein96] Grundstein (Michel). – La capitalisation des connaissances de l'entreprise une problématique de management. *5^{me} Rencontres du programme MCX, complexité: la stratégie de reliance*. – Aix-en-Provence, France, juillet 1996.
- [Hair et al.92] Hair (D. Charles), Pickslay (Kent) et Chow (Steve). – Explanation-based decision support in real time situations. *Proceedings 4th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*. IEEE, pp. 22–25. – Arlington, Virginia, USA, novembre 1992.
- [Haton et al.87] Haton (J.-P.), Lâasri (H.) et Mondot (T.). – Atome (another tool for developing multi-expert systems). *Proceedings Workshop on Blackboard Systems: Implementation issues*. – Seattle, Washington (USA), 1987.
- [Haton et al.88] Haton (J.P.), Haton (M.C.), Lupin (B.), Riggi (P.) et Vion (E.). – Formation aux consignes d'exploitation en métallurgie assistée par ordinateur: le système consol. *Actes des 8^{mes} Journées Internationales: Les systèmes experts et leurs applications*. – Avignon, France, juin 1988.
- [Haton et al.91] Haton (J.P.), Bouzid (N.), Charpillet (F.), Haton (M.C.), Lâasri (B.), Lâasri (H.), Marquis (P.), Mondot (T.) et Napoli (A.). – *Le raisonnement en Intelligence Artificielle, Modèles, techniques et architecture pour les systèmes à bases de connaissances*. – InterEditions iia, 1991, 43–44p.
- [Helander et al.97] Helander (Martin G.), Landauer (Thomas K.) et Prabhu (Prasad V.) (édité par). – *Handbook of human-computer interaction*. – Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), 1997, 2nd compl. rev. édition.
- [Hoc et al.92] Hoc (Jean-Michel) et Samur cay (Renan). – An ergonomic approach to knowledge representation. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 36, 1992, pp. 217–230.
- [Hoc89a] Hoc (Jean-Michel). – La conduite d'un processus continu à longs délais de réponse: une activité de diagnostic. *Le Travail Humain*, vol. 52, n 4, 1989, pp. 289–316.
- [Hoc89b] Hoc (Jean-Michel). – Strategies in controlling process with long res-

- ponse latencies: needs for computer support to diagnosis. *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 30, 1989, pp. 47-67.
- [Hoc91] Hoc (Jean-Michel). – Effet de l'expertise des opérateurs et de la complexité de la conduite d'un processus continu à longs délais de réponse : le haut fourneau. *Le Travail Humain*, vol. 54, n3, 1991, pp. 225-249.
- [Hoc95] Hoc (Jean-Michel). – Planning in diagnosing a slow process: some implications on the design of human operator computer support. *Zeitschrift für Psychologie*, vol. 203, 1995, pp. 101-115.
- [Hoc96] Hoc (Jean-Michel). – Effects of operator expertise and verbal reports on temporal data: supervision of a long-time lag process (blast furnace). *Ergonomics*, vol. 39, n6, 1996, pp. 811-825.
- [HR92] Hayes-Roth (F.). – Expert systems. *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, éd. par Shapiro (Stuart C.), pp. 477-489. – Wiley-Interscience, 1992. 2nd edition.
- [Hughes86] Hughes (Sheila). – HOW and WHY: HOW far will they take us, and WHY should we need any more? *Proceedings of the 1st Alvey Explanation Workshop*, pp. 69-82. – Surrey, UK, mars 1986.
- [Irsid94] Irsid. – *Vademecum outils sidérurgiques*. – Document à usage interne, IRSID USINOR, juin 1994.
- [JD90a] Jimenez-Dominguez (Claudia). – PROSE: une architecture pour l'explication dans les systèmes experts à base de règles de production. *Convention IA, 2^{èmes} conférence européenne sur les techniques et les applications de l'Intelligence Artificielle en milieu industriel et de services*. pp. 241-255. – Paris, France, janvier 1990.
- [JD90b] Jimenez-Dominguez (Claudia). – *Sur l'explication dans les systèmes à base de règles : le système PROSE*. – Paris, France, Thèse de doctorat, Université Paris VI, novembre 1990.
- [JD92] Jimenez-Dominguez (Claudia). – L'explicitation des connaissances de contrôle et de stratégie en vue de l'explication. *EXPLICATION-92 2^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 131-146. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992.
- [Joab90] Joab (Michelle). – NAIADÉ, un système expert pour un dialogue explicatif. *Convention IA, 2^{èmes} conférence européenne sur les techniques et les applications de l'Intelligence Artificielle en milieu industriel et de services*. pp. 257-270. – Paris, France, janvier 1990.
- [Joab99] Joab (Michelle). – *Méthodologie de conception des Systèmes d'Aide à l'Exploitation des Simulateurs d'Entraînement*. – Paris, France, Habilitation à diriger des recherches, Université Paris 6, janvier 1999. LIP6.
- [Jones93] Jones (John Dewey). – Explanation in mixed-initiative systems. *Proceedings of 9th CAIA, Conference on Artificial Intelligence for Application*. p. 456. – Orlando, Florida, March 1-5 1993. Poster.
- [Jooste et al.96] Jooste (A.) et Duffy (N.). – Knowledge management competencies as the building blocks of a knowledge-rich organization. *Advances in knowledge management*, vol. 1, 1996.
- [Josephson et al.87] Josephson (John R.), Chandrasekaran (B.), Smith (Jack W.) et Tanner (Michael C.). – A mechanism for forming composite explanatory

-
- hypotheses. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-17, n3, may/june 1987, pp. 445–454.
- [Kambhampati et al.91] Kambhampati (Subbarao) et Kedar (Smadar). – Explanation-Based Generalization of Partially Ordered Plans. *Proceedings of 9th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Planning Perception and Robotics, Hierarchy in Planning*. AAAI, pp. 679–685. – Anaheim, California, USA, juillet 1991.
- [Karsenty et al.95a] Karsenty (L.) et Brézillon (P.). – Cooperative problem solving and explanation. *Expert Systems With Applications, Special issue "Explanation: the way forward"*, vol. 8, n4, 1995, pp. 445–462.
- [Karsenty et al.95b] Karsenty (L.) et Brézillon (P.). – Coopération homme-machine et explication. *Le Travail Humain*, vol. 58, n4, 1995, pp. 289–310.
- [Karsenty96] Karsenty (Laurent). – Tailoring explanations in cooperative dialogues. *COOP'96, 2nd International Conference on the Design of Cooperative Systems*. INRIA, pp. 405–420. – Juan-les-Pins, France, juin 1996.
- [Kassel et al.90] Kassel (Gilles) et Safar (Brigitte). – éditorial. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 4, n2, mai 1990, pp. 7–9.
- [Kassel et al.92] Kassel (G.), Gréboval (M.H.), Gréboval (C.) et Bourcier (F.). – Raisonner au bon niveau d'abstraction pour produire de meilleures explications : une étude de cas. *EXPLICATION-92 2^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 147–161. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992.
- [Kassel86a] Kassel (Gilles). – Expliquer, c'est raisonner sur le raisonnement : le système CQFE. *Actes des 6^{èmes} Journées Internationales : Les systèmes experts et leurs applications*. pp. 973–990. – Avignon, France, juin 1986.
- [Kassel86b] Kassel (Gilles). – *Le système d'explication CQFE, une forme de méta-raisonnement intégrant règles et objets*. – Orsay, France, Thèse de doctorat, Université Paris Sud, décembre 1986.
- [Kassel88] Kassel (Gilles). – Deux directions de recherche pour l'explication du raisonnement. *Actes des 8^{èmes} Journées Internationales : Les systèmes experts et leurs applications*. pp. 305–318. – Avignon, France, juin 1988.
- [Kassel89] Kassel (Gilles). – Systèmes experts de seconde génération & explication du raisonnement. *Actes des 9^{èmes} Journées Internationales : Les systèmes experts et leurs applications*. pp. 223–234. – Avignon, France, juin 1989.
- [Kassel90] Kassel (Gilles). – L'apport des Systèmes Experts de Seconde Génération à l'Explication du Raisonnement. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 4, n2, 1990, pp. 89–99. – In another form In *Actes du congrès Avignon'89* as Systèmes Experts de Seconde Génération et Explication du Raisonnement.
- [Kassel95] Kassel (Gilles). – *Contribution à la représentation des connaissances pour les systèmes experts de 2^{nde} génération Le projet AIDE*. – Rapport d'Habilitation de recherche n95/55, Compiègne, Heudiasyc, Septembre 1995.

- [Klein94] Klein (David A.). – *Decision-Analytic Intelligent Systems, Automated Explanation and Knowledge Acquisition*. – Hillsdale, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, 1994.
- [Knoblock et al.91] Knoblock (Craig A.), Minton (Steve) et Etzioni (Oren). – Integrating Abstraction and Explanation-Based Learning in PRODIGY. *Proceedings of 9th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Learning, search control*. AAAI, pp. 541–546. – Anaheim, California, USA, juillet 1991.
- [Koert et al.92] Koert (F.) et Winter (J.). – Use of Expert Systems in the Metallurgical Industry. Process Monitoring by Means of so-called Artificial Intelligence: the Expert System Blast Furnace (Deutsch). *Berg- und Huttenmannische Monatshefte*, vol. 137, n2, mars 1992, pp. 77–78. – source: Magazine des articles résumés pour Sollac, n° 19, Mars 1994.
- [Labat et al.96] Labat (J.M.), Pomerol (J.Ch.) et Nigro (J.M.). – Computer and human problem solving strategies, the case of the tower of hanoi. *Antwerp papers in linguistics*, no85, 1996. – also as rapport LAFORIA 97/02.
- [Lambert et al.97a] Lambert (Simon) et Ringland (Gordon). – *Methodological lessons from the TAP-EXTRA project*. – Rapport technique n ESPRIT project 20719, Rutherford Appleton Laboratory, août 1997. public.
- [Lambert et al.97b] Lambert (Simon), Ringland (Gordon), Bailly (Claude) et Sacareau (Pierre). – *Report on requirements in the wider context*. – Rapport technique n Deliverable document D4.2, Rutherford Appleton Laboratory and Suez-Lyonnaise des Eaux, février 1997. public.
- [Lambert et al.97c] Lambert (Simon), Ringland (Gordon), Bailly (Claude) et Sacareau (Pierre). – *TAP-EXTRA project final report*. – Rapport technique n ESPRIT project 20719, Rutherford Appleton Laboratory and Suez-Lyonnaise des Eaux, septembre 1997. public.
- [Larousse86] Larousse. – *Petit Larousse illustré, dictionnaire encyclopédique pour tous*. – Paris, Librairie Larousse, 1986.
- [Leake92] Leake (David B.). – *Evaluating Explanations: A Content Theory*. – Lawrence Erlbaum Associates, 1992.
- [Leake95] Leake (David B.). – Adaptive Similarity Assesment for Case-Based Explanation. *International Journal of Expert Systems Research and Applications*, vol. 8, n2, 1995, pp. 165–194.
- [Leake96] Leake (David B.) (édité par). – *Case-based reasoning: experiences, lessons, and future directions*. – AAAI Press/ MIT Press, 1996.
- [Lehnert77] Lehnert (Wendy G.). – A conceptual theory for question answering. *Proceedings 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 158–164. – Cambridge, Massachusetts (USA), août 1977.
- [Lejeune et al.99] Lejeune (Marc), Lallier (Martial), Thirion (Claude-Charles), Haton (Marie-Christine) et Haton (Jean-Paul). – Conception of an explanation function in an industrial monitoring system. *WMC'99 Second World Manufacturing Congress*. ICSC. – University of Durham, UK, septembre 1999. to be published.
- [Lejeune97] Lejeune (Marc). – *Etat d'avancement de la fonction d'explication de*

-
- SACHEM*. – Rapport technique, IRSID, note N /IIA 97.07, octobre 1997.
- [Lejeune98] Lejeune (Marc). – *Etude et maquettage de la fonction d'explication pour le système SACHEM*. – Rapport technique, IRSID, note N /IIA 98.04, novembre 1998.
- [Lemaire et al.91] Lemaire (Benoît) et Safar (Brigitte). – ESMEERALDA: une architecture pour construire une explication par coopération de connaissances. *Proceedings of 11th International Conference on Expert Systems and their Applications*, pp. 81–93. – Avignon, France, mai 1991.
- [Lemaire92a] Lemaire (Benoît). – Aspects constructifs de la production d'une explication: l'architecture ESMEERALDA. *EXPLICATION-92 2^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 165–178. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992.
- [Lemaire92b] Lemaire (Benoît). – Construction d'explications: utilisation d'une architecture de tableau noir. *4^{èmes} Journées Nationales du PRC-GDR IA*, pp. 471–494. – Marseille, France, octobre 1992.
- [Lemaire92c] Lemaire (Benoît). – *Construction et transmission d'explications dans les systèmes à base de connaissances*. – Orsay, France, Thèse de doctorat, Université Paris Sud, novembre 1992.
- [Lester et al.91] Lester (J. C.) et Porter (B. W.). – An architecture for planning multi-paragraph pedagogical explanations. *Proceedings of 9th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, Workshop on Comparative Analysis of Explanation Planning Architecture*, pp. 27–41. – Anaheim, USA, July 1991.
- [Levrat et al.94] Levrat (Bernard) et Thomas (Isabelle). – Prendre en compte les attentes de l'utilisateur: vers des explications pertinentes. *Actes du 8^{ème} congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*. AF-CET/AFIA, pp. 573–584. – Paris, France, janvier 1994.
- [Marquis89] Marquis (Pierre). – Une étude formelle de la recherche d'explications fondée sur la logique. *4^{èmes} Journées Françaises de l'Apprentissage*. INRIA, pp. 137–151. – Saint Malo, France, mai 1989.
- [Martin93] Martin (Philippe). – Adaptation de KADS pour la construction de Système à Base de Connaissance explicatifs. *Actes des Journées Acquisition, Validation et apprentissage (JAVA-93), 4^{ème} Journées Acquisition des connaissances (JAC-93)*. – Saint Raphaël, France, avril 1993.
- [Martin94] Martin (Philippe). – *La méthodologie d'acquisition des connaissances-KADS et les explications*. – Rapport technique, INRIA, 1994.
- [Masson96] Masson (Michel). – Réifier le raisonnement pour améliorer les explications dans les systèmes à base de connaissances: une application au diagnostic médical. *Actes des 3^{èmes} Rencontres des jeunes chercheurs en IA*, éd. par T. Schanb, L. Siklóssy (P. Lamarre). AFIA, pp. 135–143. – Nantes, Aout 1996.
- [Maybury91] Maybury (Mark T.). – Planning multimedia explanations using communicative acts. *Proceedings of 9th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session User Interfaces*. AAAI, pp. 61–66. – Anaheim, California, USA, juillet 1991.

- [Maybury95] Maybury (Mark T.). – Using similarity metrics to determine content for explanation generation. *Expert Systems With Applications, Special issue "Explanation: the way forward"*, vol. 8, n4, 1995, pp. 513–525.
- [Mcdermott82] McDermott (John). – R1: a rule-based configurer of computer systems. *Artificial Intelligence*, vol. 19, 1982, pp. 39–88.
- [Mckeown et al.92] McKeown (K. R.), Feiner (S. K.), Robin (J.), Seligmann (D. D.) et Tanenblatt (M.). – Generating cross-references for multimedia explanation. *Proceedings of 10th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Explanation and Tutoring*. AAAI, pp. 9–16. – San Jose, California, USA, juillet 1992.
- [Mckeown85] McKeown (Kathleen R.). – Discourse strategies for generating natural-language text. *Artificial Intelligence*, vol. 27, 1985, pp. 1–41.
- [Metzler et al.98] Metzler (Douglas P.) et Martincic (Cynthia J.). – Que: explanation through exploration. *Expert Systems With Applications*, vol. 15, 1998, pp. 253–263.
- [Millerat et al.96] Millerat (Pierre) et Ermine (JL.). – Application de la systématique à la conception d'un modèle de conduite en mode dégradé d'une centrale nucléaire. *séminaire Capitaliser les connaissances, Transférer les savoir faire*. Euroforum, Frantour. – Paris, France, 3-4 décembre 1996.
- [Mitchell et al.86] Mitchell (T. M.), Keller (R. M.) et Kedar-Cebelli (S. T.). – Explanation-based generalization: a unifying view. *Machine Learning*, vol. 1, n1, 1986, pp. 47–80.
- [Mittal et al.91] Mittal (Vibhu O.) et Paris (Cécile L.). – Generating natural language descriptions with examples: differences between introductory and advanced texts. *Proceedings of 11th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Intelligent User Interfaces*. AAAI, pp. 271–276. – Washington, DC, USA, juillet 1991.
- [Mittal et al.95a] Mittal (V. O.), Roth (S.), Moore (J. D.), Mattis (J.) et Carenini (G.). – Generating explanatory captions for information graphics. *Proceedings 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1276–1283. – Montréal (Canada), août 1995.
- [Mittal et al.95b] Mittal (Vibhu O.) et Paris (Cécile L.). – Generating explanations in context: the system perspective. *Expert Systems With Applications, Special issue "Explanation: the way forward"*, vol. 8, n 4, 1995, pp. 491–503.
- [Miyabe et al.93] Miyabe (Y.), Baba (T.), Dairiki (O.), Matsuo (Y.) et Mizuno (S.). – *A very fast rule-based inference engine for expert systems*. – Technical Report n 56, Japon, Nippon Steel, janvier 1993.
- [Moore et al.89] Moore (J.D.) et Swartout (W.R.). – A reactive approach to explanation. *Proceedingsth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1504–1510. – Detroit, USA, 1989.
- [Moore et al.90] Moore (Johanna D.) et Swartout (William R.). – Pointing: A way toward explanation dialogue. *Proceedings of 8th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Intelligent Interfaces*. AAAI, pp. 457–464. – Boston, USA, août 1990.
- [Moore95] Moore (Johanna D.). – *Participating in explanatory dialogues: inter-*

- preting and responding to questions in context.* – ACL The MIT press, 1995, *Series in Natural Language Processing*.
- [Musen93] Musen (Mark A.). – An overview of knowledge acquisition. *Second Generation Expert Systems*, éd. par David (J.M.), Krivine (J.P.) et Simmons (R.), pp. 405–427. – Springer-Verlag, 1993.
- [Neches et al.84] Neches (Robert), Swartout (William R.) et Moore (Johanna). – Enhanced maintenance and explanation of expert systems through explicit models of their development. *Proceedings of IEEE Workshop on Principles of Knowledge-based systems*, pp. 173–183. – Denver, Colorado, USA, décembre 1984.
- [Nedellec93] Nédellec (Claire). – Expliquer pour valider les systèmes d'apprentissage automatique. *Actes des 2^{ème} Journées Acquisition des connaissances (JAC-93)*. – Saint Raphaël, France, avril 1993.
- [Neumann94] Neumann (Günter). – Application of explanation-based learning for efficient processing of constraint-based grammars. *Proceedings of 10th IEEE on Artificial Intelligence for Applications*. – San Antonio, Texas, 1994.
- [Newell82] Newell (A.). – The knowledge level. *Artificial Intelligence*, vol. 18, 1982, pp. 87–127.
- [Newell93] Newell (A.). – Reflections on the knowledge level. *Artificial Intelligence*, vol. 59, 1993, pp. 31–38.
- [Nicaud et al.90] Nicaud (Jean-François) et Saïdi (Mustapha). – Explications en résolution d'exercices d'algèbres. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 4, n 3, 1990, pp. 125–148.
- [Nicaud87a] Nicaud (Jean-François). – APLUSIX: un système expert en factorisation pour un logiciel d'EIAO. *Actes du congrès francophone sur l'EAO*. L'agence de l'informatique, pp. 399–415. – Cap d'Agde, France, mars 1987.
- [Nicaud87b] Nicaud (J.F.). – *Aplusix: un système expert de résolution pédagogique d'exercices d'algèbres*. – Orsay, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université Paris Sud, 1987.
- [Nigro95] Nigro (Jean-Marc). – *La conception et la réalisation d'un générateur automatique de commentaires: le système GeneCom, application au jeu du tarot*. – Paris, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université Paris 6, 1995.
- [Paris88] Paris (C. L.). – Tailoring object descriptions to a user's level of expertise. *Computational linguistics*, vol. 14, 1988, pp. 64–78.
- [Paris92] Paris (Cecile L.). – Systèmes Experts Explicatifs. *EXPLICATION-92 2^{èmes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 3–22. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992. Conférence invitée.
- [PB94] Piquemal-Baluard (Christine). – *L'explication collective dans une société d'agents: conception d'un agent explicatif pour l'environnement SYNERGIC*. – Toulouse, France, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, juin 1994.
- [Piaget98] Piaget (Jean). – Les modèles abstraits sont-ils opposés aux interprétations psycho-physiologiques dans l'explication en psychologie? esquisse d'autobiographie intellectuelle. *Bulletin de psychologie*, vol. 51,

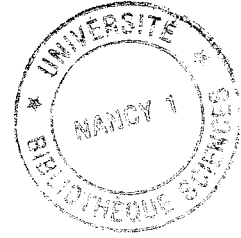
- n3, mai-juin 1998, pp. 217-221. – paru initialement en 1959 dans le numéro 169.
- [Prince91] Prince (V.). – Expertise naturelle, expertise artificielle, vers quels paradigmes cognitifs? *Intellectica*, vol. 12, 1991, pp. 7-31.
- [Raccah92] Raccah (Pierre-Yves). – Expression et structure des explications. *EXPLICATION-92 2^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 237-239. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992. Table ronde.
- [Reimer98] Reimer (Ulrich). – Aims and scope of the conference. *PAKM'98, Second International Conference on Practical Aspects of Knowledge Management*. – Basel, Switzerland, octobre 1998.
- [Remy97] Rémy (Claire). – Chez sollac, sachem pilote les hauts-fourneaux. *01-Informatique*, juin 1997.
- [Reynaud91] Reynaud (Chantal). – Là où les problèmes d'acquisition des connaissances et d'explications se rejoignent. *Knowledge Modeling and Expertise Transfer*, éd. par Hérin-Aime (D.), Dieng (R.), Regourd (J.P.) et Angoujard (J.P.). pp. 65-74. – Sophia-Antipolis, France, avril 1991.
- [Richard et al.90a] Richard (Jean-François), Bonnet (Claude) et Ghiglione (Rodolphe) (édité par). – *Traité de psychologie cognitive 2*. – Dunod, 1990, *Le traitement de l'information symbolique*.
- [Richard et al.90b] Richard (Jean-François), Bonnet (Claude) et Ghiglione (Rodolphe) (édité par). – *Traité de psychologie cognitive 3*. – Dunod, 1990.
- [Richard90] Richard (Jean-François). – *Les activités mentales : comprendre, raisonner, trouver des solutions*. – Armand Colin, 1990.
- [Robert89] Robert (Le). – *Dictionnaire historique de la langue française*. – Paris, Le Robert, 1989.
- [Rosenbloom et al.90] Rosenbloom (P. S.) et Aasman (J.). – Knowledge level and inductive uses of chunking (ebl). *Proceedings of 8th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Machine Learning*. AAAI, pp. 821-827. – Boston, USA, août 1990.
- [Rosis et al.95] Rosis (F. De), Grasso (F.), Berry (D. C.) et Gillie (T.). – Mediating between hearer's and speaker's views in the generation of adaptative explanations. *Expert Systems With Applications, Special issue "Explanation: the way forward"*, vol. 8, n4, 1995, pp. 429-443.
- [Rousset et al.87] Rousset (Marie-Christine) et Safar (Brigitte). – Negative and positive explanations in expert systems. *Applied Artificial Intelligence*, vol. 1, 1987, pp. 25-38.
- [Roux94] Roux (B. Le). – *Éléments d'une approche constructive de la modélisation et de la réutilisation en acquisition des connaissances*. – Paris, France, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 1994.
- [Rulquin94] Rulquin (Virginie). – *Personnalisation des réponses données à l'utilisateur dans un système de recherche d'information*. – Nancy, France, Rapport de DEA, Université Henri Poincaré- Nancy 1, septembre 1994.
- [Safar et al.92] Safar (Brigitte), Berthault (Pascale) et Sylvestre (Jean). – Place des explications dans la conception d'une interface intelligente entre une

- base de données et un usager. *EXPLICATION-92 2^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 221-231. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992. also In *Proceedings of 12th International Conference on Artificial Intelligence, Expert Systems and Natural Languages*, Avignon 1992.
- [Safar90] Safar (Brigitte). – Répondre à des questions de type Pourquoi-Pas? *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 4, n2, 1990, pp. 101-112.
- [Saidi92] Saïdi (Mustapha). – Planification et explication du raisonnement d'un résolveur complexe en algèbre : application aux factorisations de polynômes. *Actes des 1^{ères} Rencontres des jeunes chercheurs en IA*. AFIA, pp. 66-77. – Rennes, septembre 1992.
- [Sala96] Sala (Michel). – Explications générées par un environnement d'apprentissage dans le cadre d'une aide à la découverte scientifique. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 201-214. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.
- [Samurcay91] Samurcay (Renan). – *Modèle de référence du fonctionnement du haut-fourneau*. – convention NEB/sollac n° 924420, rapport intermédiaire n° 8, Sollac, juillet 1991.
- [Sarantinos et al.91] Sarantinos (Efstratios) et Johnson (Peter). – Explanation dialogues: question disambiguation and text generation. *Proceedings of 11th International Conference on Expert Systems and their Applications*, pp. 109-122. – Avignon, France, mai 1991.
- [Schank et al.94] Schank (Roger C.), Kass (Alex) et Riesbeck (Christopher K.). – *Inside Cased-based Explanation*. – Hillsdale, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, 1994. The Institute for the Learning Sciences Northwestern University.
- [Schank86] Schank (Roger C.). – *Explanation patterns: Understanding mechanically and creatively*. – Hillsdale, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, 1986.
- [Scott et al.77] Scott (A.), Clancey (W.), Davis (R.) et Shortliffe (E.). – Explanation capabilities of knowledge-based production systems. *American Journal of Computational Linguistics*, vol. Microfiche 62, 1977. – appears as Chapter 18 in [Buchanan et al.84].
- [Shortliffe et al.73] Shortliffe (E. H.), Axline (S. G.), Buchanan (B. G.), Merigan (T. C.) et Cohen (S. N.). – An artificial intelligence program to advice physicians regarding antimicrobial therapy. *Computers and Biomedical research*, vol. 6, 1973, pp. 544-560.
- [Simon96] Simon (Gaële). – Aides et explications dans un système de capitalisation de connaissances. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 151-165. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.
- [Simon97] Simon (Gaëlle). – *Modèles et méthodes pour la conception des mémoires d'entreprise - le système DOLMEN: une application en métallurgie*. – Nancy, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université Henri Poincaré- Nancy 1, 1997.

- [Simonnot96] Simonnot (Brigitte). – *Modélisation multi-agents d'un système de recherche d'information multimédia à forte composante vidéo*. – Nancy, France, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré- Nancy 1, janvier 1996.
- [Skaret97] Skaret (Mona). – Practise knowledge management - lessons from processes in small firms. *proc. International Symposium on Management of Industrial and Corporate Knowledge, ISMICK'97*. – Compiègne, France, 1997.
- [Sollac90] Sollac. – *Cahier des Charges du projet SACHEM, Consultation pour la réalisation d'un système d'aide à la conduite des hauts fourneaux*. – Rapport technique, Equipe de rédaction de Sollac, Sollac, 1990. Version 3 Définitive.
- [Sooriamurthi et al.95] Sooriamurthi (Raja) et Leake (David). – An architecture for goal-driven explanation. *Proceedings of 8th Annual Florida Artificial Intelligence Research Symposium*, pp. 218–222. – Melbourne, 1995.
- [Sowa84] Sowa (J.). – *Conceptual structures: information processing in mind and machine*. – Addison-Wesley Publishing Company, 1984.
- [Sprenger92] Sprenger (M.). – Explanation strategies for KADS-based expert systems. *New concept in natural language generation: planning, realization and systems*, éd. par Horacek (H.) et Zock (M.). – London, U.K., Pinter Publishers, 1992.
- [Stevens96] Stevens (C.). – Le savoir, moteur de la croissance. *L'observateur de l'OCDE*, no200, juin-juillet 1996.
- [Suthers et al.92] Suthers (D.), Woolf (B.) et Cornell (M.). – Steps from explanation planning to model construction dialogues. *Proceedings of 10th AAAI National Conference on Artificial Intelligence, session Explanation and Tutoring*. AAAI, pp. 24–30. – San Jose, California, USA, juillet 1992.
- [Suthers93] Suthers (Dan). – Preferences for Model Selection in Explanation. *Proceedings 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence, session Natural Language*, pp. 1208–1213. – Chambéry, France, August 28 – september 3 1993.
- [Swartout et al.93] Swartout (W.R.) et Moore (J.D.). – Explanation in second generation expert systems. *Second Generation Expert Systems*, éd. par David (J.M.), Krivine (J.P.) et Simmons (R.), pp. 543–585. – Springer-Verlag, 1993.
- [Swartout81] Swartout (W.R.). – Explaining and Justifying Expert Consulting Programs. *Proceedings 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 815–822. – Vancouver, Canada, août 1981.
- [Swartout83] Swartout (William R.). – XPLAIN: a System for Creating and Explaining Expert Consulting Programs. *Artificial Intelligence*, vol. 21, 1983, pp. 285–325.
- [Swartout92] Swartout (William). – Explanation. *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, éd. par Shapiro (Stuart C.), pp. 489–492. – Wiley-Interscience, 1992. 2nd edition.
- [Swinney95] Swinney (Laurie). – The explanation facility and the explanation

- effect. *Expert Systems With Applications, Special issue "Expert systems in accounting, auditing and finance"*, vol. 9, n4, 1995, pp. 557-567.
- [Tanner et al.93] Tanner (M.C.), Keuneke (A.M.) et Chandrasekaran (B.). – Explanation using task structure and domain functional models. *Second Generation Expert Systems*, éd. par David (J.M.), Krivine (J.P.) et Simmons (R.), pp. 586-613. – Springer-Verlag, 1993.
- [Thirion et al.95] Thirion (Claude) et Notte (Dina). – *Etudes et spécifications ergonomiques dans le cadre du projet SACHEM. Etape 2, rapport final.* – Rapport technique, Sollac, septembre 1995. convention CECA.
- [Thomas92] Thomas (Isabelle). – Couplage d'un système d'explications à un système expert. *EXPLICATION-92 2^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*, pp. 179-192. – Sophia-Antipolis, France, juin 1992.
- [Thomas93] Thomas (Isabelle). – *Expliquer dans le contexte de conception- Application en conception d'équipements électroniques.* – Paris, France, Thèse de Doctorat d'Université, Université Paris XIII, septembre 1993.
- [Thrun et al.93] Thrun (Sebastian B.) et Mitchell (Tom M.). – Integrating Inductive Neural Network Learning and Explanation-based Learning. *Proceedings 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 930-936. – Chambéry, France, August 28 – september 3 1993. Machine learning.
- [Tong et al.95] Tong (Xue Jun) et Ang (James). – Explaining control strategies in second generation expert systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 25, n11, novembre 1995, pp. 1483-1490.
- [Trichet et al.96a] Trichet (Francky) et Istenes (Zoltan). – Sélection dynamique de tâches et de méthodes : un modèle et des explications. *Actes des 3^{èmes} Rencontres des jeunes chercheurs en IA*, éd. par T. Schanb, L. Siklóssy (P. Lamarre). AFIA, p. 280. – Nantes, Aout 1996. Poster.
- [Trichet et al.96b] Trichet (Francky) et Tchounikine (Pierre). – Des explications pour le concepteur d'un système à base de connaissance. *EXPLICATION-96 3^{mes} Journées Explication du PRC-GDR IA*. INRIA Sophia Antipolis, pp. 215-245. – Sophia-Antipolis, France, juin 1996.
- [Trichet98] Trichet (Francky). – *DSTM : un environnement de modélisation et d'opérationnalisation de la démarche de résolution de problème d'un système à base de connaissances.* – Nantes, France, Thèse de doctorat, Université de Nantes, novembre 1998.
- [Visetti91] Visetti (Y. M.). – Des systèmes experts aux systèmes à base de connaissances : à la recherche d'un nouveau schéma régulateur. *Intellectica*, vol. 12, 1991, pp. 221-275.
- [Vivet84] Vivet (M.). – *Expertise mathématique et informatique : CAMELIA un logiciel pour raisonner et expliquer.* – Paris, France, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 1984.
- [Vivier96] Vivier (Jean). – Coopération entre psychologie et intelligence artificielle dans une expérimentation sur le dialogue homme-machine. *Intellectica*, vol. 1, n22, 1996, pp. 145-168.
- [Weiner80] Weiner (J.L.). – BLAH, A system which explains its reasoning. *Artificial Intelligence*, vol. 15, 1980, pp. 19-48.

- [Wick et al.89] Wick (Michael R.) et Thompson (William B.). – Reconstructive explanation: explanation as complex problem solving. *Proceedingsth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 135–140. – Detroit, USA, 1989.
- [Wick et al.92] Wick (Michael R.) et Thompson (William B.). – Reconstructive expert system explanation. *Artificial Intelligence*, vol. 54, 1992, pp. 33–70.
- [Wick et al.95] Wick (M. R.), Dutta (P.), Wineinger (T.) et Conner (J.). – Reconstructive explanations: A case study in integral calculus. *Expert Systems With Applications, Special issue "Explanation: the way forward"*, vol. 8, n4, 1995, pp. 463–473.
- [Wick92] Wick (Michael R.). – Expert system explanation in retrospect: a case study in the evolution of expert system explanation. *The Journal of Systems and Software*, vol. 19, n2, 1992, pp. 159–169.
- [Wick93] Wick (Michael R.). – Second generation expert system explanation. *Second Generation Expert Systems*, éd. par David (J.M.), Krivine (J.P.) et Simmons (R.), pp. 614–640. – Springer-Verlag, 1993.
- [Wickler et al.93] Wickler (Gerhard), Chappel (Helen) et Lambert (Simon). – An architecture for a generic explanation component. *Proceedings 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence Workshop on Explanation and Problem Solving*, pp. 53–64. – Chambéry (France), août 1993.
- [Winkels92] Winkels (R.). – *Explorations in intelligent tutoring and help*. – Amsterdam, (NL), IOS Press, 1992.
- [Wolf97] Wolf (Michael). – Invited conference. *proc. International Symposium on Management of Industrial and Corporate Knowledge ISMICK'97*. – Compiègne, France, 1997.
- [Xu et al.96] Xu (Hong) et Smets (Philippe). – Some strategies for explanations in evidential reasoning. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 26, n5, septembre 1996, pp. 599–607.
- [Ye95] Ye (Richard L.). – The value of explanation in expert systems for auditing: an experimental investigation. *Expert Systems With Applications, Special issue "Expert systems in accounting, auditing and finance"*, vol. 9, n4, 1995, pp. 543–556.
- [Zukerman et al.93] Zukerman (Ingrid) et McConachy (Richard). – Generating Concise Discourse that Addresses a User's Inferences. *Proceedings 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1202–1207. – Chambéry, France, août 1993. Natural Language.



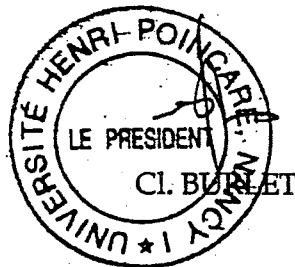
Monsieur **LEJEUNE Marc**

DOCTORAT de l'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY-I
en **INFORMATIQUE**

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER

Nancy, le **05/07/99**

Le Président de l'Université



Résumé

Le but de cette thèse est de proposer un guide de réalisation d'une fonction d'explication dans le contexte de la conduite de procédés complexes. Le contexte applicatif peut être un haut-fourneau, un four électrique, une centrale thermique ou un réseau d'irrigation. Dans cette thèse, nous avons dégagé les principales étapes de la réalisation du système explicatif. Nous avons faits des propositions génériques concernant le cadre possible du système explicatif, l'acquisition des connaissances explicatives, le développement du système explicatif s'appuyant sur les principales fonctions du Système à Bases de Connaissances d'aide à la conduite, l'architecture logicielle modulaire ou basée sur des agents autonomes et la participation du système explicatif au but de capitalisation des connaissances de l'entreprise. Nous avons également décrit un exemple concret réalisé dans le cadre du projet SACHEM de SOLLAC au sein du groupe USINOR.

Mots-clés: informatique, intelligence artificielle, système à bases de connaissances, système expert, système complexe, raisonnement, explication, ingénierie de la connaissance, capitalisation des connaissances, aide à la conduite de procédés, sidérurgie, haut-fourneau.

Abstract

The aim of this thesis is to propose an help manual for developping an explanation function in the context of monitoring systems. The application may be a blast furnace, an electric hoven, power station or a drainage network. In this document, we identified main steps for the development of a explanation system. We made generic practical propositions concerning the domain of the explanation system, the acquisition of explanation knowledge, the realisation of the explanation system structured on the main functions of the knowledge based monitoring system, the software architecture modular or based on autonomous agents and the participation of the explanation system for the knowledge management in the compagny. We described a real example realised in the SACHEM project made by SOLLAC in the USINOR group.

Keywords: computer science, artificial intelligence, knowledge-based system, expert system, complex system, reasoning, explanation, knowledge management, human-computer interaction, control system, monitoring system, steel industry, blast-furnace.