

Gestion INIS
Doc. enreg. le : 4.5.1997
N° TRN : FR9703946
Destination : I,I+D,D

97000456

THESE

de DOCTORAT

de

l'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

(arrêté du 30 mars 1992)

spécialité :

Chimie Appliquée et Génie des Procédés Industriels

par

Saïd BENKHANNOUCHE

Aide à la supervision des processus industriels : vers une méthodologie de conception

Soutenue le 31 mai 1996 devant le jury composé de :

MM.	Patrick MILLOT	Rapporteur et président
	Gilles MURATET	Directeur de thèse
	François LEBOURGEOIS	Rapporteur
	Patrick BOURSEAU	Examinateur
	Jacky MONTMAIN	Examinateur

Cette thèse a été :

- préparée au Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux et des Hautes Pressions (Paris XIII),
- réalisée au Commissariat à l'Energie Atomique,
- financée par le CEA et la Société Générale des Nouvelles Technologies (SGN).

Remerciements

Cette page pour remercier l'ensemble des personnes qui ont rendu cette thèse possible, qui m'ont accueilli dans leur service et laboratoire et m'ont témoigné leur soutien dans les moments difficiles.

Je tiens à remercier le Commissariat à l'Energie Atomique pour avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires au bon déroulement de cette thèse : monsieur MONCOUYOUX, chef du Service de Confinement des Déchets, qui m'a notamment permis d'intervenir sur le Prototype Evolutif de Vitrification, ainsi que monsieur LELIEVRE, qui m'a accueilli au sein du Service de Synthèse et Prospective ; la Société Générale des Nouvelles Technologies qui a participé à cette aventure, en les personnes de monsieur HAUSS puis de monsieur ROUDIL, dont le souci a été d'ancrer ce travail dans l'optique d'une mise en œuvre industrielle.

Je tiens également à remercier les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'évaluer cette thèse :

- Monsieur **Patrick MILLOT**, professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, pour avoir accepté d'être rapporteur et président du jury,
- Monsieur **François LEBOURGEOIS**, responsable du groupe d'experts technologiques à RHONE-POULENC, pour avoir accepté la charge de rapporteur,
- Monsieur **Gilles MURATET**, professeur à l'Université Paris 13, pour avoir accepté de diriger cette thèse,
- Monsieur **Patrick BOURSEAU**, maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie, qui a suivi ce travail et a eu le courage de lire une des premières versions de mon mémoire,
- Monsieur **Jacky MONTMAIN**, Ingénieur au Commissariat à l'Energie Atomique, pour l'aide qu'il m'a apportée en fin de parcours.

Je tiens à remercier messieurs **Daniel MATHIEU** et **Jean PENALVA**, chefs successifs du Laboratoire d'Informatique Appliquée, pour avoir accepté de m'accueillir dans leur laboratoire, ainsi que l'ensemble des membres de leur équipe :

- les permanents : Jacky, Laurent, Michel, Eric, Christian, Pierre, Mariette,
- les thésards : Dziop, Claude et Vador,
- les stagiaires : Luc, Christophe, Patricia et Cendrine, Simon (le scientif.),
- les externes : Pascal SEI (ACTIONEL), Sophie MINAULT (IXI), David GODINAUD (IXI).

J'ai eu la chance d'effectuer ma thèse avec Lydie LEYVAL ainsi que Jacky MONTMAIN, qui ont grandement contribué à faire en sorte que le LIA soit en pointe dans le domaine du diagnostic de pannes pour les procédés continus. Je tiens tout particulièrement à les remercier pour leurs conseils éclairés et leur disponibilité. Ils savent que cette thèse leur doit beaucoup.

J'ai eu le privilège de travailler avec Jean-François HOLLEBECQUE, Alain LEDOUX, ainsi que les équipes postées d'opérateurs du PEV ; qu'ils reçoivent mes plus vifs remerciements.

Que mes parents voient ici la concrétisation de leurs efforts et sacrifices.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
INTRODUCTION	1
Le contexte	1
Les limitations actuelles	1
Objectifs	2
Plan du mémoire	3
CHAPITRE I : Eléments de compréhension du facteur humain en supervision de processus	5
I.1 Introduction	6
I.2 L'entreprise	7
I.2.1 Ses activités	7
I.2.2 Les contraintes de l'activité de production	8
I.2.3 Le système automatisé de production	9
I.2.4 Les tâches de l'opérateur de production	10
I.3 Variabilité de l'opérateur	12
I.3.1 Exigences de la tâche	12
I.3.2 Etat de l'opérateur	13
I.3.3 Charge de travail	13
I.3.4 Performance	13
I.4 L'erreur humaine	17
I.4.1 La typologie de Reason	17
I.4.2 La typologie de Nicolet	22
I.4.3 La typologie de de Keyser	23
I.4.4 Caractéristiques de ces typologies	23
I.5 Une classification des erreurs	25
I.5.1 Les typologies de Nicolet et de de Keyser	25
I.5.2 Liens avec la typologie de Reason	28
I.6 Une vision synthétique de l'activité opérateur	30
I.6.1 Limites des modèles opérateur	30
I.6.2 Les tâches et la typologie d'erreurs	31
I.6.3 Relations dimension/erreur/tâche	33
I.7 Conclusion	34
Références bibliographiques	36
CHAPITRE II : Les aides à l'opérateur	39
II.1 Introduction	40
II.2 Relations entre Erreurs et aides informatisées	41
II.3 Erreurs d'exécution	43
II.3.1. Aide à la sélection	43
II.3.2. Aide à la réalisation	44

II.4. Erreurs d'évaluation	46
II.4.1. Aide à la représentation mentale	46
II.4.2. Aide au diagnostic	51
II.5. Erreurs d'intégration	80
II.5.1. Approche automaticienne du conseil	80
II.5.2. Une approche plus humaine du conseil	80
II.5.3. Un exemple	81
II.5.4. Application à la supervision de processus industriels	82
II.6. Erreurs de planification	84
II.6.1. Un exemple	84
II.6.2. Cas des processus industriels	84
II.7. Erreurs de coordination	85
II.7.1. Communication homme-homme	85
II.7.2. Résolution collective de problème	85
II.7.3. Répartition des tâches entre l'homme et la machine	86
II.7.4. A propos de la coopération homme-machine	86
II.8. Conclusion	88
Références bibliographiques	90
CHAPITRE III : Propositions méthodologiques	97
III.1. Introduction	98
III.2. Particularités d'un projet d'aide à l'opérateur	99
III.3. Le projet DIAGPEV et ses enseignements	102
III.3.1. Description du projet	102
III.3.2. Enseignements	104
III.4. Découpage du projet	106
III.5. Phase 1 : Spécification des objectifs	107
III.5.1. Recensement des motivations	107
III.5.2. Approche par les tâches	107
III.5.3. Approche par les attentes	109
III.5.4. Approche par les problèmes	109
III.5.5. Approche par les besoins	113
III.5.6. Approche par les fonctionnalités	114
III.5.7. Une classification	115
III.6. Phase 2 : Elaboration du cahier des charges fonctionnel	117
III.6.1. Définition du projet	117
III.6.2. Description fonctionnelle	118
III.7. Phase 3 : Expression des solutions proposées	122
III.7.1. Les solutions	122
III.7.2. Facteurs déterminants pour le concepteur	123
III.7.4. Facteurs déterminants pour les utilisateurs	124
III.8. Les phases suivantes	125
III.8.1. Phase 4 : Etude de faisabilité technique	125
III.8.2. Phase 5 : Développement	125
III.9. Conclusion	128
Références bibliographiques	132

CHAPITRE IV : Acquisition des connaissances pour l'aide à la supervision	135
IV.1 Introduction	136
IV.2 Categorisations des connaissances	137
IV.2.1. Connaissances sur l'homme	137
IV.2.2. Connaissances sur le processus de fabrication	140
IV.3 Une classification	142
IV.3.1. Connaissances publiques	142
IV.3.2. Connaissances partagées	146
IV.3.3. Connaissances privées	151
IV.4 La méthode SAGACE	155
IV.4.1. Les concepts fondamentaux de la modélisation systémique	155
IV.4.2. Les systémogrammes	156
IV.4.3. Les Graphes	160
IV.4.4. Les taxinomies	161
IV.5 Description d'une unité de production industrielle	163
IV.5.1. L'installation à modéliser	163
IV.5.2. Systémographie	164
IV.5.3. Réalisation de graphes	167
IV.6 SAGACE comme méthode de recueil	168
IV.6.1. Connaissances publiques	168
IV.6.2. Connaissances partagées	169
IV.6.3. Connaissances privées	169
IV.6.4. Conclusion	170
IV.7 SAGACE comme référentiel pour le diagnostic	171
IV.7.1. Les connaissances mises en œuvre dans DIAPASON	171
IV.7.2. Construction d'une structure de graphe causal	172
IV.7.3. Conclusion	178
IV.8 Conclusion	179
Références bibliographiques	180
CONCLUSION	183
Un cadre de description de l'opérateur	183
Les aides à l'opérateur	184
Une démarche de conception	184
L'acquisition des connaissances	185
Perspectives	186
ANNEXE I : Modèles de l'opérateur	187
A.I.1 Modèles de représentation	187
A.I.1.1 Modèle de De Keyser	187
A.I.1.2 La hiérarchie d'abstraction de Rasmussen	188
A.I.2 Modèles de raisonnement	194
A.I.2.1 Le modèle SRK de Rasmussen	194
A.I.2.2 Modèle de Rouse	196
ANNEXE II: Aspects fonctionnels, organiques et opérationnels concernant le PEV	199
II.1. Vision fonctionnelle	199
II.1.1 Le procédé	199

II.1.2 Les activités	200
II.1.3 Les modes de comportement	201
II.2. Vision organique	201
II.2.1 L'installation	201
II.2.2 Les dispositifs logistiques	205
II.2.3 Les configurations	206
II.3. Vision opérationnelle	208
II.3.1 L'équipe de conduite	208
II.3.2 Les performances	208
II.3.3 La gestion du fonctionnement	213
II.3.4 La conduite de l'évolution	215
ANNEXE III : Retrouver la causalité chez De Kleer/Brown et Iwasaki/Simon	217
III.1 Méthode d'Iwasaki / Simon	217
III.2 Méthode de De Kleer /Brown	220
III.2.1 Déduction d'une relation de confluence	221
III.2.2 Exemple de l'évaporateur	222
ANNEXE IV : Analyse de dépendances selon la méthode de Finch et Kramer	225
IV.1. La Décomposition structuro-fonctionnelle	225
IV.2. Analyse des dépendances entre systèmes et unités	226
IV.2.1. Exemple d'un réacteur chimique	226
IV.2.2. Décomposition du réacteur	227
IV.2.3. Règles de construction du modèle de dépendances	228
IV.2.4. Modèle obtenu	228
ANNEXE V : Liens entre graphe causal et réseau de dépendances de Finch et Kramer	231
ANNEXE VI : Généralisation de l'analyse des dépendances structuro-fonctionnelles	237
VI.1. Maîtriser la complexité par la hiérarchisation	237
VI.2. Etablissement des relations de dépendance	238
VI.2.1. Règles de décomposition	238
VI.2.2. Règles de parcours de l'arborescence	239
VI.2.3. Règles de description des relations	242
VI.2.4. Exemple	242
ANNEXE VII : Analyse de dépendances sur une installation industrielle	247
VII.1. Décomposition du PEV	247
VII.2. Relations de dépendances et graphe de causalité	251

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Rôle de l'opérateur au sein du SAP.	10
Figure I.2 : La fiabilité comme adéquation entre niveau requis et efforts engagés.	15
Figure I.3 : Schéma de principe du modèle GEMS.	18
Figure II.1 : Schéma interprété du modèle séquentiel de raisonnement de Rasmussen.	48
Figure II.2 : Les outils de description de Lind.	50
Figure II.3 : Une schématisation des deux paradigmes de diagnostic.	53
Figure II.4 : Stratégies de diagnostic, selon Milne.	55
Figure II.5 : Diagnostic par classification heuristique, selon Clancey.	57
Figure II.6 : Tâche générique de diagnostic par classification heuristique, selon Chandrasekaran.	58
Figure II.7 : Processus de diagnostic heuristique, selon Leitch et Gallanti.	59
Figure II.8 : Processus de diagnostic basé sur la cohérence, selon Leitch et Gallanti.	59
Figure II.9 : Première étape de diagnostic (détection).	62
Figure II.10 : Seconde étape de diagnostic (localisation).	62
Figure II.11 : Le système DIAPASON à travers la forme canonique de diagnostic.	63
Figure II.12 : Densité de probabilité d'appartenance aux deux modes de marche.	73
Figure II.13 : Méthodes employées par les modules de DIAPASON.	78
Figure II.14 : Descriptif général des traitements effectués par DIAPASON.	79
Figure II.15 : Stratégies de conduite dans l'exemple de l'automobiliste.	81
Figure II.16 : Interactions entre les aides du niveau cognitif.	89
Figure III.1 : Organisation des acteurs de l'entreprise.	100
Figure III.2 : Méthodologie d'analyse des dysfonctionnements des opérateurs.	112
Figure III.3 : Identification du projet par focalisation.	116
Figure III.4 : Cycle de développement en cascade.	125
Figure III.5 : Cycle de développement (inscrit dans le cycle de vie).	126
Figure III.6 : Cycle de développement en spirale.	126
Figure IV.1 : Savoir-faire et savoir, expérience et expertise.	139
Figure IV.2 : Les méthodes de recueil d'expertise et leurs zones de recouvrement.	154
Figure IV.3 : La matrice SAGACE et les neuf points de vue de description.	157
Figure IV.4 : Schéma de base de description selon la méthode SAGACE.	158
Figure IV.5 : Relations entre points de vue d'une propriété.	159
Figure IV.6 : Relations entre points de vue de même vision.	160
Figure IV.7 : Structure d'un graphe, exemple d'un graphe défaut-défaillance.	161
Figure IV.8 : Taxinomie d'appareils d'extraction.	162
Figure IV.9 : Schéma du prototype évolutif de vitrification.	163
Figure IV.10 : Les objectifs associés au PEV.	164
Figure IV.11 : Les fonctions à envisager pour conditionner les déchets haute activité.	165
Figure IV.12 : Alimentation en fritte de verre.	166

Figure IV.13 : Stratégie de fonctionnement normal.	166
Figure IV.14 : Graphe défaut-défaillance de l'éditeur SAGACE.	167
Figure IV.15 : Interprétations de la causalité.	172
Figure IV.16 : Obtention d'une structure de graphe causal à partir d'une AMDE via SAGACE.	174
Figure IV.17 : Exemple de règle METHYS associée au calcinateur.	175
Figure IV.18 : Le réseau de dépendances entre groupes fonctionnels d'appareils.	176
Figure IV.19 : Le graphe de causalité du réacteur.	176
Figure IV.20 : Graphe causal obtenu après réduction.	177
Figure A.I.1 : Le processus de raisonnement proposé par Rasmussen.	195
Figure A.III.1 : Chambre de réfrigération d'un système de production de froid.	218
Figure A.III.2 : Graphe causal obtenu par la méthode d'Iwasaki et Simon.	220
Figure A.III.3 : Graphe obtenu par la méthode de De Kleer/Brown	224
Figure A.IV.1 : Schéma PI&D du réacteur régulé.	226
Figure A.IV.2 : Graphe de dépendance entre systèmes.	228
Figure A.V.1 : Structure du graphe causal selon Finch et Kramer.	232
Figure A.V.2 : Résultat de l'élimination de PT, F, PP et PB.	233
Figure A.V.3 : Elimination de TR.	233
Figure A.V.4 : Elimination des variables de régulation.	234
Figure A.V.5 : Graphe causal final.	234
Figure A.V.6 : Réseau de dépendance pour le réacteur chimique.	235
Figure A.VI.1 : Exemple d'arbre fonctionnel.	238
Figure A.VI.2 : Première étape d'analyse.	240
Figure A.VI.3 : Seconde étape d'analyse.	241
Figure A.VI.4 : Troisième étape d'analyse.	241
Figure A.VI.5 : Etape 1. Relations de dépendances entre systèmes frères.	243
Figure A.VI.6 : Etape 2. Instanciation des relations établies en étape 1.	244
Figure A.VI.7 : Etape 3. Instanciation des relations établies en étape 2.	245
Figure A.VII.1 : Première étape d'analyse des dépendances sur le PEV.	253
Figure A.VII.2 : Seconde étape d'analyse des dépendances sur le PEV.	254
Figure A.VII.3 : Troisième étape d'analyse des dépendances sur le PEV.	255
Figure A.VII.4 : Quatrième étape d'analyse des dépendances sur le PEV.	256
Figure A.VII.5 : Structure causale résultante.	257

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Activités de l'entreprise.	8
Tableau I.2 : Erreurs au niveau SB.	19
Tableau I.3 : Erreurs au niveau RB.	20
Tableau I.4 : Erreurs au niveau KB.	21
Tableau I.5 : Dimensions de l'activité, niveaux de perception de l'intervention humaine et erreurs.	26
Tableau I.6 : Liens entre les trois typologies d'erreurs.	28
Tableau I.7 : Tâches et dimensions humaines sollicitées en conduite du PEV.	33
Tableau I.8 : Relations entre tâches, dimensions et erreurs.	33
Tableau I.9 : Récapitulatif des typologies de Nicolet, de Keyser et Reason.	35
Tableau II.1 : Erreurs humaines, améliorations envisageables et aides informatisées.	42
Tableau II.2 : Informations d'entrée et de sortie pour chacune des tâches primitives.	61
Tableau II.3 : Exemples de techniques de prédiction.	70
Tableau II.4 : Exemples de techniques d'interprétation.	71
Tableau II.5 : Exemples de techniques de décision.	74
Tableau II.6 : Exemples de techniques d'identification.	76
Tableau III.1 : Tableau de correspondances entre tâches et dimensions (tiré de l'étude du PEV).	108
Tableau III.2 : Résultats d'une analyse de besoins (DIAGPEV).	114
Tableau III.3 : Tableau récapitulatif des approches de spécification.	130
Tableau III.4 : Critères qualité des fonctionnalités d'aide à l'opérateur.	131
Tableau IV.1 : Dimension collective / connaissances publiques / méthodes.	143
Tableau IV.2 : Les niveaux d'abstraction de Rasmussen. (résumé).	144
Tableau IV.3 : Dimension cognitive / connaissances publiques / méthodes.	145
Tableau IV.4 : Dimension opératoire / connaissances publiques / méthodes.	146
Tableau IV.5 : Dimension collective / connaissances partagées.	146
Tableau IV.6 : Dimension cognitive / connaissances partagées / méthodes.	149
Tableau IV.7 : Dimension opératoire / connaissances partagées / méthodes.	151
Tableau IV.8 : Connaissances expertes / méthodes d'acquisition.	153
Tableau IV.9 : Champ de modélisation de la méthode SAGACE pour les processus industriels.	170
Tableau A.I.1 : Niveaux d'abstraction des connaissances.	192
Tableau A.I.2 : Niveaux d'abstraction des connaissances (suite).	193
Tableau A.III.1 : Tables d'addition et multiplication qualitatives.	221
Tableau A.IV.1 : Décomposition du réacteur chimique.	227
Tableau A.VII.1 : Les systèmes régulés du PEV.	248
Tableau A.VII.2 : Les systèmes passifs du PEV.	249
Tableau A.VII.3 : Les systèmes passifs du PEV (suite).	250
Tableau A.VII.4 : Les systèmes externes du PEV.	250
Tableau A.VII.5 : Classification des systèmes.	251

INTRODUCTION

LE CONTEXTE

Les avancées techniques pouvaient laisser supposer, pendant de nombreuses années, que l'opérateur verrait son rôle diminuer dans un système automatisé de production puisque progressivement remplacé par des automatismes. Une des raisons invoquées était la supériorité des machines sur l'homme en matière de reproductibilité des tâches et des capacités de calcul. Il s'avère à présent que l'opérateur de conduite ne peut être complètement écarté car certaines de ses fonctions ne sont, à l'heure actuelle, pas automatisables pour des raisons techniques ou économiques. L'amélioration des performances et la recherche d'une plus grande fiabilité et disponibilité du système automatisé requièrent donc la prise en compte d'aspects à la fois techniques et humains.

La situation actuelle est cependant déséquilibrée : d'un côté, les aspects techniques sont assez bien maîtrisés au sens où les appareils deviennent de plus en plus fiables. Par ailleurs, l'introduction de la redondance d'appareils¹ aux endroits critiques du processus offre une plus grande disponibilité de l'outil de production ; d'un autre côté, on ne sait pas vraiment quelles mesures adopter pour maîtriser la fiabilité humaine, car trop de facteurs touchant au fonctionnement humain sont mal maîtrisés.

Aujourd'hui, il y a convergence de points de vue pour confier aux machines les tâches réputées répétitives et automatisables, et laisser les tâches à caractère décisionnel à la charge des opérateurs. L'amélioration de la fiabilité et la disponibilité du processus de production conduit alors à envisager des aides à l'opérateur. Ces aides font largement appel à des techniques innovantes, qui sont pour la plupart issues de travaux en intelligence artificielle.

LES LIMITATIONS ACTUELLES

Les limites actuelles au développement du marché des aides à l'opérateur sont nombreuses, elles sont notamment liées aux motivations des industriels, à la diversité et à l'état d'avancement des techniques employés, et au manque de moyens permettant de garantir la qualité de ces aides.

¹ La redondance matérielle est fondée sur le principe selon lequel la probabilité que deux composants assurant la même fonction tombent simultanément en panne est quasi nulle. Elle est envisagée aux endroits sensibles d'une installation pour assurer, quoi qu'il arrive, la mission du système de production. Dans la pratique, cela revient à doubler une pompe, un capteur, une commande, etc. Dans le domaine du nucléaire, cela revient à doubler voire tripler l'ensemble d'une chaîne de production.

Les motivations qui conduisent les industriels à envisager de tels systèmes sont très diverses. Elles ont d'ailleurs été recensées au cours d'une enquête menée auprès d'industriels² : la complexité croissante des processus alliée à une responsabilité de plus en plus grande des opérateurs, les contraintes de sécurité et de fiabilité, la rentabilité, les choix politiques, les modes et les mentalités. En règle générale, les industriels ont jusqu'ici investi et continuent d'investir dans des systèmes d'aide à l'opérateur "pour voir". Il ressort que les objectifs sont souvent insuffisamment définis, ce qui conduit à des résultats très difficilement évaluables.

L'intérêt suscité par l'intelligence artificielle a donné lieu à une importante quantité d'outils logiciels utilisables dans le cadre de la supervision de processus, et conçus à l'origine pour une application particulière. Pour le concepteur du système d'aide, le problème se pose alors en terme de **choix des techniques** les mieux adaptées aux objectifs. Il apparaît alors nécessaire de disposer d'un ensemble d'outils conceptuels qui peuvent servir à guider le choix de ces techniques.

De nombreuses communautés scientifiques sont impliquées dans l'aide à l'opérateur, notamment l'ergonomie, la psychologie, l'automatique et l'informatique. Chacune d'entre elles développe ses propres concepts de l'aide à l'opérateur, d'où le **manque d'homogénéité** et la multiplicité des définitions : pour l'automaticien, un système est capable d'aider l'opérateur s'il peut **diagnostiquer un dysfonctionnement** et fournir des **conseils d'action** en termes de commandes à appliquer ; une approche plus ergonomique de l'automatique part du principe qu'un système aide l'opérateur s'il peut prendre à sa charge certaines des tâches humaines, et s'il est capable de fournir de l'information en fonction des besoins de l'opérateur ; l'approche psychologique part du principe qu'opérateur et système d'aide doivent partager des **buts communs** pour pouvoir coopérer. Il s'avère alors nécessaire d'avoir une vision globale, structurée et pluridisciplinaire de l'aide à l'opérateur.

Une des difficultés majeures en conception d'aides informatisées n'est pas liée à la maîtrise de techniques innovantes, qui ont pour la plupart montré leur faisabilité, elle est plutôt due au manque de moyens d'évaluation de l'impact d'un système informatique conçu essentiellement pour interagir avec l'**homme**. Ces systèmes constituent une véritable révolution car ils sont conçus pour s'adapter à l'homme, et non l'inverse comme cela a été jusqu'à présent le cas. La conception de tels systèmes implique la modification profonde des anciennes habitudes, c'est pourquoi le **besoin de méthodologies** apparaît comme un **enjeu crucial** pour l'introduction effective des systèmes d'aide en salle de conduite.

Il y a donc un travail conséquent à mener pour définir une approche méthodologique qui permette aux décideurs, exploitants et concepteurs d'adopter une **démarche qualité** devant déboucher sur la définition des services adaptés aux besoins ; c'est l'objet de la présente thèse.

OBJECTIFS

Notre objectif est essentiellement de proposer quelques clés devant permettre à l'ingénierie d'orienter ses choix en termes d'**objectifs du projet d'aide à l'opérateur**, de **fonctionnalités à implanter**, et de **techniques et outils à mettre en œuvre**. L'originalité de ce travail réside dans le soin qui est mis à apporter un regard raisonné sur les différentes solutions proposées, ainsi qu'un cadre commun à l'ensemble des approches de l'aide qui offre aux concepteurs et industriels une vue globale de l'offre

² D. Notte, Pour une conception pluridisciplinaire des systèmes coopératifs homme machine : mythes et réalités, Journées d'Etude S3 (Sûreté, Surveillance, Supervision), Supervision et coopération homme-machine, Ed. LAIL USTL, Paris, les 12-13 janvier 1995.

en matière de techniques d'aide à l'opérateur. Dans la mesure du possible, nous nous attacherons à définir les notions abordées.

Les objectifs que nous nous proposons d'atteindre sont donc :

- la mise en évidence des **caractéristiques humaines** qu'il convient d'intégrer avant de démarrer un projet d'aide,
- la définition d'une **vision structurée des aides** à l'opérateur, et par là même la définition d'une **vision opérationnelle** des fonctionnalités existantes, en particulier d'aide au diagnostic,
- la définition d'une **démarche méthodologique** devant permettre de spécifier convenablement les aides à concevoir,
- la proposition d'un cadre permettant le **choix des méthodes d'acquisition** des connaissances pour alimenter les outils à mettre en œuvre.

Les processus de transformation chimique sont notre champ d'application privilégié, mais l'approche que nous présentons est suffisamment générale pour s'appliquer à l'ensemble des processus automatisés qui exigent une surveillance de la part de l'homme.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet DIAGPEV de supervision d'une installation prototype de vitrification de déchets nucléaires ; les exemples et illustrations contenus dans ce mémoire en seront issus.

PLAN DU MÉMOIRE

Le chapitre premier est consacré à préciser le **rôle de l'opérateur** dans le système de production ainsi que ses **caractéristiques principales**, c'est-à-dire ses **points forts** certes, mais surtout ses **faiblesses**. Nous nous proposons ainsi de motiver une aide à l'opérateur par l'analyse des problèmes qui touchent à la **performance globale du système de production** ; cela se traduit en termes de sûreté de fonctionnement et de productivité. Ceci nous semble être une approche industriellement viable, car centrée opérateur.

Le second chapitre a deux objectifs principaux : faire un état des axes de recherche dans le domaine des aides à l'activité humaine, en particulier cognitive, et en proposer une vision opérationnelle. Ce chapitre sera l'occasion d'aborder les diverses conceptions de l'aide et comment les différencier. Les concepts et outils développés dans le cadre du projet d'aide au diagnostic de défauts **DIAPASON**, développé au CEA, sont intégrés dans cette synthèse.

Le troisième chapitre propose la description d'une **démarche méthodologique** qui met davantage l'accent sur les phases initiales à la conception : la phase de **spécification des objectifs** vise la mise en évidence des besoins ; la seconde phase vise l'élaboration du **cahier des charges fonctionnel**, qui permet de définir le **référentiel de besoins** ; la troisième phase est la **proposition de solutions techniques** répondant aux besoins et exigences des exploitants.

Les phases suivantes du projet sont l'étude de faisabilité technique des solutions proposées et le développement proprement dit du système. Dès le démarrage de ces phases peut être constitué le **référentiel de connaissances** qui serviront pour le projet. Cet aspect est plus particulièrement abordé dans le quatrième chapitre. Les méthodes d'acquisition des connaissances les plus employées sont classées en fonction des types d'aide recensés. Par ailleurs, la méthode **SAGACE** de modélisation des systèmes, basée sur une approche systémique et développée au CEA, est envisagée pour construire un **référentiel de connaissances** utilisable dans un projet d'aide à l'opérateur en général, et par les modules du système **DIAPASON** en particulier.

CHAPITRE I : Eléments de compréhension du facteur humain en supervision de processus

Les principaux facteurs d'influence de la performance de l'opérateur sont passés en revue. Une synthèse, sous forme de grille classant les dimensions de l'activité humaine, les tâches et les erreurs, est proposée.

I.1	Introduction	6
I.2	L'entreprise	7
I.3	Variabilité de l'opérateur	12
I.4	L'erreur humaine	17
I.5	Une classification des erreurs	25
I.6	Une vision synthétique de l'activité opérateur	30
I.7	Conclusion	34
Références bibliographiques		36

I.1 INTRODUCTION

La problématique dans laquelle nous nous plaçons est la conception de systèmes qui répondent à une double exigence : **fournir des solutions** dans le sens d'une meilleure disponibilité du système de production et **prendre en compte la composante humaine** de la fiabilité du système de production.

L'objet de ce chapitre est de préciser le champ dans lequel nous nous proposons d'intervenir : activité de l'entreprise qui nous intéresse, place de l'homme au sein de cette activité, caractéristiques et faiblesses humaines qui peuvent remettre en cause la performance du système de production et la sûreté de fonctionnement.

Pour mener à bien l'analyse des différents aspects qu'il convient de prendre en compte, une incursion dans des disciplines des sciences humaines telles que la psychologie du travail, l'ergonomie et la psychologie cognitive, est requise. La **psychologie du travail** se fixe pour objectif de comprendre le comportement humain au travail : il s'agit d'élucider les "relations stables que les comportements manifestent avec des propriétés de l'environnement dans lequel ils sont produits" [CAVER 91a]. L'**ergonomie**, quant à elle, relève plus de la démarche empirique et vise à améliorer les conditions de travail. Des disciplines dérivées des deux premières prennent pour objet d'étude l'activité humaine de supervision :

- la **psychologie cognitive** est une sous-discipline de la psychologie ; elle est centrée sur l'individu et cherche à élucider les représentations et les mécanismes de raisonnement humain en situation de travail qui produisent les comportements observés,
- l'**ergonomie cognitive** est une sous-discipline de l'ergonomie ; elle vise notamment l'étude empirique des interactions homme-ordinateur et les moyens d'aménager le poste de travail,
- la **psychologie cognitive ergonomique** est une discipline mixte des deux précédentes [HOC 91] : il s'agit de concevoir des **modèles de l'opérateur** soumis à des **situations complexes** (situations statiques, dynamiques et de conception). Elle peut donc être considérée comme le domaine applicatif de la psychologie cognitive, mais elle n'est pas réduite à l'étude de l'activité individuelle (il y a également prise en compte des aspects collectifs du travail) et aux seuls psychologues cognitifs : les spécialistes en automatique humaine¹ en sont aussi des acteurs, de même que les spécialistes en intelligence artificielle.

Cette incursion nous permettra de mettre en évidence les caractéristiques propres à l'activité de l'opérateur, plus particulièrement sur les **facteurs de variabilité** et les **erreurs humaines**. L'activité d'un opérateur est ici prise au sens des mécanismes observables (le comportement) et des mécanismes inobservables (les processus cognitifs) [HOC 91].

Notre apport sera ici la proposition d'un cadre descriptif faisant la synthèse des caractéristiques humaines déterminantes pour la fiabilité et la disponibilité d'un processus de fabrication. Ce cadre doit offrir au concepteur un **outil méthodologique** lui permettant d'orienter le projet d'aide à l'opérateur.

¹ Nous faisons référence aux travaux du Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines, à Valenciennes.

I.2 L'ENTREPRISE

"L'entreprise est le siège d'activités organisées visant à fournir au client et au marché des produits adaptés. Elle met en mouvement des flux d'énergie, de monnaie, de matière et de personnels qui s'écoulent dans les circuits du système économique. Elle est un centre de décision capable de se doter d'une stratégie économique autonome, et dont le principal objectif est de rendre maximal son profit sous les contraintes techniques [la sûreté de fonctionnement par exemple], financières, commerciales et sociales qui s'exercent sur elle" [DESPRE 91].

I.2.1 Ses activités

L'entreprise est une organisation complexe d'activités différencierées comportant chacune : une composante physique (le processus de transformation, par exemple), une composante d'organisation (la structure organisationnelle pour chacune des activités) et une composante de communication (les relations internes et externes à l'entreprise). Nous décrivons ces activités en prenant pour référence l'ouvrage de Després.

Trois grands types d'activités composent une entreprise de fabrication de biens : la production, la maintenance et la gestion.

L'activité de production est définie comme la transformation des matières premières et d'énergie en biens ; elle est considérée comme l'activité opérationnelle de l'entreprise, puisqu'elle est en charge de la réalisation effective du produit. Ce domaine d'activité est pris en charge par le personnel de production, le système de contrôle-commande et le processus de transformation.

L'activité de maintenance est chargée d'assurer la meilleure disponibilité de l'outil de production par des actions curatives et préventives. Sont impliqués le personnel de maintenance, le système informatique de maintenance, ainsi que les pièces de rechange et les divers outils associés. Elle est activée lorsque une intervention du type diagnostic et réparation des appareils est requise. Cette intervention se fait généralement quand le processus est à l'arrêt.

L'activité de gestion englobe la gestion financière et la gestion technique de l'entreprise : la gestion financière a pour rôle la détermination de la meilleure stratégie produit, la définition des moyens à mettre en œuvre au sein de l'entreprise pour essayer de répondre aux besoins tout en minimisant les coûts ; elle fait appel au personnel de gestion financière et au système informatique de l'entreprise. La gestion technique gère les matières premières, l'énergie et les biens produits ; elle implique l'intervention du personnel de gestion technique, le système informatisé de gestion technique et la manutention des matières premières et des biens produits. La gestion technique se situe à l'interface des activités opérationnelles de production et de maintenance, mais aussi de l'activité de gestion financière qui a un caractère plus fonctionnel. Elle a pour mission de traduire les spécifications de produit de la gestion financière en spécifications de qualité, de quantités et de délais de production ; elle gère tout ce qui se rapporte aux incidents, aux problèmes d'indisponibilité, etc. Elle est donc considérée comme un pilotage des activités opérationnelles.

Le tableau I.1 en propose une synthèse qui distingue les activités de l'entreprise et ses composantes physique, organisationnelle et de communication.

		NIVEAU OPÉRATIONNEL	NIVEAU PILOTAGE	NIVEAU FONCTIONNEL
ACTIVITÉS COMPOSANTES		PRODUCTION	MAINTENANCE	GESTION TECHNIQUE
PHYSIQUE		Le processus de fabrication	Pièces de rechange Outils	Manutention Matières premières et énergie
ORGANISATION		Equipes de conduite SNCC	Equipes de maintenance Système informatique de maintenance	Personnel Système informatique Processus de gestion des stocks (matières premières et produits)
COMMUNICATION/ COORDINATION		Coordination interne Validation des consignes de production Compte-rendus d'activité	Contrainte de maintenance Taux d'indisponibilité de l'outil de production	Planification de la production Contraintes de délais Gestion des incidents
TRAITEMENT DE L'INFORMATION		INFORMATIQUE INDUSTRIELLE		INFORMATIQUE DE GESTION

Tableau I.1 : Activités de l'entreprise.

I.2.2 Les contraintes de l'activité de production

Afin d'assurer sa crédibilité économique, l'entreprise se doit de garantir un fonctionnement sûr de son outil de production. La **sûreté de fonctionnement** est la science des défaillances et des pannes [VILLEM 88] ; elle englobe les notions de **fiabilité**, de **disponibilité** et son pendant la **productivité**, de **sécurité** et de **maintenabilité**, que nous passons maintenant en revue.

La **fiabilité** est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation et pendant un temps donné. La fiabilité est indistinctement associée aux appareils et aux hommes ; ainsi un système est dit fiable s'il est capable de récupération, donc capable de gérer ses dysfonctionnements avant que l'état dysfonctionnel ne devienne irréversible [NEBOIT 90a].

La **disponibilité** est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné,

La **sécurité** est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques,

La **maintenabilité** est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits.

Ces contraintes s'exercent directement sur le système automatisé de production, au niveau de toutes ses composantes : le processus de fabrication, les équipes de conduite et les

communications entre les diverses activités. La sûreté de fonctionnement est remise en cause sur apparition d'une défaillance au niveau de ces composantes.

La **défaillance** est définie comme la cessation de l'aptitude à assurer une **fonction requise**. Elle est aussi bien utilisée pour les systèmes techniques que pour décrire un dysfonctionnement humain.

I.2.3 Le système automatisé de production

Le Système Automatisé de Production (SAP) repose sur la mise en œuvre cohérente des moyens matériels et humains tels : le processus de fabrication, le système de contrôle-commande, les hommes chargés de la gestion technique, les hommes chargés de la production et les hommes chargés de la maintenance. Dans notre démarche de focalisation, il nous faut maintenant envisager la place de l'opérateur au sein de l'activité de production.

Le **processus de fabrication** est l'ensemble des **opérations d'élaboration** d'un produit selon un **procédé**², une méthode, ou une recette déterminée. Ces opérations sont prises en charge par l'**installation**, qui représente l'organisation d'appareils qui assurent des fonctions unitaires telles que le transport, le stockage ou la transformation, pour globalement réaliser l'objectif. Les processus auxquels il sera souvent fait référence dans ce mémoire sont les **processus chimiques** continus, à dynamique lente, en particulier dans le domaine du retraitement nucléaire.

Le **système de contrôle-commande** est conçu pour fournir l'ensemble des moyens permettant d'assurer le **contrôle-commande du processus** : mesures, alarmes, organes de commande, automatismes de sécurité, régulations, stockage des données, etc. Il sert souvent d'interface de conduite puisqu'il centralise les moyens de commande ; par abus de langage, cette interface est appelée **interface de supervision**, bien qu'elle ne permette pas de visualiser l'ensemble des aspects intéressant la **gestion globale du processus** par les opérateurs. En effet, une vue synoptique n'est sans doute pas la seule description qui soit pertinente pour l'opérateur ; cet aspect fera d'ailleurs l'objet d'un paragraphe dans le chapitre II.

Au sein du SAP, les hommes chargés de l'activité de production sont appelés **agents d'exploitation**. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux **opérateurs de conduite** ; cette désignation regroupe les **opérateurs, le chef de quart, et les rondiers**.

La **mission** de l'opérateur de conduite est de garantir la productivité, la disponibilité et la fiabilité du système de production en intervenant comme complément au système de contrôle-commande, sur une installation en constante évolution. L'opérateur de conduite a donc un rôle de **superviseur du processus de fabrication**.

Hormis les phases transitoires de démarrage et d'arrêt, son rôle est surtout de **prendre en charge l'imprévu**, par sa capacité à mettre en œuvre une activité mentale adaptée à la résolution de problème avec des **informations imprécises et incertaines**. L'opérateur de conduite est en effet capable de juger et décider dans un contexte incertain, d'anticiper un dérèglement par des indices avant la détection par les systèmes d'alarme, d'évaluer de manière qualitative des données, de synthétiser, d'interpréter, en fonction des cas les plus probables, sans devoir examiner l'ensemble des possibles.

² Par abus de langage, il est parfois synonyme de processus (exemple : la conduite de procédé).

De façon pratique, l'opérateur est chargé :

- d'exécuter des procédures,
- d'ajuster les paramètres de fonctionnement (correction des défauts et dérives, optimisation du fonctionnement du processus),
- d'adapter le fonctionnement du processus en fonction de contraintes de production (modification de certaines consignes pour satisfaire aux obligations de production, passage sur circuit auxiliaire si une panne est apparue sur le circuit principal),
- d'anticiper les actions à envisager, en fonction des délais de production (il planifie ses interventions sur le processus),
- de participer à un objectif commun (coordination de ses interventions avec celles des autres membres de l'équipe).

L'opérateur exerce son activité principalement à partir de postes informatiques situés en salle de conduite centralisée. En local, le rondier vérifie l'état de marche des divers actionneurs (vannes, pompes, etc.) c'est-à-dire directement sur l'installation (figure I.1). Ce second type d'intervention est généralement épisodique.

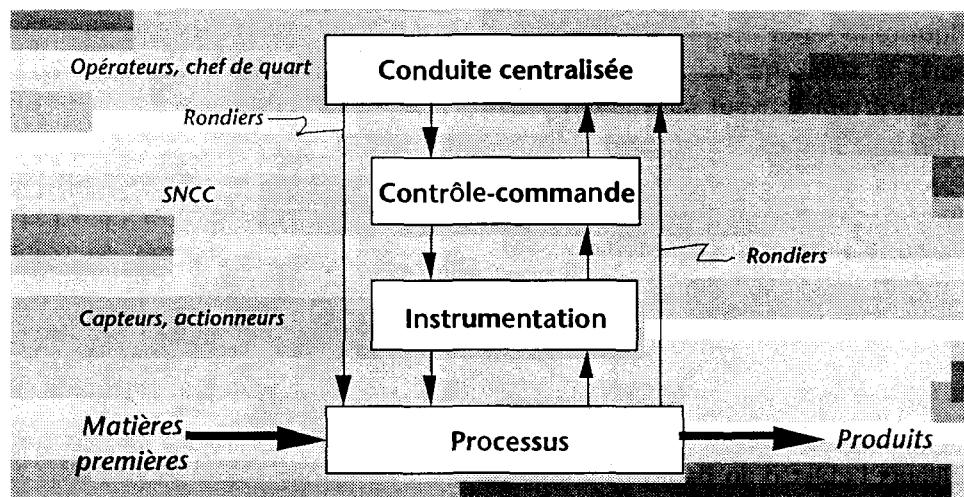


Figure I.1 : Rôle de l'opérateur au sein du SAP.

I.2.4 Les tâches de l'opérateur de production

Les contraintes imposées au système automatisé de production sont également les missions attribuées à l'opérateur : assurer la productivité, la disponibilité et la fiabilité du processus. L'opérateur assure ses missions en effectuant, pour ce faire, un certain nombre de tâches.

Nous utiliserons indifféremment les termes opérateur, opérateur de conduite et opérateur de production.

La tâche est l'objectif assigné à l'opérateur, c'est-à-dire ce qu'il doit réaliser. Elle est définie comme un ensemble d'actions conditionnées qui supposent l'existence d'interactions particulières entre un opérateur et les équipements, les autres opérateurs ou l'environnement [PHILLI 88]. Même si la durée moyenne d'une tâche peut varier, une tâche est toujours caractérisée par un début et une fin, de sorte que l'on peut définir une unité d'actions isolable de l'ensemble des actions possibles sous la forme du triplet : objectif, séquences d'actions et résultat.

Quatre grands types de tâches concernent spécifiquement la supervision de processus, selon Rouse ([ROUSE 83] repris par [MILLO 88]) : les **tâches de transition**, les **tâches de suivi**, les **tâches diagnostic**, et enfin les **tâches de compensation** :

- les **tâches de transition** sont sollicitées lors des phases transitoires de démarrage, de changement de régime, ou d'arrêt, pour lesquelles les opérateurs disposent de procédures à appliquer,
- les **tâches de suivi** sont généralement des tâches de routine que l'opérateur doit effectuer de manière périodique et en fonctionnement nominal, pour vérifier que les différents paramètres de fonctionnement se maintiennent aux valeurs de consigne ; dans le cas contraire, l'opérateur peut agir sur le processus pour en régler certains (correction, suivi des effets de correction, édition de comptes-rendus),
- les **tâches de diagnostic** sont sollicitées dès qu'un problème est détecté ; elles supposent, de la part de l'opérateur, une activité constante de **surveillance**,
- les **tâches de compensation** correspondent aux actions menées par les opérateurs une fois le diagnostic de la situation effectué (en fonction des consignes de sécurité, l'opérateur doit par exemple activer les appareils de secours ou mettre le processus en mode de repli).

En règle générale, les tâches sont définies en termes d'**objectifs**, à charge pour l'opérateur de les traduire sous une forme **opérationnelle**. Celui-ci doit, en effet, tenir compte des conditions réelles de conduite qui l'obligent à adapter les moyens d'obtention en fonction des aléas et des contraintes de la situation. L'expérience montre, en effet, que toutes les situations ne peuvent être répertoriées à la conception. Par exemple, quand l'ingénieur d'exploitation demande à l'opérateur d'amener le processus en mode de repli, c'est à l'opérateur de se définir la manière dont il devra réaliser cette tâche, et sous quelles conditions, car toutes les situations n'ont pas été prévues.

Dans l'éventualité d'une incohérence ou d'une incompatibilité des procédures avec le contexte de travail, l'opérateur doit changer de procédure ou bien l'adapter au contexte, voire en élaborer une nouvelle, lorsqu'il s'agit d'un problème qui lui est peu familier.

Ainsi, la réalisation d'une tâche connaît trois temps [POYET 90] : **prescription de la tâche à réaliser**, **redéfinition** par l'opérateur en fonction de ses propres référentiels, puis **actualisation** :

- la tâche prescrite correspond à la tâche telle que la définit le prescripteur : mission, performances à atteindre, délais à respecter, mais aussi consignes et procédures à appliquer,
- la tâche redéfinie est une traduction des prescriptions sous forme d'une représentation fonctionnelle correspondant aux représentations (modèle du processus) et stratégies (moyens de mise en œuvre) propres à l'opérateur,
- la tâche actualisée traduit le fait que l'opérateur doit prendre en compte le contexte dans lequel la tâche doit être effectuée (état actuel de l'installation, avancement de la production, incidents, contraintes temporelles, etc.). Cela demande de sa part la sélection d'une stratégie en accord avec la situation.

Ayant décrit le cadre dans lequel le projet d'aide devra se positionner, il nous faut passer en revue les caractéristiques humaines qui orienteront le projet d'amélioration des performances des opérateurs.

I.3 VARIABILITÉ DE L'OPÉRATEUR

De graves incidents récents (parmi les plus tristement célèbres : Three Mile Island, 1979 et Tchernobyl, 1986) ont amené à considérer l'homme comme un facteur de fiabilité du système de production ; en effet, les études post-accidentelles ont montré que l'opérateur joue effectivement un rôle déterminant dans leur occurrence [KOUTS 91].

L'objet de notre propos est de définir de quelle façon l'opérateur présente des singularités de comportement en comparaison avec un automate, et en quoi ces singularités peuvent gravement remettre en cause la fiabilité du système. Il nous semble que la variabilité est ce qui caractérise le mieux l'opérateur. En effet, un automate est conçu pour produire les mêmes résultats quelles que soient les conditions externes ; sa performance est constante et prévisible (jusqu'à l'apparition d'une défaillance) alors que celle de l'opérateur est difficilement prévisible car elle est sensible à de nombreux facteurs.

La variabilité est une caractéristique proprement humaine : elle traduit l'idée selon laquelle les performances d'un opérateur sont fortement conditionnées par des facteurs qui perturbent son activité dans l'accomplissement d'une tâche. Swain a notamment proposé un découpage en facteurs internes et externes pour distinguer ce qui relève de l'environnement et ce qui relève des caractéristiques propres à l'opérateur (repris dans [VILLEM 88]). Pour mieux comprendre la manière dont ces facteurs interviennent dans la performance, Millot a proposé une schématisation sous forme d'un modèle diagramme-bloc au niveau duquel [MILLO 88] :

- les entrées du modèle sont les **exigences de la tâche**, c'est-à-dire ce qui est demandé à l'opérateur, et les **contraintes environnementales** que l'opérateur peut percevoir comme des perturbations ou des **nuisances** (ils correspondent aux facteurs externes pour Swain),
- une variable interne non observable qui représente la **charge de travail**, et qui dépend de l'**état de l'opérateur** (ce sont les facteurs internes de Swain),
- une variable de sortie unique, en l'occurrence la **performance**, qui est une fonction de l'ensemble des entrées et de l'état de l'opérateur.

Nous aborderons successivement ces thèmes et essaierons d'en tirer les enseignements qui nous permettront ensuite de définir une aide à l'opérateur.

I.3.1 Exigences de la tâche

Les **exigences de la tâche** caractérisent la **quantité d'effort minimale** que l'opérateur devra investir pour réaliser correctement une tâche. Ces exigences peuvent être considérées comme des **facteurs externes** à l'opérateur. Ce sont principalement : le **contexte dans lequel est effectuée la tâche** (tâche en fonctionnement normal, incidentel ou accidentel), les **conditions techniques de travail** (nuisances générées par un environnement bruyant, la luminosité, les contrastes, etc.), les **conditions organisationnelles du travail** (aspects sociologiques), la **complexité du processus** (taille de l'installation, dynamique des phénomènes, etc.).

Pour traduire la **complexité du processus** que l'opérateur doit superviser, Hoc introduit la notion de **situation de transformation d'environnement dynamique**, qui nécessite de la part de l'opérateur de mettre régulièrement à jour sa représentation de l'état ou de l'évolution du processus [HOC 91]. L'auteur distingue quatre facteurs d'influence : l'**étendue du champ de contrôle** (possibilités matérielles et informationnelles permettant de se représenter l'état ou l'évolution du processus), la **proximité du contrôle** et les **délais de réponse** (l'anticipation et

la planification jouent un rôle important quand le contrôle est distant et les délais de réponse longs), l'accessibilité des informations sur le processus (certaines informations sont d'accès plus ou moins direct et nécessitent donc des inférences plus ou moins importantes), et enfin le type de processus surveillé (les processus discontinus favorisent une représentation sous forme d'états et de transformations discrètes, par opposition aux processus continus, qui imposent une représentation sous forme d'évolutions).

I.3.2 Etat de l'opérateur

L'état de l'opérateur caractérise son aptitude, ou sa capacité fonctionnelle, à prendre en charge une tâche donnée dans un contexte et des conditions donnés ; il englobe les aspects cognitif (niveau d'expérience), physiologique (rythmicité biologique ou circadienne de l'opérateur [GADBO 90]) et psychologique (motivation). Ces états sont regroupés sous le terme de facteurs internes qui déterminent l'effort que l'opérateur est capable et souhaite investir. Pour qualifier cet effort, on introduit la notion de capacité de travail [MILLO 88], qui indique que l'opérateur peut être amené à ajuster son degré de mobilisation lorsque la tâche le nécessite [QUEIN 87]. Ainsi, l'opérateur peut faire varier sa capacité de travail en fonction de son expérience, son adresse, sa personnalité, ses motivations et ses aptitudes physiques et mentales. Le résultat est une quantité d'effort mise en jeu pour effectuer une tâche.

I.3.3 Charge de travail

La charge de travail traduit l'idée selon laquelle il existe une relation complexe entre l'état de l'opérateur, les exigences de la tâche et les nuisances environnementales qui déterminent, pour une part, les efforts que l'opérateur peut engager. Cette "quantité d'effort" est à deux composantes, physique et surtout mentale ; cette dernière rend particulièrement délicate la mesure de la charge de travail, car on ne dispose pas de moyen direct de mesure. Elle est pourtant centrale pour les ergonomes : ces derniers ont, par ce biais, les moyens d'évaluer l'adéquation entre les exigences du travail et les capacités de l'opérateur, de manière à proposer les aménagements qu'il convient [MILLO 88]. Incidemment, cette charge de travail influe sur la performance de l'opérateur.

I.3.4 Performance

La performance de l'opérateur qualifie l'adéquation entre les exigences de la tâche et l'activité de l'opérateur qui a conduit à sa réalisation. Elle peut être estimée à travers les temps de réponse (temps mis pour réaliser la tâche à partir de l'instant où elle a été demandée) ou bien à travers l'étude statistique des erreurs commises par l'opérateur (écart entre la tâche prescrite et sa réalisation effective).

Les facteurs d'influence de la performance ont notamment été étudiés par Rouse, qui a mis en évidence l'importance des facteurs tels que la complexité du problème, le niveau d'expérience, le contexte dans lequel la tâche demandée est effectuée (situation urgente et non urgente), dans la performance humaine [ROUSE 78]. Les relations entre ces facteurs sont complexes, et non encore élucidées. Une schématisation, nécessairement simpliste, peut toutefois permettre de comprendre la relation entre variabilité et performance.

I.3.4.1 Les expériences de Rouse

Les expériences menées par Rouse consistaient à demander à plusieurs groupes de sujets d'effectuer des tâches de diagnostic de défauts, en utilisant comme support de représentation un

graphe orienté dans lequel les nœuds représentaient les variables du système, et les arcs les influences entre celles-ci. La performance d'un sujet était le nombre d'arcs testés pour parvenir à découvrir l'origine du défaut. Les sujets disposaient de la structure du graphe, affichée en permanence sur un écran d'ordinateur, et des valeurs des variables externes : la valeur 0 étant affectée à une variable externe anormale, et la valeur 1 dans l'autre cas. Ils étaient, par ailleurs, soumis à des situations de pannes uniques. L'expérience était conçue de sorte que les sujets étaient contraints d'interroger l'ordinateur afin de connaître l'état d'une variable. Deux séries d'expériences ont été menées.

Dans une première série de tests, une aide était proposée à certains sujets : ils pouvaient faire disparaître de l'écran les nœuds non incriminés du graphe ; cela revenait à réduire la complexité du problème. Dans une deuxième étape, les sujets ayant bénéficié d'une aide se sont retrouvés à travailler sans cette aide, au profit des autres sujets ayant initialement travaillé sans. Cela a permis de mettre en évidence des facteurs tels que : la complexité du problème (ici la taille du graphe), les effets d'une aide à la résolution, et enfin les effets de la disparition de l'aide pour des sujets s'y étant accoutumés pendant les tests.

Une deuxième série de tests a été menée ; elle proposait cette fois, avec le même problème à résoudre, d'évaluer les effets de la contrainte temporelle sur la performance de nouveaux groupes de sujets (de manière à ne pas fausser les résultats en utilisant des sujets déjà accoutumés). Ce test était ciblé sur des facteurs d'urgence, assez étroitement liés à la notion de motivation de la part des sujets (degré d'attention).

Les sujets étaient ainsi placés dans des conditions moyennement voire fortement contraintes, en jouant sur le temps alloué pour chacune des situations proposées. Certains sujets bénéficiaient d'une aide, d'autres pas. La performance des sujets devenait ici le pourcentage de réponses correctes. Cette série d'expériences a permis de mettre en évidence les relations existant entre la **performance et l'urgence de la situation** : sans contrainte de délai de réponse, les sujets adoptaient la stratégie consistant à réduire le domaine d'observation par des éliminations successives. Par ailleurs, la contrainte de délai de réponse a favorisé la recherche à partir d'un nœud ayant été déclaré en défaut, en recherchant la source du défaut sur les nœuds amont. Elles ont également mis en évidence l'effet d'accoutumance des sujets face aux situations proposées (le taux d'échecs diminuant sensiblement au cours des diverses séries de test).

Ces expériences ont permis de mettre en évidence quelques facteurs de performance, mais les conditions dans lesquelles elles se sont déroulées ne sont pas celles auxquelles l'opérateur est soumis : les expériences ont été effectuées en laboratoire sur cas d'école. En **situation réelle de travail**, il faut tenir compte de facteurs difficilement quantifiables du type : état physiologique, degré de motivation, niveau de compétence, qui induisent une certaine variabilité des performances humaines.

I.3.4.2 Essai de schématisation

La performance dépend certes de facteurs internes et externes multiples, des exigences de la tâche, de la charge de travail ainsi que des nuisances. La figure I.2 propose une schématisation sous la forme de facteurs affectés de poids supposés variables dans le temps et disposés sur une balance : d'un côté, sont rassemblés les **efforts engagés par l'opérateur**, et de l'autre les **exigences de la tâche**.

Deux cas de figure peuvent se présenter : l'opérateur s'investit au moins à hauteur du niveau requis par la tâche (cela se traduit par un rapport efforts / exigences supérieur à 1), l'opérateur investit

moins d'efforts que la tâche n'en requiert (le rapport exigences / efforts est supérieur à 1). Ce deuxième cas traduit un niveau insuffisant de vigilance (rythmes physiologiques) ou une défaillance de l'opérateur due à une surcharge cognitive ou à l'inadéquation de la tâche avec l'état de l'opérateur. Pour l'opérateur, la difficulté est de trouver le bon équilibre entre exigences et efforts à engager : s'il effectue une tâche en s'engageant davantage que la tâche ne le requiert, cela peut entraîner une fatigue prématuée, d'où le risque de réduction de la capacité de l'opérateur. D'un autre côté, si les efforts engagés par l'opérateur sont insuffisants vis-à-vis de la tâche, cela n'entraîne pas nécessairement une sanction en termes de performances de production.

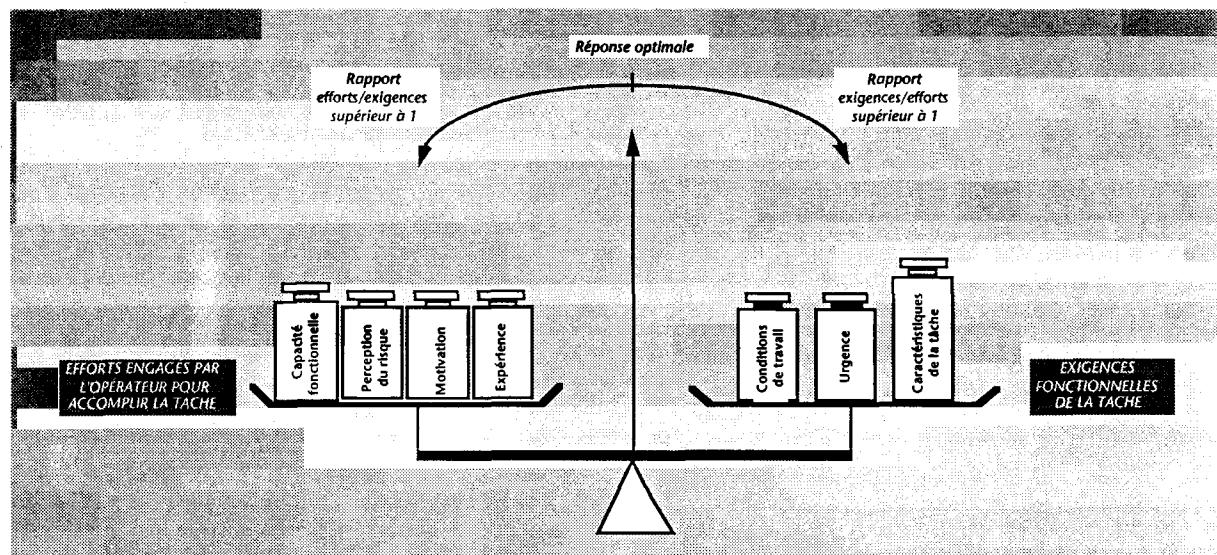


Figure I.2 : La fiabilité comme adéquation entre niveau requis et efforts engagés.

Ainsi, la performance ne fait pas seulement intervenir des facteurs internes à l'opérateur, elle fait également intervenir les facteurs externes liés à la tâche à réaliser et aux conditions environnementales ; c'est pourquoi la notion de couple opérateur-tâche a été introduite [HOC 87] [NEBOIT 90a].

Les ergonomes assimilent cette notion de couple opérateur - tâche à celle de *distance* entre la tâche prescrite et sa traduction en actions opérationnelles. Norman a ainsi été amené à introduire les notions de **distance d'évaluation** et de **distance d'exécution** [NORMA 84]. Selon lui, la distance d'évaluation est l'effort que l'opérateur doit fournir pour mettre en correspondance la perception de la tâche (la tâche telle qu'elle est formulée), et une représentation mentale de cette même tâche (compréhension) ; la distance d'exécution est l'effort engagé pour faire correspondre la représentation mentale de la tâche (définition d'objectifs) et l'image externe de cette tâche (traduction en actions opérationnelles).

Cette notion de distance entre tâche prescrite et activité réelle peut être source de biais à chaque étape cognitive : réception -> interprétation -> traduction -> mise sous forme opérationnelle. La notion de distance traduit également le besoin de définir une grandeur permettant de quantifier la facilité avec laquelle une tâche est interprétée et traduite en actions opérationnelles. Il s'agit, du point de vue de l'ergonome, de définir les **conditions de plus grande performance** d'un opérateur face à une tâche à réaliser et, du point de vue du fiabiliste, de définir les **conditions d'apparition d'erreurs** ou de défaillances dans l'exécution d'une tâche en vue de les éviter.

Nous avons choisi d'aborder la performance opérateur sous le second angle de vue, celui du fiabiliste ; l'opérateur est considéré comme une composante susceptible de défaillances. Par extension à la fiabilité technique, la fiabilité humaine est définie comme "l'aptitude d'un opérateur humain à accomplir une mission requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée" [VILLEM 88]. L'opérateur est donc considéré comme un système susceptible de défaillances, mais à la différence des systèmes techniques, il est capable de récupérer ses défaillances ; on parlera d'erreur plutôt que de défaillance.

I.4 L'ERREUR HUMAINE

L'**erreur** est plus particulièrement l'objet d'étude de la **fiabilité humaine**, préoccupation qui remonte aux années soixante et qui visait à déterminer les risques liés aux erreurs humaines dans des activités telles que la supervision des installations industrielles. La fiabilité humaine est à présent devenue la science des défaillances humaines [VILLEM 88], dont l'objet est de **prédir** et de **prévenir** l'erreur humaine dans le but d'optimiser la fiabilité globale et la productivité.

Aborder l'étude de l'**erreur humaine** s'avère délicat, car l'**analyse** de l'**erreur** peut conduire à des interprétations divergentes selon que l'on considère les écarts par rapport à la tâche telle que la définit le prescripteur, par rapport à la tâche telle que la redéfinit l'**opérateur**, ou encore par rapport à l'**activité réelle** de l'**opérateur** [CELLIER 90]. En effet, l'**écart à la prescription** n'est pas nécessairement à interpréter en terme d'**erreur**, à forte connotation négative ; elle peut être également bénéfique pour le processus, par la capacité de l'**opérateur** à produire des comportements qui favorisent une "récupération innovante mais efficace" [POYET 90]. Par ailleurs, l'**erreur humaine** ne peut être réduite à une activité individuelle isolée, elle est la combinaison de facteurs à la fois **internes** et **externes** (conditions techniques et sociologiques, contexte).

La **fiabilité humaine**, en tant que discipline de l'**ergonomie**, s'intéresse aux **conditions d'apparition** de l'**erreur** et aux moyens de les prévenir ; la **psychologie cognitive** s'intéresse plus particulièrement aux **mécanismes cognitifs** de l'**erreur**. La première discipline s'intéresse davantage à des **indices**, des **traces** de l'**erreur** ainsi qu'aux moyens d'y remédier, tandis que la seconde vise à en **comprendre et expliquer la genèse**.

Une des premières tentatives de **classification des erreurs humaines** date du début des années 80 [RASMU 81]. Depuis, plusieurs typologies ont été proposées, nous en passerons trois en revue : celle de **Reason** en psychologie cognitive, celle de **Nicolet** en ergonomie et celle de **de Keyser** en psychologie du travail. Nous pensons qu'elles sont suffisamment représentatives, chacune dans un domaine particulier, pour être l'objet d'une étude comparative.

I.4.1 La typologie de Reason

Reason a introduit un système générique de modélisation de l'**erreur** (GEMS pour Generic Error-Modelling System), qui s'inspire du modèle de raisonnement de Rasmussen (se référer à l'annexe I qui détaille ce modèle) ; ce dernier distingue fondamentalement trois types de comportements cognitifs [REASON 93] : le comportement basé sur les automatismes (SB), le comportement basé sur les règles (RB) et le comportement basé sur les connaissances déclaratives (KB).

Ce modèle est général, c'est-à-dire que Reason s'intéresse à l'**explication psychologique de l'apparition de l'**erreur****. Ce modèle est donc applicable à l'ensemble des activités humaines, y compris la supervision des processus industriels.

L'**hypothèse fondamentale** dans le modèle GEMS est que le comportement SB est celui qui est prioritairement sollicité dans une tâche, puis le comportement RB dès la détection d'un problème dans l'**exécution**, puis le comportement KB si le problème n'est toujours pas résolu (figure I.3). Cette typologie de comportements sert de base à la typologie d'**erreurs** de Reason : les erreurs associées au comportement SB sont dues à des actions non conscientes (les lapsus et les ratés), tandis que les erreurs associées aux comportements RB et KB sont dues à des actions délibérées (les fautes). Par analogie avec la **fiabilité technique**, Reason parle de **modes** de

défaillance qui donne les indices observables par lesquels une erreur est décelée. Chacun de ces modes de défaillance a une ou plusieurs causes à caractère psychologique.

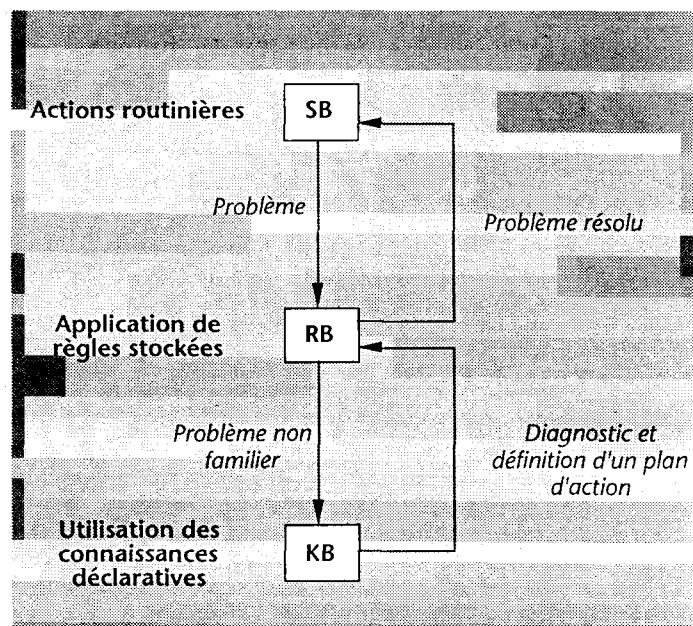


Figure 1.3 : Schéma de principe du modèle GEMS.

Les modes de défaillance recensées par Reason du type SB sont l'**inattention** et l'**attention excessive**. Pour l'inattention, les causes sont :

- une **perturbation** ou une **interruption** dans le séquencement d'actions en cours qui favorise les **oublis**,
- une "**intentionnalité réduite**", c'est-à-dire qu'un délai entre la formation d'une intention et son exécution effective peut conduire à oublier l'objectif de la séquence d'action en cours,
- une "**confusion perceptive**", qui traduit l'idée que des caractéristiques peuvent être perçues de façon très grossière quand celles-ci sont devenues familières (l'effort impliqué dans la reconnaissance est minimale) ; des caractéristiques approximativement similaires d'une action peuvent ainsi conduire à faire exécuter une action non souhaitée.

Dans le cas d'une **attention excessive**, la **vérification à contre-temps** peut conduire à perturber l'action en cours par l'attention qui se fixe sur un point particulier, alors que cela n'est pas prévu ; cela survient pour les tâches fortement automatisées et peut conduire à des difficultés de repositionnement par rapport à la tâche en cours.

Type de comportement	Modes de défaillance	Causes psychologiques
SB	Attention excessive	Vérification à contretemps
	Inattention	Perturbation Intentionnalité réduite Confusion perceptive

Tableau 1.2 : Erreurs au niveau SB.

Les modes de défaillances pour le comportement RB sont une **application erronée de bonnes règles et l'application de mauvaises règles** (Selon Reason, "une bonne règle est celle qui s'est révélée utile dans une situation particulière").

L'application erronée de bonnes règles a pour causes :

- une "**règle forte mais fausse**", lorsque le sujet est face à une situation non reconnue et qu'il applique une règle qui s'est jusqu'ici avérée utile faute d'en avoir une adaptée,
- une **situation peut être ambiguë**, c'est-à-dire perçue à travers des "signes" et des "contre-signes" ; certaines caractéristiques peuvent confirmer une règle alors que d'autres peuvent venir la contredire, il peut également arriver que ces contre-signes soient rejetés car ne correspondent pas à l'image que se fait le sujet,
- une **capacité de traitement limitée**, qui implique que l'ensemble des informations disponibles, qui peuvent conduire à se faire une représentation complète de la situation, ne sont pas toutes traitées,
- une **compétition entre règles**, qui indique une préférence pour certains signes au détriment d'autres ; plus une règle est forte, plus elle aura tendance à être considérée comme la plus vraisemblable,
- un "**conservatisme cognitif**", qui conduit le sujet à ne pas changer les règles qu'il a établies au profit de règles plus élégantes et plus simples.

L'application de mauvaises règles a pour causes :

- une **représentation partielle de l'espace-problème**, qui conduit à des actions sur certains aspects et à négliger les autres (exemple du conducteur débutant qui éprouve des difficultés à contrôler la direction et le passage de vitesses).
- une **représentation incorrecte de l'espace-problème**, c'est-à-dire une représentation simpliste des propriétés physiques du monde,
- de **mauvaises habitudes**, qui consistent à employer des règles erronées (erreur de calculs faits par des enfants), maladroites, inélégantes ou déconseillées (violation consciente de règles de sécurité) pour atteindre un objectif ; ces règles peuvent avoir certains avantages mais sont potentiellement dangereuses
- une **confiance excessive en ses capacités** : le sujet ne respecte pas certaines consignes, de sécurité notamment, car il est convaincu qu'il aura toujours suffisamment de temps pour faire face aux situations redoutées le cas échéant (c'est le cas de l'automobiliste qui ne respecte pas les distances de sécurité recommandées sur autoroute).

Type de comportement	Modes de défaillance	Causes psychologiques
RB	<i>Mauvaise application de règles correctes</i>	Règles fortes mais fausses Ambiguité des situations Capacité limitée de traitement Compétition entre règles "Conservatisme cognitif"
	<i>Application de mauvaises règles</i>	Représentation partielle de l'espace-problème Représentation incorrecte de l'espace-problème Mauvaises habitudes Règles déconseillées

Tableau I.3 : Erreurs au niveau RB.

Les défaillances du niveau KB se produisent quand le sujet met en œuvre son attention sur un problème qui n'a pu être résolu au niveau RB.

Les modes de défaillance peuvent être :

- une **récapitulation biaisée**, ou "illusion du pointage", qui indique que le plan d'action est évalué par rapport à certains aspects de la situation et non de manière systématique et rigoureuse sur l'ensemble des données disponibles,
- une **résistance au changement**, qui indique qu'un plan d'action initialement établi est maintenu malgré les nouvelles données qui indiquent que l'objectif poursuivi n'est pas accessible de cette façon,
- une **limitation de l'espace de travail**, ou principe du "premier entré/ premier sorti" selon lequel l'interprétation des caractéristiques du problème est réalisée par rapport à un modèle mental (la charge de travail est différente selon la façon dont le problème est posé),
- "hors de la vue, hors de l'esprit", ou "heuristique d'accessibilité", selon laquelle la priorité est donnée aux faits qui viennent facilement à l'esprit,
- une **difficulté à maîtriser la complexité**, qui est liée à :
 - * une perception limitée des aspects temporels, c'est-à-dire une mauvaise maîtrise des processus à long délai de réponse (les actions sont alors réactives, c'est-à-dire dirigées par les données, plutôt qu'anticipatives),
 - * une difficulté à traiter les évolutions exponentielles, c'est-à-dire qu'il y a sous-estimation systématique de l'importance de certains phénomènes,
 - * une forte tendance à raisonner selon des séquences linéaires, c'est-à-dire que les effets des actions ne sont pas considérés sur l'ensemble du processus,
 - * un "vagabondage thématique et enkystement", qui apparaissent dès qu'un problème ne trouve pas de solution ; le vagabondage est le passage d'un aspect à un autre sans démarche précise, l'enkystement est une focalisation excessive sur un aspect particulier du problème (De Keyser emploie le terme de fixation [DE KEYS 90a],

- un **biais de confirmation**, qui correspond à un phénomène de rejet d'ambiguïté, c'est-à-dire qu'une préférence est accordée aux interprétations disponibles malgré l'arrivée d'informations qui viennent la remettre en question,
- une difficulté à se représenter la causalité, en raison d'une simplification excessive des phénomènes causaux, qui conduit à juger sur des critères de similarité avec des cas antérieurs, donc à ne pas considérer l'ensemble des cas possibles,
- une difficulté à diagnostiquer, directement liée à la conduite de raisonnement ; l'erreur peut provenir d'une imbrication néfaste entre assimilation des symptômes et génération des scénarii qui ont pu conduire aux symptômes observés,
- une mauvaise sélectivité, qui indique que trop d'attention est accordée à des caractéristiques non pertinentes, c'est-à-dire que l'attention est absorbée par des aspects psychologiquement attrayants.

Type de comportement	Modes de défaillance	Causes psychologiques
KB	Récapitulation biaisée	"Illusion du pointage"
	Résistance au changement	Résistance au changement
	Limitation de l'espace de travail	Principe du "premier entré/ premier sorti"
	Hors de la vue, hors de l'esprit	"Heuristique d'accessibilité"
	Difficultés avec la complexité	Perception des aspects temporels limitée Difficulté à traiter les "évolutions exponentielles" Forte tendance à raisonner selon des séquences linéaires Vagabondage thématique et enkystement
	Biais de confirmation	Rejet d'ambiguïté
	Difficultés avec la causalité	Simplification excessive de la causalité
	Difficultés de diagnostic	Conduite de raisonnement
	Sélectivité	Attention du sujet

Tableau 1.4 : Erreurs au niveau KB.

Selon Reason, deux types d'erreurs peuvent être envisagés :

- les **erreurs actives** concernent directement l'activité des opérateurs, elles présentent la caractéristique d'être **récupérables**, en ce sens que l'opérateur peut parvenir à corriger ses erreurs avant que leur effet ne se fasse sentir,
- les **erreurs latentes** sont par exemple les erreurs de conception du processus ; leur caractéristique est donc leur **permanence**. Ce sont des défauts insidieux dont on peut difficilement quantifier l'impact

Les expériences menées en psychologie montrent que l'erreur active est présente dans tous les aspects de l'activité humaine (posture, parole, actions, résolution de problème). Des travaux expérimentaux ont également montré que la grande majorité des erreurs sont corrigées avant leur effet sur le processus. Reason cite **trois modes de détection de l'erreur** : par un **écart entre l'intention et le résultat observé** (analogie avec la boucle de rétroaction en automatique), **blockage des actions par les automatismes** (ce sont généralement les sécurités mises en place en conception), et la **détection par un tiers** (contre-maître).

Selon Reason, la non détection est susceptible de conduire à des conséquences graves, et l'étude des accidents du type Three Mile Island ont permis de montrer que certains processus cognitifs sont plus particulièrement responsables de la non détection d'erreurs par l'opérateur.

Les travaux expérimentaux relatés par Reason ont un caractère expérimental fort, puisque les résultats ont été obtenus dans des conditions et des contextes différents de ceux rencontrés en salle de conduite, et les conclusions tirées n'ont pas une portée générale. Cependant, le résultat qu'il faut en tirer est le suivant : **vouloir réduire les erreurs humaines est illusoire, il faut plutôt s'attacher à se prémunir contre les conséquences possibles d'erreurs difficilement corrigées par les opérateurs, sans l'intervention externe d'un contre-maître.**

I.4.2 La typologie de Nicolet

Nicolet propose une typologie basée sur une approche ergonomique de l'erreur, et établie à partir des étapes d'une tâche ; avec ce découpage, l'auteur distingue **sept types d'erreur** [NICOL 88] :

- les **erreurs de perception** ont des causes multiples, par exemple l'information n'est pas correctement perçue, le signal est fugitif et l'opérateur n'a pas le temps de le percevoir ou de le mémoriser, l'information est masquée par un écran, l'information est noyée au milieu d'un grand nombre d'autres, etc.,
- les **erreurs de décodage** relèvent d'une mauvaise interprétation des indices sensoriels,
- le **non respect d'une procédure** est un acte conscient qui peut ne pas se révéler néfaste pour le bon fonctionnement du processus, mais il est le signe de mauvaises habitudes de la part des opérateurs,
- les **erreurs de communication** interviennent lors de l'échange d'informations entre agents ; une information peut être mal transmise ou mal comprise par l'opérateur qui reçoit,
- les **décisions peuvent ne pas être prises en temps voulu** : une fois le diagnostic établi, l'opérateur repousse la décision en attendant un complément d'information,
- les **actions mal dosées ou mal adaptées** relèvent d'une réalisation incorrecte d'une action requise, du non-accomplissement d'une action nécessaire, de l'exécution d'une action impromptue (non prévue dans la séquence en cours), de l'inversion de l'ordre d'exécution de deux actions,
- les **erreurs de représentation** ou de modèle traduisent les écarts qui peuvent exister entre les certitudes de l'opérateur et la situation réelle.

1.4.3 La typologie de de Keyser

De Keyser propose une approche davantage orientée psychologie du travail. L'auteur distingue quatre grandes classes d'erreurs : erreurs d'évaluation, de coordination, d'intégration et de planification [DE KEYS 90b].

Les erreurs d'évaluation sont de trois types :

- les erreurs de **filtrage**³ correspondent à des informations que l'opérateur ne prend pas en compte, par exemple un changement, car il se fonde davantage sur une faible probabilité de dérèglement d'un paramètre et ne le consulte pas, ou car il néglige de l'information,
- les erreurs dues à une **carence ergonomique** traduisent les situations mal perçues car l'opérateur n'a pas les moyens d'évaluer l'apparition ni la durée d'un événement, il n'existe pas de vue synoptique des événements du système,
- les erreurs de **mode** résultent d'une mauvaise mise en correspondance de quatre modes d'appréhension du temps par l'opérateur : **intériorisation des événements réguliers**, **mode logique** (mise en correspondance d'événements et de séquences d'action), **mode causal** (événements produits par le processus) et **mode de l'horloge** (les délais et contraintes de production). Pour une description détaillée des modes, se reporter en annexe I.

Les erreurs de coordination dans l'équipe de conduite sont dues, par exemple, à une charge de travail trop importante (qui peut entraîner des délais et oubli de transmission d'informations), à une mauvaise évaluation temporelle (mauvaise connaissance de l'état général du système), à une difficulté de joindre les personnes à contacter, ou bien à des facteurs psychologiques ou organisationnels (par exemple rétention d'information et conflits).

Les erreurs d'intégration concernent spécifiquement les décisions d'actions d'ajustement des actions de l'équipe en fonction de retards ou d'avances au niveau de la production. Elles se caractérisent par une évaluation correcte de la situation mais à une erreur dans la prise de décision, par la difficulté de l'opérateur à suivre les différents événements qui constituent le processus, ou encore par des difficultés à intégrer les actions de l'équipe avec les événements du processus.

Enfin, les erreurs de planification apparaissent lorsqu'un écart trop important entre déroulement temporel prévu et déroulement actuel requiert de la part de l'opérateur, seul ou en accord avec sa hiérarchie, la prise de décisions bouleversant la planification initiale. Ces décisions portent généralement sur des modifications de l'ordre des événements ou de leur durée. Elles sont caractérisées par une mauvaise évaluation de l'état temporel du système, une mauvaise connaissance des contraintes fixes et des zones de flexibilité, et une mauvaise connaissance des liens de causalité entre événements ou actions.

1.4.4 Caractéristiques de ces typologies

Les typologies de Nicolet et de de Keyser sont orientées supervision de processus de fabrication. Celle de de Keyser est principalement centrée sur la description des erreurs cognitives (évaluation, intégration, planification), alors que celle de Nicolet décrit plus spécifiquement

³Toute l'information de l'environnement de travail n'est pas prise en compte par l'opérateur et il ne retient que ce qui est important pour lui. L'erreur provient du fait qu'il néglige certaines informations au profit d'autres qu'il considère relever davantage de l'état de marche du système.

les erreurs commises au niveau des étapes d'une tâche (perception, décodage, représentation, décision, définition de procédures, action, communication). La typologie de Reason s'intéresse plus particulièrement aux **mécanismes de production de l'erreur** et propose une explication psychologique à leur occurrence ; elle a une portée plus générale que les deux premières, car elle n'est pas spécifique à la supervision.

Ces typologies répondent, en fait, à des objectifs spécifiques :

- pour Nicolet, il s'agit d'avoir une typologie utilisable par l'ergonome, c'est-à-dire qui mette l'accent sur les traces de l'erreur, de façon à permettre de proposer des solutions ergonomiques,
- pour de Keyser, la typologie d'erreurs doit prendre en compte la dimension temporelle de l'activité de supervision,
- pour Reason, il s'agit de recenser les causes psychologiques des erreurs commises, en supervision de processus industriel comme dans les situations de la vie quotidienne.

Le paragraphe qui suit est consacré à l'évaluation de ces typologies en regard des activités demandées à l'opérateur : quelle est celle qui tient compte de l'ensemble des activités humaines en supervision de processus ?

I.5 UNE CLASSIFICATION DES ERREURS

Notre objectif est d'avoir une typologie qui prenne en compte l'ensemble des activités demandées à l'opérateur : **exécution** de procédures, **ajustement** des paramètres de fonctionnement, **adaptation** du fonctionnement (en fonction des pannes par exemple), **anticipation** des actions sur le processus (prévision des évolutions du processus et planification des actions en conséquence) et **collaboration** (l'opérateur doit coordonner son activité avec celle des autres membres de l'équipe). Qu'en est-il effectivement pour les typologies évoquées ?

Dans un premier temps, nous mettrons en évidence les liens entre les typologies de Nicolet et de Keyser, puis nous envisagerons la typologie de Reason comme explication possible des erreurs recensées dans les deux premières typologies.

I.5.1 Les typologies de Nicolet et de Keyser

Nous proposons de ranger les divers types d'erreur selon l'activité à laquelle ils correspondent le mieux :

- **exécution** : Nicolet recense les erreurs issues d'actions mal dosées et du non respect d'une procédure,
- **ajustement** : Nicolet recense les erreurs de perception, de décodage et de représentation, d'erreur due à une carence ergonomique, tandis que de Keyser introduit les notions d'erreur de mode et de filtrage,
- **adaptation** : de Keyser indique que les erreurs pouvant survenir ici sont dues à l'impossibilité de suivre le processus selon un mode causal, ainsi que la mauvaise adéquation entre actions humaines et contraintes temporelles,
- **anticipation** : Nicolet recense les décisions non prises en temps voulu, de Keyser parle d'erreur dans la sélection de but ou de tâche, ou encore de la décision de changer l'ordre des événements et leur durée qui est prise de façon trop tardive ou de façon impromptue,
- **collaboration** : Nicolet parle ici d'erreur due à une mauvaise communication, de Keyser d'oubli et de délais de transmission de l'information.

Ces typologies peuvent être considérées comme complémentaires, et nous proposons de les regrouper en une seule typologie d'erreurs, basée sur la mise en correspondance des activités humaines de supervision avec les typologies de Nicolet et de Keyser :

- l'opérateur **exécute** des procédures ; il peut commettre des **erreurs d'exécution**,
- il **ajuste** les paramètres de fonctionnement ; il peut commettre des **erreurs d'évaluation**,
- il **adapte** le processus en fonction de contraintes de production ; il commet des **erreurs d'intégration**,
- il **anticipe** les actions à envisager ; il commet des **erreurs de planification**,
- il **participe** à un objectif commun ; il commet des **erreurs de coordination**.

Cette typologie n'a évidemment pas la portée d'une théorie ni l'assise d'une démonstration expérimentale, elle est seulement fondée sur l'hypothèse selon laquelle certaines erreurs surviennent préférentiellement au niveau d'une classe d'activité humaine.

Nous avons, par ailleurs, choisi de regrouper les activités de l'opérateur selon les trois dimensions suivantes :

- la dimension **collective** ou **sociale**, qui tient compte des erreurs dues à des problèmes de **coordination** entre opérateurs.
- la dimension **cognitive**, qui regroupe les aspects ajustement, adaptation et anticipation. Les erreurs commises dans cette dimension sont rangées en **erreurs d'évaluation** (mauvaise interprétation des observations), **erreurs d'intégration** (interprétation correcte mais décision erronée) et **erreurs de planification** (mauvaise anticipation des évolutions et mauvais choix de la stratégie de conduite),
- la dimension **opératoire**, qui tient compte des actions, des procédures, des tâches réalisées. Les erreurs qui peuvent être commises ici relèvent spécifiquement d'une mauvaise **exécution** des séquences d'actions,

Il est à noter que parmi ces trois dimensions, seule la dimension cognitive échappe à l'observation directe. Une synthèse est présentée dans le tableau I.5.

Dimensions	Niveaux de perception de l'intervention humaine	Typologie et origine des erreurs
collective	L'opérateur participe à un objectif commun	Erreurs de coordination Mauvaise communication (Nicolet) Oublis et délais de transmission de l'information (Keyser)
	L'opérateur anticipe les changements de stratégie de fonctionnement	Erreurs de planification Décision non prise en temps voulu (Nicolet) Erreur dans la sélection de but, de cible ou de tâche (de Keyser) Décision de changer l'ordre des événements et leur durée trop tardive ou de façon impromptue (de Keyser)
	L'opérateur adapte le fonctionnement du processus	Erreurs d'intégration (de Keyser) Impossibilité pour l'opérateur de suivre le processus selon un mode causal Mauvaise adéquation entre actions et contraintes temporelles
cognitive	L'opérateur ajuste les paramètres de fonctionnement	Erreurs d'évaluation Erreur de perception (Nicolet) Erreur de décodage (Nicolet) Erreur de représentation (Nicolet) Erreur de mode (de Keyser) Erreurs dues à une carence ergonomique (Nicolet) Erreur de filtrage (de Keyser)
	L'opérateur exécute des procédures	Erreurs d'exécution (Nicolet) Non respect d'une procédure ou d'un règlement Action mal dosée
opératoire		

Tableau I.5 : Dimensions de l'activité, niveaux de perception de l'intervention humaine et erreurs.

En 1964, Berliner et al. ont proposé un découpage similaire de l'activité humaine [BERLI 64] (repris par [MILLO 88]). Quatre classes d'activités principales étaient alors considérées : activité de perception, activité mentale, activité de communication et activité motrice. Une comparaison avec la classification que nous proposons montre que les deux premiers aspects évoqués par Berliner et al. sont pris en compte en dimension cognitive, l'activité de

communication est englobée dans la dimension collective et enfin les activités motrices correspondent à la dimension opératoire.

1.5.2 Liens avec la typologie de Reason

Cette typologie d'erreurs résultante est désormais considérée comme notre **hypothèse de travail**. Nous proposons de considérer les liens qui peuvent exister entre cette typologie, qui a un **caractère descriptif**, avec la typologie proposée par Reason, qui a une portée plus générale, et se veut avant tout explicative (tableau I.6) :

- le **comportement basé sur les automatismes** ne fait pas intervenir le raisonnement conscient et s'adresse donc directement à la **dimension opératoire** de l'activité humaine (il y a un rapport entre erreurs de type SB de Reason avec les erreurs d'**exécution**),
- le **comportement basé sur les règles** est basé sur l'évaluation et la reconnaissance de la situation, puis par l'exécution de procédures ; les erreurs dans ce type de comportement, font donc référence aux erreurs d'**exécution** et aux erreurs d'**évaluation**,
- le **comportement basé sur les connaissances déclaratives** fait intervenir un raisonnement conscient de résolution de problème ; il s'adresse donc directement à la **dimension cognitive** de l'opérateur (erreurs d'**évaluation**, d'**adaptation** et de **planification**)
- la **dimension collective** du travail n'est pas prise en compte dans la typologie de Reason, qui s'est restreint à l'étude des aspects cognitifs et individuels,

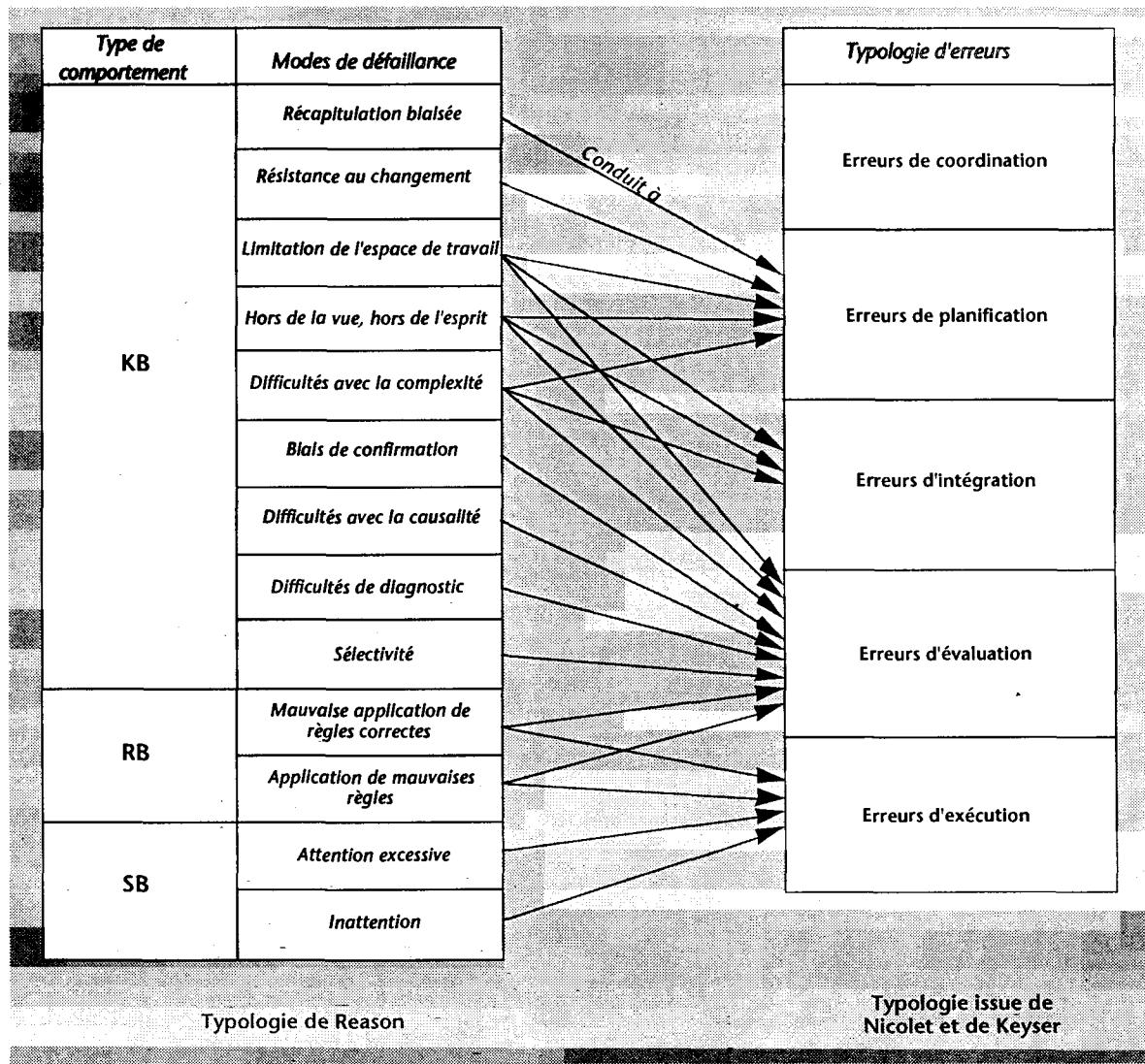


Tableau I.6 : Liens entre les trois typologies d'erreurs.

Nous utiliserons donc la typologie élaborée à partir des typologies de Nicolet et de Keyser, mais nous aurons présent à l'esprit que les causes d'erreur peuvent être multiples.

L'analyse de ces trois typologies d'erreurs étant effectuée, nous pouvons maintenant dégager une vision synthétique de l'activité de l'opérateur.

I.6 UNE VISION SYNTHETIQUE DE L'ACTIVITÉ OPÉRATEUR

Parallèlement à l'étude des mécanismes de l'erreur, la psychologie cognitive s'est intéressée à la modélisation de l'opérateur. De nombreux travaux de recherche ont été et sont encore menés dans le but de comprendre les mécanismes de raisonnement humain. La question à laquelle il nous faut apporter des éléments de réponse est la suivante : les modèles de l'opérateur constituent-ils une bonne base de travail pour spécifier une aide à l'opérateur ?

Nous envisagerons ensuite de dresser une description synthétique des caractéristiques principales de l'opérateur, ce qui nous permettra ensuite d'entrevoir les contours d'une méthodologie de conception d'aides.

I.6.1 Limites des modèles opérateur

Les efforts menés en ergonomie et psychologie cognitives ont mis en lumière certains aspects fondamentaux liés à la façon dont l'opérateur se représente un processus et raisonne. L'étude des comportements de l'opérateur, initiée entre autres par Rasmussen, a conduit à considérer deux catégories de modèles : les **modèles de représentation** du monde, et les **modèles de raisonnement** (se reporter à l'annexe I qui décrit entre-autres les modèles de Rasmussen et Rouse).

Les travaux de Goodstein, Rasmussen et Rouse s'accordent sur une **représentation multi-modèles** (abstractions) et multi-niveaux (de raffinement ou bien d'agrégation), ainsi que sur des comportements-types sélectionnés en fonction de la situation [GOOD 82] [ROUSE 83] [RASMU 79, 81, 84]. Pour le modèle de Rasmussen, qui est le plus employé, l'opérateur adopte des **comportements routinier**, dirigé par des règles ou encore **dirigé par les connaissances déclaratives** (résolution de problème), alors que Rouse considère le raisonnement par **reconnaissance de caractéristiques** (pattern matching), et le raisonnement basé sur la **topologie du processus** (recherche des causes par analyse structurelle). Les différences entre ces modèles opérateur se situent davantage au niveau des modes de raisonnement : Rasmussen propose un **modèle séquentiel** allant de l'observation de données du processus à l'identification et la planification des actions, tandis que Rouse propose un **modèle plus général** qui postule le **parallélisme** des activités cognitives.

Une première critique est que ces modèles sont essentiellement focalisés sur l'activité cognitive de l'opérateur. Il est clair que cette **dimension** n'est pas suffisante pour traiter l'ensemble des aspects humains mis en jeu dans l'activité humaine : l'opérateur agit sur le processus (tâches d'exécution), il intervient dans le cadre d'une équipe, d'une organisation. Il est nécessaire de considérer les dimensions opératoire, cognitive et collective, pour avoir une représentation plus proche de la réalité.

Une seconde critique porte sur le caractère séquentiel du modèle de Rasmussen, qui est considéré comme trop restrictif pour pouvoir prendre en compte l'activité réelle des opérateurs ; Bainbridge estime nécessaire un changement de concepts pour modéliser, de façon plus satisfaisante, le comportement humain [BAINB 93]. En effet, les situations complexes auxquelles doit faire face l'opérateur font davantage appel à des modèles contextuels, car, selon Bainbridge :

- l'information disponible est généralement mal adaptée à la compréhension de ce qu'il se passe ; l'opérateur est obligé d'inférer des règles pour interpréter les données qu'il reçoit,
- il est souvent impossible de produire un comportement automatisé ou standard en réponse à une situation,
- en situation complexe, l'opérateur peut avoir plusieurs buts simultanément (cela implique une certaine flexibilité et adaptabilité),
- les situations non familières exigent l'adaptation de la charge de travail de l'opérateur, et la mise en œuvre de méthodes de résolution particulières (consultation d'un expert, recherche d'une situation similaire dans l'historique de l'installation, combinaison de plusieurs méthodes en une nouvelle séquence d'actions, et enfin raisonnement à partir de premiers principes).

Nous nous exposons donc à leurs limites si nous envisageons de définir une aide basée sur eux et donc à proposer une aide qui risque de se révéler inadaptée. Quel est alors le niveau ou le point de vue auquel il faut se placer, pour pouvoir appréhender les caractéristiques qui nous permettront de comprendre les faiblesses de l'opérateur et, ce faisant, de nous doter des moyens de décliner une aide ? Nous avons choisi d'explorer une voie des erreurs humaines : partant du principe que l'erreur peut survenir à tous les niveaux de l'activité de l'opérateur (par exemple lors de l'exécution de procédures ou pendant l'interprétation de données), nous nous proposons de recenser l'ensemble des types d'erreurs potentiels, de manière à être capables de décliner les améliorations les mieux indiquées pour chacun des types d'erreur recensés.

I.6.2 Les tâches et la typologie d'erreurs

Les liens entre les erreurs et les tâches confiées aux opérateurs apparaissent à partir du moment où nous considérons qu'une tâche fait intervenir les trois dimensions humaines : opératoire, cognitive et collective.

La tâche est alors définie comme un ensemble d'actions conditionnées qui suppose des interactions particulières entre un (ou plusieurs) opérateur (s) et le processus. Nous utiliserons par la suite le découpage en quatre types de tâches précédemment introduit : tâches de transition, tâches de suivi, tâches de détection/diagnostic et tâches de compensation.

Quand l'opérateur prend à sa charge une tâche, il met en application des procédures (dimension opératoire), il diagnostique une situation et planifie ses actions (dimension cognitive), et enfin il communique des informations et agit de concert avec les autres membres de l'équipe (dimension collective). Il nous faut donc voir la tâche comme faisant potentiellement intervenir l'ensemble de ces dimensions.

Nous ne pensons pas qu'il y ait une seule dimension de l'activité impliquée pour effectuer, par exemple, une tâche de transition. Il semble, au contraire, que les dimensions impliquées dans chaque type de tâche dépendent étroitement du processus industriel lui-même (fonctionnement continu ou batch), de l'organisation de l'équipe de conduite (répartition des rôles entre opérateurs), etc.

Prenons l'exemple du Prototype Evolutif de Vitrification. Le PEV est la réplique d'une ligne de vitrification des déchets de haute activité de l'usine COGEMA La Hague. Il sert de banc de test, en grandeur réelle, des choix technologiques avant leur mise en œuvre effective. Le procédé est le suivant : la solution de produits de fission est séchée, calcinée, puis incorporée à du verre en fusion. Plusieurs heures d'alimentation continue sont nécessaires pour avoir la quantité requise de verre et pouvoir ensuite le couler dans un conteneur (l'annexe II présente une description détaillée de cette installation).

Les **tâches de transition** sont nombreuses puisque le PEV est une installation fonctionnant, en règle générale, par campagnes d'une semaine ; par ailleurs, le procédé de fabrication implique une alimentation continue et un produit obtenu de manière discontinue. Ces tâches font principalement appel aux dimensions opératoire et collective qui nécessitent la coordination des actions de l'équipe de conduite. Bien entendu, la dimension cognitive intervient mais les tâches sont bien connues car l'installation fonctionne par campagnes d'une semaine, c'est-à-dire que les tâches de transition sont très fréquentes.

Les **tâches de suivi** du processus en régime établi sont réparties sur l'ensemble de l'équipe. Une grande partie des paramètres surveillés sont rassemblés en salle de conduite, et une ronde est effectuée à intervalles réguliers pour vérifier le bon fonctionnement des appareils ; le bilan de suivi est consigné sous forme de bilans matière et énergie, de courbes d'évolution de certains paramètres importants. Les dimensions qui interviennent de manière prépondérante sont les dimensions opératoire et collective. Les tâches de suivi sont des tâches de routine du type vérification horaire des bilans matière et énergie, suivi de la coulée de verre, ajustement des puissances de chauffe au niveau du pot de fusion.

Les **tâches de détection et diagnostic** se concentrent essentiellement sur certaines parties du processus, considérées comme vitales - ce sont d'ailleurs sur celles-ci que des sécurités ont été disposées. Elles font principalement appel aux dimensions cognitive et collective.

Les **tâches de compensation** interviennent après le diagnostic d'un défaut ou d'une dérive. Le plus souvent, l'installation est mise temporairement en position de repli. Ces tâches font appel aux dimensions opératoire, cognitive et collective.

Le tableau I.7 indique les importances relatives de chacune des dimensions dans les tâches humaines de supervision du PEV.

Tâches de compensation	Tâches de diagnostic	Tâches de suivi	Tâches de transition	Dimensions
+++	+++	++	+++	collective
++	+++	+	+	cognitive
+++	++	+++	+++	opératoire

Tableau I.7 : Tâches et dimensions humaines sollicitées en conduite du PEV.

I.6.3 Relations dimension/erreur/tâche

A partir de cette description, il est aisément d'en déduire les liens entre types de tâches humaines et types d'erreurs (tableau I.8).

Tâches de compensation	Tâches de diagnostic	Tâches de suivi	Tâches de transition	Dimensions	Typologie d'erreurs
+++	+++	++	+++	collective	Erreurs de coordination
++	+++	+	+	cognitive	Erreurs de planification
+++	++	+++	+++	opératoire	Erreurs d'intégration
					Erreurs d'évaluation
					Erreurs d'exécution

Tableau I.8 : Relations entre tâches, dimensions et erreurs.

Ainsi, l'opérateur est considéré comme un système ayant à prendre en charge certains types de tâches, qu'il réalise en mettant en œuvre plus particulièrement certains types d'activités, elles-mêmes associées à des types d'erreurs. Cette description ne permet pas d'orienter le choix de l'aide en fonction des dimensions de l'activité les plus sollicités dans un type de tâche, elle a seulement pour objet de proposer une cartographie instantanée de la supervision d'un processus de fabrication.

I.7 CONCLUSION

L'opérateur de conduite a un rôle essentiel comme superviseur au sein du processus de fabrication : il effectue un certain nombre de tâches fortement dépendantes du contexte, donc difficilement automatisables, qui nécessitent de sa part une activité constante de surveillance du processus, du système de contrôle-commande ainsi que des capteurs et actionneurs ; il peut être amené à **diagnostiquer** un dysfonctionnement qu'il devra compenser en agissant, en retour, sur le processus. Il est donc considéré comme composante d'adaptation du système de contrôle-commande, face aux changements de mode de marche, aux perturbations extérieures, et aux événements nouveaux.

Mais d'un autre côté, ses **performances** sont sujettes à d'importantes variations, qui peuvent avoir une incidence sur le processus et remettre en cause la mission qui lui a été confiée. Pour prendre la mesure de ce risque, il nous faut considérer l'opérateur comme un **facteur de risque** par la **variabilité de ses performances**. Cette variabilité est à l'origine de la **défaillance de l'opérateur** (inaptitude à assurer une fonction requise), qui peut conduire à l'**erreur humaine** ; la **défaillance caractérise un état de fonctionnement**, tandis que l'**erreur**, quant à elle, **caractérise un écart par rapport à une intention** (il y a erreur à partir du moment où les actions effectives ne correspondent pas aux intentions) [REASON 93].

Nous avons passé en revue trois typologies d'erreurs : la typologie de Reason, en psychologie cognitive, celle de Nicolet en ergonomie, et celle de Keyser en psychologie du travail. Nous avons tenté de montrer les relations possibles entre ces trois typologies : la typologie de Nicolet s'attache plus à décrire les erreurs survenant au cours d'une tâche, de Keyser insiste sur les aspects temporels de la supervision, qui peuvent conduire l'opérateur à l'erreur ; Reason, quant à lui, fournit un modèle générique et explicatif de l'erreur, principalement axé sur les aspects cognitifs de l'activité humaine.

Pour prendre en compte l'**ensemble des activités humaines en supervision de processus**, nous avons émis l'**hypothèse de la complémentarité** des typologies proposées par Nicolet et de Keyser, et proposé de fondre ces deux typologies en une seule. Cinq types sont ainsi mis en évidence :

- l'opérateur est considéré en tant qu'exécutant, d'où les erreurs d'exécution,
- l'homme est un système capable d'ajustements, d'où les erreurs d'évaluation,
- l'homme est un système capable d'adaptation, d'où les erreurs d'intégration,
- l'homme est un système capable d'anticipation, d'où les erreurs de planification,
- l'homme est capable de participation à un objectif général, d'où les erreurs de coordination.

La typologie de Reason s'intéresse aux causes psychologiques de l'erreur, qui peuvent ensuite donner lieu à des erreurs d'exécution, d'ajustement, d'adaptation et de planification. Notre typologie d'erreur constitue désormais notre support de réflexion puisque les modèles de raisonnement ne répondent que partiellement à notre besoin de disposer d'une vision globale de l'activité de l'opérateur.

Dans le chapitre suivant, nous utiliserons cette typologie pour décliner les aides à l'activité de l'opérateur, en particulier les aides supportées par des systèmes informatiques en salle de conduite.

Le tableau I.9 fait la synthèse des principaux points évoqués concernant l'erreur entre les typologies de Nicolet et de Keyser, ainsi que leurs causes au niveau de la typologie de Reason.

Tableau I.9 : Récapitulatif des typologies de Nicolet, de de Keyser et Reason.

Type de comportement	Modes de défaillance	Causes psychologiques	Typologie et origine des erreurs
KB	Récapitulation biaisée	"Illusion du pointage" : plan d'action évalué par rapport à certains aspects de la situation et non de manière exhaustive et systématique	
	Résistance au changement	Confiance excessive : le plan d'action initialement établi est maintenu malgré les nouvelles données qui indiquent que l'objectif poursuivi n'est pas accessible de cette façon	
	Limitation de l'espace de travail	Principe du "premier entré/ premier sorti" : interprétation des caractéristiques du problème en fonction de son modèle mental (charge de travail cognitive différente selon la manière dont est présenté le problème)	
	Hors de la vue, hors de l'esprit	"Heuristique d'accessibilité" : priorité accordée aux faits qui viennent le plus facilement à l'esprit	
	Difficultés avec la complexité	Perception limitée des aspects temporels : mauvaise maîtrise des processus à long délai de réponse qui conduit à agir de manière réactive plutôt que de manière anticipative ("les actions sont dirigées par les données plutôt que par un modèle prédictif") Difficulté à traiter les "évolutions exponentielles" : sous-estimation de l'ampleur d'un phénomène (cas des évolutions catastrophiques) Forte tendance à raisonner selon des séquences causales linéaires plutôt que de réseaux causaux : non prise en compte des effets des actions sur l'ensemble du processus Vagabondage thématique (traitement superficiel du problème) et enkystement (fixation sur un point non pertinent)	
	Biias de confirmation	Rejet d'ambiguité : préférence accordée à une interprétation disponible malgré l'arrivée d'informations qui viennent la remettre en question	
	Difficultés avec la causalité	Simplification excessive de la causalité : croyance qu'un événement donné puisse avoir une seule cause satisfaisante (l'expérience d'événements similaires en accroît la vraisemblance)	
	Difficultés de diagnostic	Conduite de raisonnement : imbrication néfaste entre analyse des symptômes de dysfonctionnement et génération de scénarios d'événements qui les expliquent	
	Sélectivité	Attention du sujet : trop d'attention est accordée à des caractéristiques non pertinentes ou attention insuffisante sur des points essentiels	
RB	Mauvaise application de règles correctes	"Règles fortes mais fausses" : interprétation d'une situation nouvelle en utilisant des règles qui étaient jusqu'ici vraies (situations connues), raisonnement par analogie avec des caractéristiques similaires, tout en sachant pertinemment qu'il y a des différences notables Ambiguité des situations : interprétation avec des données incomplètes et imprécises (raisonnement sur des indices, des signes, permettant de se représenter la situation) Capacité limitée de traitement : les données permettant d'avoir un tableau complet de la situation ne sont pas toutes prises en compte	
	Application de mauvaises règles	Compétition entre règles : certains indices sont plus particulièrement considérés au détriment d'autres (effet de l'expérience qui donne plus d'importance aux chemins de causalité vérifiés par le passé) "Conservatisme cognitif" : maintien des règles qui ont fait leur preuve, plutôt que d'employer des règles plus élégantes et moins fastidieuses	
SB	Attention excessive	Vérification à contretemps : examen inopportun de la situation pendant l'exécution d'une séquence d'actions automatiques (oubli de l'objectif initialement poursuivi)	
	Inattention	Perturbation : omission de vérification Intentionnalité réduite : perte d'intention due au retard existant entre formulation d'intention et exécution Confusion perceptive : reconnaissance très approximative de caractéristiques, surtout si celles-ci sont familières	

Références bibliographiques

- [BAINB 93] **L. Bainbridge,**
The change in concepts needed to account for human behavior in complex dynamic tasks,
IEEE Conference SMC , Le Touquet, Vol.1, pp 126-131, 1993.
- [BERLI 64] **C. Berliner, D. Angell, D.J. Shearer,**
Behaviors, measures and instruments for performance evaluation in simulated environments,
Symposium and Workshop on the Quantification of Human Performance, Albuquerque, New Mexico, August 1964.
- [CAVER 91a] **J.P. Caverni, C. Bastien,**
La psychologie cognitive face à ses enjeux,
Psychologie Cognitive : modèles et méthodes, Eds. PUG, pp. 7-10, 1991.
- [CELLIER 90] **J.M. Cellier,**
L'erreur humaine dans le travail,
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, editions OCTARES Entreprises, pp. 193-209, 1990
- [DE KEYS 90a] **V. de Keyser, D.D Woods,**
Fixation errors in complex systems,
In A. G. Colombo and R. Minsenta (Eds), *Advanced Systems Reliability Modelling*, Kluwer Academic Publisher, 1990.
- [DE KEYS 90b] **V. de Keyser,**
Fiabilité humaine et la gestion du temps dans les systèmes complexes,
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, editions OCTARES Entreprises, pp. 85-108, 1990.
- [DESPRE 91] **F. M. Després,**
Automatisation des systèmes de production. Du besoin à l'utilisation,
eds. KIRK, 1991.
- [GADBO 90] **C. Gadbois,**
Dimensions temporelles de l'action et fiabilité des systèmes socio-techniques,
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, editions OCTARES Entreprises, pp. 159-187, 1990.
- [GOODST 82] **L.P. Goodstein,**
An integrated display set for process operators,
IFAC Congress Analysis, Design and Evaluation of man-machine systems, Baden-Baden, September 1982.
- [HOC 87] **J. M. Hoc,**
Psychologie cognitive de la planification,
Sciences et Technologies de la Connaissance, PUG, 1987.

- [HOC 91] **J.M. Hoc,**
L'ergonomie cognitive : un champ pluri-disciplinaire dans les sciences cognitives,
Les sciences cognitives en débat, Editions du CNRS, Paris, 1991.
- [KOUTS 91] **H. Kouts,**
L'accident de la tranche 2 de la centrale nucléaire de Tree Mile Island,
Conférence Internationale sur les Accidents Nucléaires et le Futur de l'Energie Nucléaire. Leçons tirées de Tchernobyl, pp. 44-51, 15-17 avril 1991.
- [MILLOT 88] **P. Millot,**
Supervision des Procédés Automatisés et Ergonomie,
Traité des Nouvelles Technologies, Hermès, 1988.
- [NEBOIT 90a] **M. Neboit, X. Cuny, E. Fadier et M.T. Ho,**
Fiabilité humaine : présentation du domaine,
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, editions OCTARES Entreprises, pp. 23-46, 1990.
- [NICOL 90] **J.L. Nicolet,**
Outils et démarches pour l'amélioration de la fiabilité des systèmes complexes,
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, editions OCTARES Entreprises, pp. 23-46, 1990
- [NORMA 84] **D.A. Norman,**
Stages and levels in human-machine interaction,
Int. J. Man-Machine Studies, 21, pp. 265-375, 1984.
- [PHILLI 88] **M. D. Phillips, H. S. Bashinski, H. L. Hammermann, C. M. Fligg,**
A task analytic approach to dialogue design,
Handbook of Human - Computer Interaction, M. Helander (ed.), Elsevier Science Publishers B. V. (North Holland), pp 835-857, 1988.
- [POYET 90] **C. Poyet,**
L'homme, agent de fiabilité dans les systèmes automatisés,
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, editions OCTARES Entreprises, pp. 223 - 240, 1990.
- [QUEIN 87] **Y. Queinnec et G. de Terssac,**
Chronobiological approach of human Errors in complex systems,
RASMUSSEN, DUNCAN, LEPLAT (Eds), New technology and human Error, Chichester, Wiley and Sons, pp. 223-233, 1987.
- [RASMU 79] **J. Rasmussen,**
On the structure of knowledge - a morphology of mental models in a man-machine system context,
RISØ-M-2192, UDC 007.51 :62-5 : 65.015.12, Risø National Laboratory, DK-4000 Rokslide, Denmark, 1979.
- [RASMU 81] **J. Rasmussen, O.M. Pedersen, A. Carnino, M. Griffon, G. Mancini, and P. Gagnolet,**
Classification system for reporting events involving human malfunctions,
EUR 7444 EN (Commission of the European Communities, Luxembourg), 1981.
- [RASMU 84] **J. Rasmussen,**
Strategies for State Identification and Diagnosis in Supervisory Control Tasks, and Design of Computer-Based Support Systems,
Advances in Man - Machine Systems Research, Volume 1, pp. 139-193, 1984.

- [REASON 93] **J. Reason,**
L'erreur humaine,
Traduit de l'anglais par J-M. Hoc, Le travail Humain, PUF, 1993.
- [ROUSE 78] **W.B. Rouse,**
Human problem solving performance in a fault diagnosis task,
IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. SMC-8, No 4, April 1978.
- [ROUSE 83] **W.B. Rouse,**
Models of human problem solving : detection, diagnosis and compensation
for system failure,
Automatica, Vol. 19 - N°6, pp. 613-625, November 1983.
- [VILLEM 88] **A. Villemeur,**
Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Fiabilité - Facteurs
humains - Informatisation,
*Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France,
Editions Eyrolles, 1988.*

CHAPITRE II : Les aides à l'opérateur

La typologie d'erreurs proposée dans le précédent chapitre est le cadre que nous avons choisi pour définir une classification des améliorations de l'activité de supervision. Les aides informatisées correspondant à ces améliorations sont successivement passées en revue.

Les aides au diagnostic sont plus particulièrement détaillées : un cadre générique du diagnostic est proposé et les critères de choix des techniques à employer sont passés en revue.

II.1	Introduction	40
II.2	Relations entre erreurs et aides informatisées	41
II.3	Erreurs d'exécution	43
II.4	Erreurs d'évaluation	46
II.5	Erreurs d'intégration	80
II.6	Erreurs de planification	84
II.7	Erreurs de coordination	85
II.8	Conclusion	88
Références bibliographiques		90

II.1 INTRODUCTION

Le chapitre précédent a permis de clarifier les concepts de supervision, de surveillance et de diagnostic : l'opérateur est considéré comme **superviseur** du processus de production, il met en œuvre un certain nombre d'activités dont la surveillance, et il effectue des **tâches** qui font intervenir les composantes de diagnostic, de planification, et d'actions sur le processus. On qualifiera ainsi les aides relativement :

- au rôle de l'opérateur ; on parlera alors d'**aide à la supervision** dans son acception la plus générale,
- à une dimension de l'activité ; on parlera, par exemple, d'**aide à la décision** pour les aides qui relèvent de la dimension cognitive,
- à une composante de la tâche opérateur ; on parlera par exemple d'**aide au diagnostic**.

Les recherches menées en automatique et en Intelligence Artificielle connaissent, depuis quelques années, un essor considérable. Face à la multiplicité des solutions proposées dans le domaine de l'aide à l'opérateur, une vision synthétique et structurée s'impose. C'est, il nous semble, une condition nécessaire à la définition d'une méthodologie de conception de tels systèmes.

Plusieurs classifications des aides à l'opérateur ont été proposées, la plupart sont basées sur un modèle de l'opérateur. Un exemple en est la classification proposée par Taborin et étendue par Kolski, qui est construite autour du modèle de raisonnement de Rasmussen [TABOR 89] [KOLSKI 93] ; ce modèle constitue, en réalité, l'élément structurant de la classification, mais le risque est que cette dernière hérite également des limites du modèle (se reporter au chapitre I). Selon nous, un modèle devrait tenir compte du fait que : l'opérateur **exécute** des procédures (tâches manuelles), il met en œuvre des activités cognitives qui le conduisent à **ajuster** les paramètres, **adapter** le fonctionnement du système aux contraintes de l'environnement et **anticiper** les changements de stratégie de conduite, et enfin il **collabore** à la bonne marche du processus dans le cadre du travail en équipe.

Il nous semble que la classification des aides doit être construite en respectant les caractéristiques suivantes :

- elle doit couvrir l'ensemble des activités humaines impliquées dans la supervision,
- elle doit être générique et surtout indépendante de tout modèle, de façon à être applicable à l'ensemble des processus automatisés,
- elle ne doit pas être guidée par la capacité du concepteur à mettre en œuvre des fonctionnalités techniques proposées, mais elle doit plutôt être orientée par les **services à assurer** de manière à intégrer, dans une même représentation, les aides proposées par des disciplines comme l'ergonomie, la psychologie, l'automatique, et l'intelligence artificielle.

C'est la classification que nous nous proposons de décrire dans ce chapitre. Nous déclinons d'abord les types d'améliorations, avant de passer en revue les types d'aides classés selon les erreurs humaines qu'elles permettent de réduire. Les aides correspondant aux erreurs d'évaluation feront davantage l'objet de ce chapitre, car elles ont donné lieu à de nombreuses solutions techniques, en l'occurrence le système d'aide au diagnostic DIAPASON. Les aides correspondant aux aspects adaptation et anticipation de l'activité de l'opérateur sont encore peu explorées. Nous envisagerons tout de même d'en tracer les contours.

Les processus industriels à haut niveau de sûreté sont le champ privilégié d'application des aides à l'opérateur, c'est pourquoi la plupart des exemples d'applications cités dans ce chapitre en sont issus.

II.2 RELATIONS ENTRE ERREURS ET AIDES INFORMATISÉES

Les dimensions humaines de l'activité et la typologie des erreurs décrites au chapitre I sont le cadre que nous utilisons pour porter un regard synthétique et structuré sur les **améliorations** et les **aides à l'opérateur**.

Les **erreurs d'exécution** peuvent avoir des causes multiples, par exemple le non respect de certaines règles de conduite, auquel cas des mesures visant à supprimer les **mauvaises habitudes** doivent être envisagées. Ces erreurs peuvent également être dues à la **mauvaise sélection ou réalisation** d'une procédure. Une solution consiste à proposer à l'opérateur des **guides d'application de procédures** en situation normale et surtout incidentelle.

Les **erreurs d'évaluation** pourraient être réduites par des aides destinées à améliorer la représentation du processus et la perception de sa dynamique. Cela consiste à fournir une information compatible avec les modes de représentation et de raisonnement par des opérateurs. Il s'agit notamment :

- de concevoir une véritable **interface homme-machine** de supervision, de manière à présenter à l'opérateur une information pertinente par rapport à la situation et adaptée à ses modes de raisonnement,
- de permettre à l'opérateur d'évaluer rapidement une situation et de l'aider à diagnostiquer les dysfonctionnements, c'est-à-dire fournir une **aide au diagnostic**.

Les **erreurs d'intégration** révèlent des écarts entre les adaptations apportées par l'équipe concernant la marche du système, et les contraintes temporelles de production. Une **amélioration** consisterait à proposer aux opérateurs les moyens de s'adapter aux événements du processus et aux changements de mode de fonctionnement. Un type d'aide envisagé, que nous appelons **aide à l'adaptation**, consiste à proposer aux opérateurs de l'information sur la marche à suivre, c'est-à-dire du **conseil**.

Les **erreurs de planification** pourraient être levées en fournissant à l'opérateur les moyens de décider d'une intervention dans les délais imposés par la situation. Il semble que les aides correspondantes sont celles qui permettraient de fournir des **stratégies de conduite**, basées sur le diagnostic de la situation. Ces aides seront dites **aides à l'anticipation**. Ce type d'aide diffère notamment de l'aide à l'adaptation par le fait qu'une stratégie implique, de la part du système, qu'il soit capable d'évaluer une situation en regard des objectifs de production et des contraintes d'exploitation.

Les **erreurs de coordination** peuvent être dues à des problèmes de communication, de répartition des rôles et des tâches, ou à des problèmes d'ordre relationnels, elles concernent de toute façon la dimension collective du travail. Les améliorations envisageables sont d'augmenter la résolution collective de problème, de négocier les conflits, et d'instaurer des relations de confiance entre agents. Le comportement collectif des opérateurs pourrait être assisté par des systèmes favorisant une **meilleure circulation des informations et une meilleure répartition des tâches**. Ces aides sont nommées **aide au travail collectif**.

La classification des améliorations est décrite dans le tableau II.1 ; des exemples d'améliorations sont proposés relativement aux dimensions et erreurs humaines.

Dimensions	Typologie et origine des erreurs	Améliorations	Aides informatisées
collective	Erreurs de coordination	Améliorer la résolution collective de problème Négocier les conflits Fournir un résumé du dernier poste pour la nouvelle équipe postée Répartir les tâches entre les agents Renforcer le réseau conversationnel	<u>Aide au travail collectif</u>
cognitive	Erreurs de planification	Améliorer la connaissance des opérateurs des contraintes fixes et des zones de flexibilité Faciliter la réalisation des plans d'action Fournir des prédictions concernant les effets et conséquences des événements et actions (anticipation des effets de plans d'action)	<u>Aide à l'anticipation</u>
	Erreurs d'intégration	Conseiller l'opérateur de sorte à faire coïncider mode causal et mode logique	<u>Aide à l'adaptation</u>
	Erreurs d'évaluation	Alerter l'opérateur d'une dérive, un changement avant que les alarmes ne se déclenchent Améliorer la perception, la représentation de l'état temporel du processus Fournir la possibilité de naviguer à travers plusieurs représentations temporelles	<u>Aide au diagnostic</u> <u>Aide à la représentation mentale</u>
opératoire	Erreurs d'exécution	Faciliter l'exécution de commandes via l'écran de contrôle Eliminer les comportements non sûrs Guider l'application des modes opératoires	<u>Aide à l'application des procédures</u>

Tableau II.1 : Erreurs humaines, améliorations envisageables et aides informatisées.

Les aides qui viennent d'être déclinées sont passées en revue dans l'ordre suivant : dimension opératoire, dimension cognitive puis dimension collective. Nous avons choisi de conserver le découpage selon les erreurs, de manière à rester homogène avec le chapitre précédent.

II.3 ERREURS D'EXÉCUTION

Les erreurs d'exécution intéressent spécifiquement la dimension opératoire de l'activité d'un opérateur. Les améliorations envisageables pour contrebalancer ce type d'erreurs sont, par exemple, d'éliminer les comportements non sûrs, de guider l'application des modes opératoires, et de faciliter l'exécution de commandes via l'écran de contrôle. La solution classique consiste à analyser les comportements de l'opérateur pour déceler ceux qui relèvent de comportements non sûrs et à envisager des solutions pour empêcher que ces comportements ne deviennent des habitudes [MILL 92]. Il existe, par ailleurs, des systèmes informatisés qui fournissent une aide à l'exécution de procédures, ce sont eux que nous décrirons ici.

En nous restreignant aux tâches effectuées sur un écran de contrôle, les améliorations peuvent porter sur les **interactions homme-ordinateur**, c'est-à-dire sur les moyens de mieux informer l'opérateur tout le long de l'exécution de ses tâches procédurales. Ce type d'aide est d'autant plus important que l'installation supervisée est complexe et exige un haut niveau de sûreté, comme les centrales nucléaires, pour lesquelles les opérateurs sont tenus d'appliquer les procédures établies, c'est-à-dire d'adopter une **approche par états**. Celle-ci consiste à mettre l'accent sur la gestion des situations incidentielles : à une situation donnée doit correspondre sa procédure de récupération. Des efforts importants sont faits pour prévoir les différentes situations de panne et fournir aux opérateurs une procédure standard pour y répondre. La demande en systèmes d'aide est alors tournée vers la **gestion informatisée des situations incidentielles**, afin de faciliter la recherche des procédures de récupération les plus appropriées. L'aide à la dimension opératoire est basée sur la prévision des pannes et les moyens que les opérateurs devront mettre en œuvre pour éviter qu'elles ne s'étendent à l'ensemble du système¹.

Ces procédures correspondent chacune à une situation déterminée et une "conduite à tenir" de la part des opérateurs ; elles peuvent constituer une base d'informations très importante, c'est pourquoi une aide informatisée est utile car elle doit permettre à l'opérateur d'accéder rapidement aux informations requises par la situation.

Dans le cadre de la réalisation des tâches à caractère fortement opératoire, Norman propose de découper la réalisation d'une tâche en quatre étapes successives [NORMA 84] : la **formation d'une intention**, la **sélection d'actions à effectuer** (méthode à employer et sélection du type de commande), la **réalisation** et la **validation**. A notre connaissance, la formation d'une intention et la validation ne sont pas des directions de recherche très développées pour entrevoir des outils en salle de conduite, contrairement aux étapes de sélection et de réalisation, qui ont donné lieu à des outils que nous décrivons brièvement ici.

II.3.1. Aide à la sélection

L'aide à la sélection peut être abordée sous l'angle d'outils de conservation de la mémoire des actions possibles en fonction du contexte, c'est-à-dire des systèmes capables de proposer à l'opérateur des moyens de recherche efficace de l'information.

¹ Pour accroître la somme d'incidents auxquels les opérateurs pourraient être confrontés, le projet IRS (Incident Reporting System) de l'Agence Européenne de l'Energie Atomique (AIEA) vise, depuis les années 80, à proposer aux partenaires européens les moyens de constituer et de consulter une base de connaissances commune faite des enseignements tirés par les exploitants des divers pays [TOLSTY 94]. A l'heure actuelle, plus de deux mille incidents ont été répertoriés.

Cela revient à offrir aux opérateurs un moyen de recherche efficace et sûr des modes opératoires à mettre en application pour les situations qu'ils auront préalablement diagnostiquées. Plusieurs intérêts sont associés à ce type d'aide : **rapidité de la recherche des informations, diminution du stress** quand il s'agit de répondre à une situation que l'opérateur ne maîtrise pas bien, **diminution des erreurs** liées à la recherche des procédures à mettre en œuvre dans des situations non familières.

Un exemple d'application est l'approche de conception d'interfaces orientées procédures OFM (Operator Function Model) [MITCH 86]. Cette approche est fondée sur l'organisation en niveaux de mise en œuvre : buts à atteindre, sous-buts, tâches à accomplir et procédures. L'approche OFM conduit à décrire un arbre d'actions à effectuer par l'opérateur et dont la racine est le but global (la mission), et les feuilles l'ensemble des procédures pouvant être invoquées en fonction du contexte. Une démarche OFM permet donc d'organiser et de représenter les procédures de routine et de sécurité (on trouvera une analyse comparée de cette approche dans [VICEN 92]).

Un autre exemple d'application est l'outil COGEMO, actuellement mis en œuvre dans les salles de conduite de la société COGEMA. Cet outil est un système logiciel de gestion automatisée des procédures qui regroupe l'ensemble des modes opératoires afin de faciliter la recherche des procédures de récupération sur détection d'anomalies. Le système est activé sur requête de l'opérateur, qui a préalablement identifié le défaut.

II.3.2. Aide à la réalisation

L'**aide à la réalisation** permet d'assister l'opérateur en suivant, pas à pas, l'exécution des procédures et en vérifiant que chacune des étapes est correctement effectuée. Ce type d'aide suppose un niveau de dialogue supérieur à l'aide à la sélection puisque l'opérateur doit informer le système dès qu'une étape est achevée.

Dans le domaine du nucléaire, Green et al. définissent les spécifications générales que devrait remplir une interface de présentation et de suivi d'exécution de procédures d'urgence [GREEN 94] :

- (1) **navigation** à travers la base pour faciliter la recherche des procédures à appliquer,
- (2) **présentation des procédures** selon un format déterminé,
- (3) **suivi de réalisation des procédures** en-cours, qui permet de conserver une trace au fur et à mesure du déroulement de la procédure sous forme d'un marquage sur l'écran de contrôle de chaque étape réalisée ; cela permet de gérer les interruptions et d'en faciliter la reprise,
- (4) **proposition d'informations** relatives à chaque étape de la procédure,
- (5) **affichage des valeurs réelles** des paramètres de fonctionnement à surveiller pendant l'exécution d'actions, pour comparer avec celles qui ont été définies dans les procédures,
- (6) **adaptation de procédures** en fonction de la situation courante.

Nous ne connaissons pas de système qui remplisse l'ensemble de ces critères, toutefois, EDF et le CEA ont mené un projet commun qui a abouti à la réalisation d'un système capable de gérer des procédures opératoires, que l'opérateur peut activer dans le cas d'une situation accidentelle [LE BOT 90]. Le système propose et vérifie les choix de l'opérateur et présente, pas à pas, les actions que ce dernier devra réaliser. Ce système a d'ailleurs été testé en grandeur réelle.

La plupart des projets évoqués jusqu'ici sont, pour les systèmes les plus avancés, à l'état de prototypes. Si les processus à haut niveau de sûreté en sont les premiers secteurs d'application visés, il est tout à fait envisageable de généraliser l'aide à l'exécution à l'ensemble des autres processus industriels. Cependant, une difficulté importante à sa mise en œuvre dans des secteurs industriels moins sensibles que le nucléaire, sera de démarrer et surtout de poursuivre une politique de recueil des informations concernant le fonctionnement du processus, le recueil des incidents, même mineurs,

l'analyse de leurs causes et les moyens mis en œuvre pour y remédier. En effet, il semble peu probable qu'une base documentaire rassemblant l'ensemble des situations (normales, incidentielles ou accidentielles) avec la conduite à tenir pour chacune d'elles, soit déjà existante. Notons que cet aspect recueil de connaissances fait l'objet du chapitre IV.

II.4 ERREURS D'ÉVALUATION

Les erreurs d'évaluation constituent le premier type d'aide de la dimension cognitive. Elles ont pour causes une carence ergonomique au niveau des systèmes d'information en salle de conduite, ou une mauvaise évaluation des risques de la part de l'opérateur. Les améliorations envisageables sont par exemple la proposition d'une information débarrassée des informations non pertinentes, l'amélioration de la perception temporelle de l'état du processus, et la détection des dysfonctionnements afin de permettre à l'opérateur d'intervenir sur le processus de manière précoce et "sans-à-coup", de préférence avant que les alarmes du système de contrôle-commande n'entrent en action, et que les systèmes de sécurité ne soient activés.

Nous avons recensé deux solutions complémentaires pour éviter l'apparition de ce type d'erreur : l'aide à la représentation mentale, et l'aide au diagnostic.

II.4.1. Aide à la représentation mentale

L'aide à la représentation mentale a pour objectif de fournir à l'opérateur les moyens de mieux suivre les évolutions du processus par une représentation adaptée de l'état du processus et la manière dont celui-ci évolue. Ce type d'aide intéresse directement l'imagerie présentée aux opérateurs par les interfaces homme-machine. A ce titre, il faut prendre soin de distinguer les concepts d'interface homme-ordinateur IHO (HCI pour human computer interface) et d'interface homme-machine IHM (MMI pour man machine interface). Pour l'IHO, on s'intéresse aux interactions opérateur et ordinateur au travers d'une boucle d'action du type : perception -> action. GOMS est le modèle d'interaction le plus célèbre [CARD 83] (d'autres exemples de modèles sont décris dans l'article de synthèse de [HAAN 91]). Une interface homme-machine est l'ensemble des éléments "visibles" d'un système informatique qui intéressent directement l'opérateur dans le cadre de son travail ; elle porte sur la représentation du processus dans un ordinateur, la forme que cette représentation devrait avoir à l'écran pour être correctement perçue, les actions sur le processus et les moyens de leur suivi par l'opérateur. L'IHM intègre donc les aspects interaction entre l'homme et l'ordinateur, que l'on retrouve dans les IHO.

La démarche classique consiste à déterminer la meilleure manière de présenter les informations à l'opérateur. Cette approche bénéficie d'une longue expérience en ergonomie, qui a notamment permis de mettre en évidence des usages, des dispositions, des formes particulières de présentation de l'information que les ergonomes ont figé sous forme de normes et de conventions de conception. Celles-ci concernent :

- les modes de navigation à travers le synoptique du processus, qui peut se matérialiser par la navigation "verticale" selon différents niveaux de détail, et la navigation "horizontale" sur un même niveau au travers des différents groupes d'appareils,
- l'organisation de l'écran, en termes de taille de l'écran, d'organisation spatiale des informations, de format de présentation,
- le codage de l'information sous forme de symboles graphiques, couleurs, contrastes, icônes,
- la densité des informations.

Les recherches actuellement menées dans ce domaine portent essentiellement sur la conception d'interfaces conformes aux **modes de raisonnement** et aux **modes de représentation** des opérateurs. En effet, le rôle de l'opérateur a évolué de la conduite d'appareils à la gestion globale du processus de fabrication ; l'opérateur a pour rôle la supervision du processus industriel à l'aide d'écrans de contrôle, d'indicateurs logiques et analogiques, le tout rassemblé en salle de conduite.

L'opérateur, ayant de moins en moins d'informations directes, devient dépendant des données que lui fournissent les interfaces. Le problème maintenant posé est que les interfaces commercialisées n'ont, quant à elles, pas fondamentalement évolué : dans le principe, ce sont les mêmes interfaces qui servaient à la conduite centralisée qui sont maintenant employées pour la supervision avec quelques fonctionnalités d'animation supplémentaires ; les interfaces sont essentiellement construites autour du synoptique de l'installation. Le rôle de superviseur pose maintenant des problèmes spécifiques : sous quelle forme psychologiquement acceptable décrire la complexité d'un processus ? quelle est la meilleure façon de communiquer l'information à l'opérateur pour éviter les erreurs ?

La complexification des tâches opérateur impose donc de concevoir des interfaces permettant de gérer cette complexité en proposant une représentation aussi proche que possible de la représentation mentale de l'opérateur.

Il est maintenant bien admis qu'une représentation unique sous la forme d'un synoptique ne peut s'adresser à l'ensemble des dimensions de l'activité opérateur. En effet, l'apparition de situations nouvelles et non prévues ne peut jamais être totalement écartée, c'est pourquoi il semble nécessaire de concevoir des interfaces adaptées à ce type de situations. Par exemple, l'interface envisagée dans le cadre du projet ALLIANCE est construite autour de trois vues [TABOR 89] : la **vue synoptique**, la **vue tendance** (pour permettre de juger de l'évolution temporelle d'une variable) et la **vue propagation** (qui fait abstraction de l'installation est qui décrit les liens de causalité entre variables importantes).

Les interfaces que l'on cherche à concevoir ont pour objectif de se rapprocher le plus possible d'une description, somme toute encore hypothétique, de la manière dont l'opérateur se représente et raisonne sur le processus. Deux approches théoriques semblent actuellement se dégager : la théorie **EID** (Ecological Interface Design) [VICEN 92], et la théorie **MFM** (Multilevel Flow Modelling) [LIND 82]. Elles sont nées du besoin de faire face à des processus de plus en plus complexes, c'est-à-dire technologiquement avancés, de grande taille et donc de plus en plus difficiles à maîtriser par les opérateurs.

II.4.1.1. Approche EID

L'approche **EID** est bâtie sur la distinction entre modèle de représentation et modèle de raisonnement [VICEN 92]. Vicente et Rasmussen considèrent qu'une **interface écologique** doit prendre en compte les trois types de comportement suivants [RASMU 83] : **comportement routinier** (SB), **comportement basé sur des règles** (RB), et **comportement intelligent** ou fondé sur les connaissances (KB). Le modèle de raisonnement interprété de Rasmussen est décrit en figure II.1. Rasmussen part de l'hypothèse d'un modèle séquentiel comportant les étapes de raisonnement suivantes : activation, observation, identification, définition des tâches, définition d'une procédure et exécution. Si la situation est routinière (comportement SB), l'opérateur utilise des raccourcis cognitifs de telle sorte qu'il passe de l'étape d'observation à celle d'exécution sans contrôle conscient. Si la situation est connue mais non familière (comportement RB), l'opérateur devra sélectionner la bonne procédure avant de la mettre à exécution. Dans le cas de situations inconnues (comportement KB), l'opérateur devra passer par l'ensemble des étapes de raisonnement.

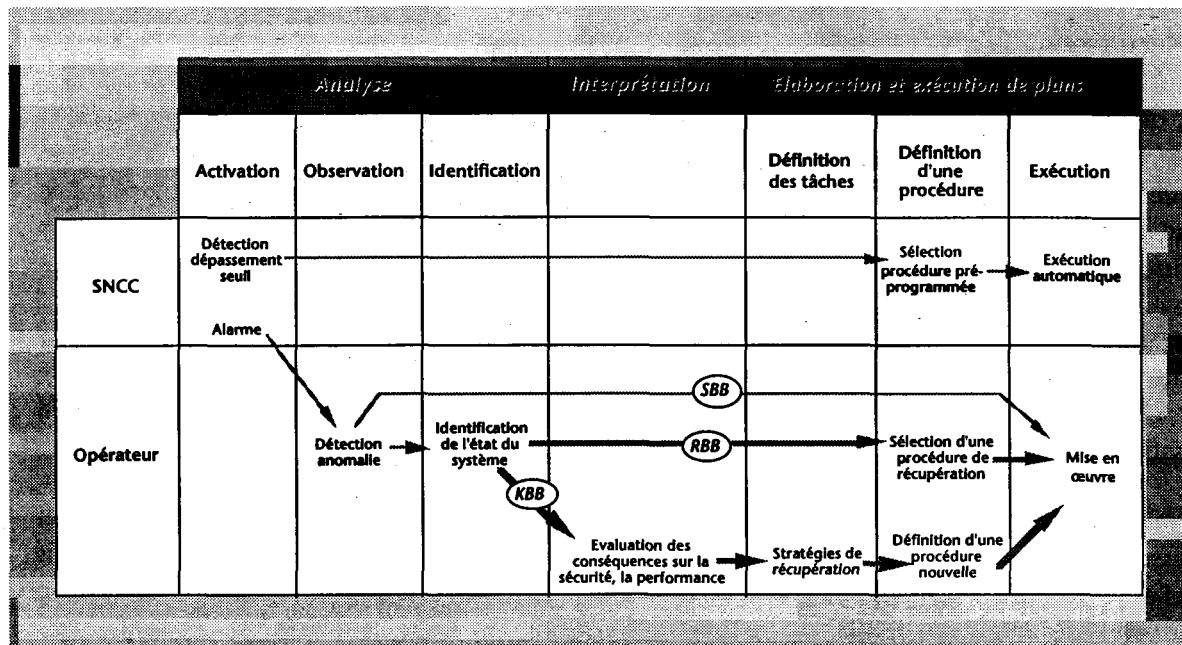


Figure II.1 : Schéma interprété du modèle séquentiel de raisonnement de Rasmussen.

De manière schématique, l'approche EID se décline donc selon trois principes généraux : pour faciliter le comportement SB, l'interface doit permettre à l'opérateur d'intervenir directement sur l'écran, il faut donc que la distance cognitive entre informations et commandes soit la plus courte possible ; pour assister le comportement RB, l'interface doit fournir une image qui associe les contraintes gouvernant le comportement du procédé et les indices visuels et sonores fournis par l'interface ; pour assister le comportement KB, l'interface devrait présenter le procédé selon différents niveaux d'abstraction. Une hiérarchie de modèles d'abstraction est décrite en partant des modèles de l'installation pour aboutir à des modèles de plus en plus généraux :

- le premier type de modèle décrit l'anatomie du système, c'est-à-dire la manière dont est physiquement perçue l'installation,
- un modèle structuro-fonctionnel décrit un découpage fonctionnel de l'installation, c'est-à-dire qu'à chaque appareil est associée au moins une fonction qu'il réalise,
- un modèle décrivant les fonctions génériques fait abstraction des appareils et décrit spécifiquement les grandes fonctions du système, c'est-à-dire une "boucle de régulation" ou un "circuit de refroidissement". L'installation est alors perçue au travers des fonctions principales qu'elle assure,
- un modèle de fonctions abstraites décrit le fonctionnement souhaité du système sous forme de processus de transformation de matière, d'énergie ou d'information, en d'autres termes les services attendus,
- un modèle décrit les objectifs du système de production. Il correspond pour l'ingénieur aux caractéristiques du produit attendu, et se traduisent en termes de spécifications quantitatives et qualitatives de production, de performance ainsi qu'en termes de spécifications de sûreté.

Cette hiérarchie d'abstraction décrit la nature de connaissances associées à chacun des niveaux d'abstraction. Liberté est laissée au concepteur de l'interface de choisir la manière de modéliser ces connaissances (se reporter en annexe I pour une description plus fine du contenu des différents niveaux d'abstraction).

L'approche EID implique l'élaboration d'interfaces comportant cette hiérarchie de modèles d'abstraction. Dans la pratique, une telle interface apparaît alors particulièrement délicate à

concevoir, sachant qu'il y a cinq niveaux d'abstraction à construire et qu'à chacun d'eux correspond un modèle organisé en niveaux de raffinement. Cela suppose d'avoir préalablement rassemblé un grand nombre de connaissances, et c'est une limite importante à la mise en œuvre de cette approche [VICEN 92].

L'intérêt pratique de cette approche a été évalué par Frey et Rouse, qui ont expérimenté l'approche EID pour des tâches de maintenance dans le domaine de l'aviation, et dont les conclusions font ressortir que [FREY 92] : pendant la résolution de problème, le choix du modèle d'abstraction dépend à la fois de l'expérience des sujets mais également du type de tâche à réaliser ; le choix du niveau de raffinement dépend de l'état d'avancement de la tâche (en début de tâche, les niveaux supérieurs de raffinement sont les plus utilisés, alors qu'une fois l'action engagée, l'opérateur se concentre sur les niveaux les plus bas) ; et enfin, les sujets ont montré une apparente préférence pour des formats nouveaux d'imagerie, probablement parce que ceux-ci étaient mieux adaptés aux tâches à réaliser que les formats classiques d'imagerie.

II.4.1.2. Approche MFM

L'approche MFM a été initialement proposée par Lind pour faciliter la supervision par les opérateurs de conduite. Elle est basée sur l'utilisation de règles de représentation du processus qui privilégie la description des lois de conservation de masse et d'énergie, et qui décrit un processus industriel en termes de **but** (la raison pour laquelle le système a été conçu), de fonctions (les moyens d'atteindre les buts) et de ressources (les composants physiques impliqués) [LIND 82, 89a]. Cette approche est fondée sur la conviction qu'une interface qui renseigne sur les buts à atteindre et les fonctions remplies par les appareils qui composent le processus, est très utile à l'opérateur dans une tâche de diagnostic. La modélisation se fait ainsi selon deux axes : modélisation selon plusieurs niveaux d'abstraction (moyens/objectifs), et modélisation en largeur (tout/partie).

La représentation MFM est une traduction du schéma de procédé auquel est ajoutée de l'information concernant les fonctions remplies et les buts à atteindre. Lind introduit également la notion de **hiérarchie de but**, qui revient à structurer la représentation sous forme de niveaux de mise en œuvre. Cela se traduit par la description de buts et de sous-buts, chacun réalisé par une combinaison particulière de fonctions.

Les concepts MFM utilisés pour la représentation d'un processus sont principalement :

- les **but**s de production, de sûreté et de performance (schématisés par un cercle),
- les **fonctions** de stockage, transport, source, puits, barrière,
- les **liens**
 - * de **réalisation** "fonction -> but", qui indiquent les liens entre fonctions mises en jeu et les buts auxquels elles participent,
 - * de **dépendance conditionnelle** "but -> fonction", qui traduisent l'idée selon laquelle l'atteinte d'un but conditionne la disponibilité d'une fonction,
 - * et de **mise en œuvre** "fonction -> composant" qui précisent le support physique d'une fonction donnée.

Les objets graphiques sont décrits en figure II.2, ils correspondent aux objets de l'approche MFM telle que proposée en 1982 et qui a été quelque peu enrichie .

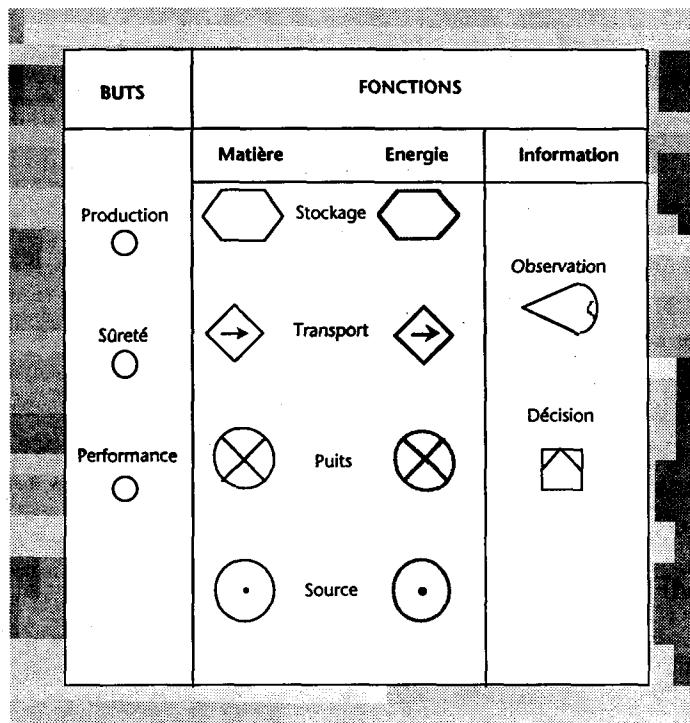


Figure II.2 : Les outils de description de Lind.

La représentation MFM facilite le raisonnement de l'opérateur en ce qu'elle explicite les dépendances entre fonctions, buts et appareils. De cette façon, dans le cas où une fonction n'est plus assurée, l'interface doit permettre de déduire directement sur l'interface quels sont les objectifs qui peuvent être remis en cause et quelles peuvent en être les causes. Elle permet donc de constituer une interface de diagnostic de dysfonctionnements.

Les applications de l'approche MFM sont multiples : Kaarela et Oksanen utilisent l'approche MFM pour présenter des informations ayant trait à la sûreté de fonctionnement en direction des opérateurs de conduite [KAARE 94] ; Olesson et al. ont utilisé MFM comme description intermédiaire du processus avant réalisation effective de l'interface homme-machine de supervision [OLSSON 94] ; Larsson utilise le formalisme MFM comme support de description du processus pour concevoir un système de diagnostic utilisant cette description comme base de connaissances et comme interface homme-machine devant expliquer les raisonnements du système [LARSS 94].

II.4.1.3. Conclusion

EID est une architecture conceptuelle d'interface écologique, qui organise les informations utiles à l'opérateur selon cinq niveaux d'abstraction, chacun représentant un point de vue d'un seul et même processus, et chacun pouvant être décomposé en différents niveaux de détail. **MFM** est une approche de modélisation qui propose un formalisme et des outils de description, et à l'intérieur de laquelle on retrouve les concepts de niveaux d'abstraction et de raffinement. Elle n'est pas une approche dédiée à la réalisation d'interfaces, mais elle pourrait être employée dans le cadre de la conception d'une interface écologique conforme aux principes d'EID. **MFM** et **EID** sont donc des approches qui peuvent s'envisager de façon complémentaire.

En ce qui concerne l'approche **EID**, il semble très intéressant de disposer de plusieurs représentations du même processus industriel, de manière à permettre à l'opérateur de choisir la représentation la mieux adaptée à ses préoccupations en termes de tâches ou d'activités. Nous ne connaissons pas d'interface homme-machine conçue sur cette approche théorique et utilisée en ligne mais il nous

semble que les principes qu'elle recèle sont très prometteurs et pourraient, dans un futur proche, donner lieu à des interfaces exploitables par les opérateurs.

Pour tempérer notre discours, il est important de noter que l'approche multi-modèles, dans une interface homme-machine, est encore trop peu étudiée et expérimentée sur cas réel pour que des enseignements généraux puissent être tirés quant à l'efficacité de telles solutions et surtout quant aux caractéristiques que devront avoir les futures interfaces. Il est certain qu'elles influeront sur l'opérateur (c'est l'objectif), mais il reste à déterminer l'impact exact de ces aides sur l'opérateur, et sur la fiabilité et la disponibilité du processus. En fait, et comme pour les autres types d'aides déjà évoqués ou à venir, l'introduction de tels systèmes innovants en salle de conduite est à considérer avec d'infinites précautions car cela suppose, de la part des opérateurs, de modifier profondément leurs modes de pensée.

II.4.2. Aide au diagnostic

Le diagnostic est le processus par lequel on cherche à déterminer les anomalies en utilisant des connaissances concernant la structure, les comportements ou les fonctions à partir de **symptômes observés**, qui prennent la forme d'un écart par rapport à une **référence**. Il est généralement défini comme l'action de **déetecter** un état anormal, de le **qualifier** et d'en **trouver** l'origine.

L'intérêt de cette fonctionnalité est la possibilité de faire face à un dysfonctionnement dès son apparition, c'est-à-dire favoriser une conduite sans-à-coup. Les conditions auxquelles sont soumis les opérateurs font que les systèmes de diagnostic doivent fonctionner en intégrant, dans leurs traitements, la notion du temps. Nous ne traiterons pas du cas des systèmes de diagnostic qui n'entrent pas dans ce cadre, car ils s'adressent davantage aux équipes de maintenance, pour laquelle les contraintes temporelles ne se posent pas de manière aussi pressante que pour les opérateurs de conduite.

Parmi les diverses aides qui ont jusqu'ici été conçues, l'aide au diagnostic est certainement la plus particulièrement investiguée et constitue, à elle seule, un domaine de recherche extrêmement vaste où les sciences de l'ingénieur sont toutes représentées. Cependant, la mise en application industrielle de ces aides s'avère particulièrement délicate car elle fait nécessairement intervenir un processus complexe de traitement des données et il n'existe pas de règle de conception. Jusqu'à présent, peu d'applications en vraie grandeur ont été réalisées, ce qui explique le manque d'expérience dans ce type de projets. Un des freins à la multiplication de ces projets est liée au **choix des techniques** qui relève davantage d'un **savoir-faire** acquis par les équipes de recherche que d'une **norme de conception**, d'ailleurs encore à définir.

Notre objectif sera donc d'essayer de dégager les invariants les plus importants à partir desquels il devrait être plus aisés de démarrer une réflexion quant aux choix des techniques les plus appropriées. Nous verrons, par ailleurs, comment les étapes habituellement considérées dans la communauté diagnostic peuvent être décomposées en **tâches élémentaires**, et en quoi cela est intéressant pour le concepteur.

II.4.2.1. Les approches du diagnostic

Les approches du diagnostic ont jusqu'ici été considérées à travers une vision dichotomique :

- approche de diagnostic utilisant des **connaissances² profondes** par opposition à une approche utilisant des **connaissances de surface** (Chandrasekaran parle, quant à lui, de connaissances compilées [CHANDR 88]),
- **diagnostic abductif** (ou diagnostic par classification heuristique [CLANC 85]) par opposition à **diagnostic basé sur la cohérence** (consistency-based diagnosis) [POOLE 89],
- approche par **modèle de mauvais fonctionnement** par opposition à **approche par modèle de bon fonctionnement** [MORIZ 91] [CHAT 93].

Cette opposition traduit, en réalité, deux conceptions du diagnostic, en fait deux **paradigmes** qui requièrent des connaissances différentes du monde et des modalités de raisonnement spécifiques [POOLE 89].

II.4.2.1.1. Les paradigmes du diagnostic

L'opposition entre **connaissances profondes** et **connaissances de surface** met l'accent sur une **source de connaissances**, en l'occurrence l'**ingénieur** qui a un certain degré de compréhension du processus et dont les connaissances s'expriment en termes de **lois de comportement** plus ou moins générales, par opposition à l'**expert** dont les connaissances relèvent davantage de **connaissances compilées** qui se rapportent à un savoir-faire ou à un savoir.

L'opposition entre **diagnostic abductif** et **diagnostic basé sur la cohérence** porte sur les **modalités de traitement de l'information** : le raisonnement abductif part des connaissances des défauts et de leurs symptômes afin de rendre compte d'observations anormales ; le second mode de raisonnement part d'un comportement de référence connu (le comportement normal) et cherche à expliquer la raison de la non conformité constatée.

L'opposition entre approche de diagnostic par **modèle de mauvais fonctionnement** et approche par **modèle de bon fonctionnement** met l'accent sur la **nature des connaissances** exploitées : d'un côté, le système de diagnostic exploite des connaissances ayant trait aux dysfonctionnements du processus (il s'agit de reconnaître un dysfonctionnement parmi un ensemble de dysfonctionnements répertoriés), et de l'autre le système exploite les connaissances ayant trait à son fonctionnement normal (il s'agit de reconnaître un écart par rapport au fonctionnement normal).

En fait, ce sont trois manières de décrire la même opposition entre méthodes de diagnostic (figure II.3).

² Se référer au chapitre IV pour une définition.

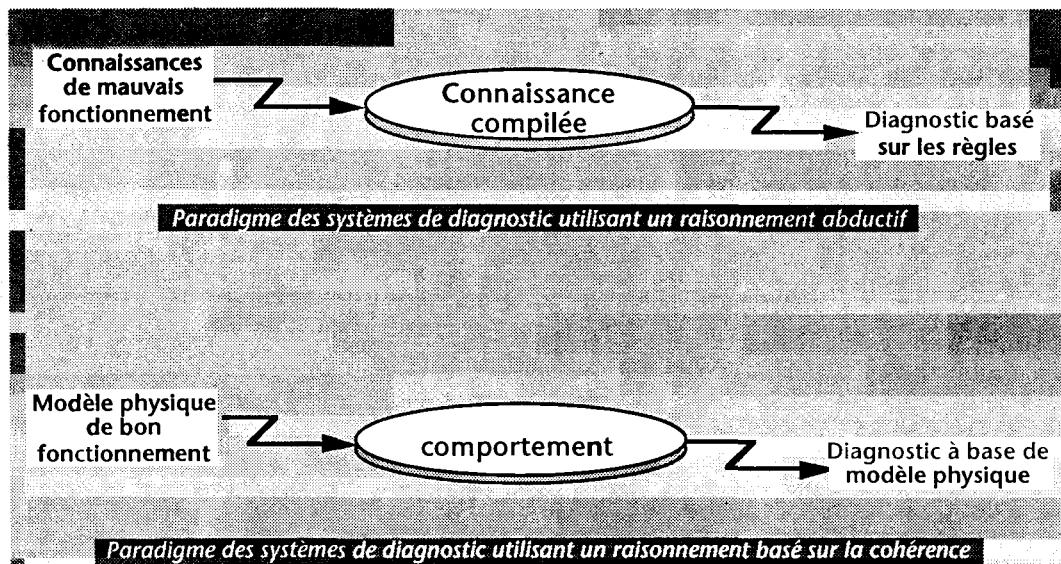


Figure II.3 : Une schématisation des deux paradigmes de diagnostic.

A notre sens, en se basant sur la dichotomie abductif-cohérence employée par Poole, on constate que la mise en œuvre d'un processus abductif suppose d'avoir répertorié les connaissances de mauvais fonctionnement et leurs symptômes (indices, ou encore modes de défaillance) associés, il est alors légitime de dire que le diagnostic se fait par modèle de mauvais fonctionnement. Par ailleurs, la grande majorité des systèmes de diagnostic utilisant des connaissances de mauvais fonctionnement exploitent des connaissances de surface, car il faudrait, dans le cas contraire, construire autant de modèles qu'il y a d'états de défauts ; c'est une approche très peu pratiquée car on dispose de très peu de données sur le comportement d'un système en mauvais fonctionnement. De la même manière, un processus basé sur la cohérence a pour objectif de mettre en évidence le dysfonctionnement du processus dont le fonctionnement normal a pu être décrit à travers un modèle de connaissances profondes.

Certains auteurs, par exemple Leitch et Gallanti, opposent **diagnostic par classification heuristique** et **diagnostic par modèle** [LEITC 92]. Cependant, cette distinction manque de précision ou peut être source de confusions, car les connaissances compilées, même décrites par un ensemble de règles de production, peuvent être traduites sous forme de modèles [CLANC 86]. C'est pourquoi une telle dichotomie n'est pas pertinente, car elle semble mettre l'accent sur la forme des connaissances employées par ces systèmes. Il vaut donc mieux, dans ce cas, parler d'approche heuristique et d'approche par modèle profond.

II.4.2.1.2. Utilisation conjointe des deux paradigmes

La limite souvent évoquée pour l'approche par abduction est la suivante : la base de connaissances des systèmes bâtis sur cette approche ne peut être exhaustive, ne serait-ce que parce que toutes les situations n'ont pas été expérimentées (le processus est un système dynamique complexe au niveau duquel des comportements nouveaux peuvent apparaître). Un tel système est donc capable de fournir rapidement un résultat, mais ne peut gérer que les situations déjà vécues. D'un autre côté, les systèmes de diagnostic basés sur la cohérence mettent en œuvre des processus de traitement plus sophistiqués, donc demandant plus de temps avant de produire un diagnostic, puisqu'ils procèdent par éliminations successives (le raisonnement est, en règle générale, itératif). Ces systèmes sont intéressants pour diagnostiquer des situations non encore vécues mais demandent des temps de traitement plus longs que pour l'approche par abduction.

La solution généralement adoptée consiste donc à envisager l'utilisation conjointe des deux approches [MILNE 87] [POOLE 89]. L'utilisation conjointe d'un système de diagnostic abductif et d'un système basé sur la cohérence tient principalement au caractère fondamentalement complémentaire des connaissances manipulées par chacun des deux systèmes : le raisonnement basé sur la cohérence utilise des modèles de bon fonctionnement, qui impliquent des connaissances sur les variables et les paramètres de fonctionnement du processus, tandis que le diagnostic abductif utilise des connaissances compilées sous forme de règles ; ces règles associent une défaillance matérielle à son symptôme. Le système de diagnostic résultant de ces deux types de systèmes peut utiliser le raisonnement basé sur la cohérence pour détecter un mauvais fonctionnement et le raisonnement abductif pour associer le mauvais fonctionnement à une défaillance physique (se reporter à l'exemple du système DIAPASON, décrit plus loin, qui fonctionne sur ce principe).

II.4.2.1.3. Généralisation

Il est clair que ces deux formes de diagnostic sont très générales, et qu'un découpage plus fin est préférable. Davis décrit une procédure de diagnostic basée sur l'utilisation de connaissances sur la structure et le comportement d'un circuit électronique [DAVIS 84]. La structure du circuit est la manière dont sont interconnectés les composants ; le comportement représente les lois qui régissent les changements d'états logiques des sorties de chaque composant en fonction de ses entrées. Le système utilise conjointement ces deux types de connaissances : partant des symptômes qui traduisent un comportement anormal, il s'agit de trouver les anomalies structurelles responsables de ces symptômes, c'est-à-dire soupçonner certains composants d'être défaillants.

Sembugamoorthy et Chandrasekaran ont été également parmi les premiers à proposer d'intégrer, dans un même système de diagnostic, des connaissances de différents niveaux d'abstraction [SEMBU 86]. Les auteurs proposent, en effet, de considérer chaque composant d'un système selon quatre niveaux d'abstraction : la structure, les services remplis (function), les connaissances à caractère générique (generic knowledge), c'est-à-dire les lois qui décrivent le comportement normal du composant, et les hypothèses de fonctionnement élaborées par l'expert et mises sous forme de règles (assumptions). L'objectif est alors de concevoir un système de diagnostic capable de raisonner sur plusieurs niveaux d'abstraction.

Le type de diagnostic employé doit être le fruit de choix qui dépendent des connaissances disponibles, certes, mais également du résultat que l'on cherche à obtenir. C'est l'idée que défend Milne [MILNE 87] : la stratégie de diagnostic qui semble la plus séduisante consiste à concevoir le système en fonction des connaissances que l'on a au départ, et à le faire évoluer en ajoutant une couche de traitement supplémentaire capable de "raisonner" avec des connaissances d'un autre niveau d'abstraction. La figure II.4 est inspirée et adaptée de la description proposée par Milne, qui indique qu'un diagnostic peut être entrepris à partir de la topologie du processus, d'un modèle de comportement, d'un modèle téléologique ou encore de règles expertes. Le plus important est, semble-t-il, de choisir le type de diagnostic initial, puisque l'évolution ne pourra se faire que dans le sens des niveaux d'abstraction supérieurs, si l'on s'en réfère à l'auteur. A notre sens, affirmer qu'un système utilisant un raisonnement abductif ne peut faire appel à un diagnostic (local ou non) basé sur la cohérence n'est pas fondé, mais il faut bien concéder que la tendance actuelle va dans le sens que décrit Milne : concevoir un système de diagnostic basé sur la cohérence, quitte ensuite à faire appel aux connaissances de niveaux d'abstraction plus élevés pour affiner le diagnostic.

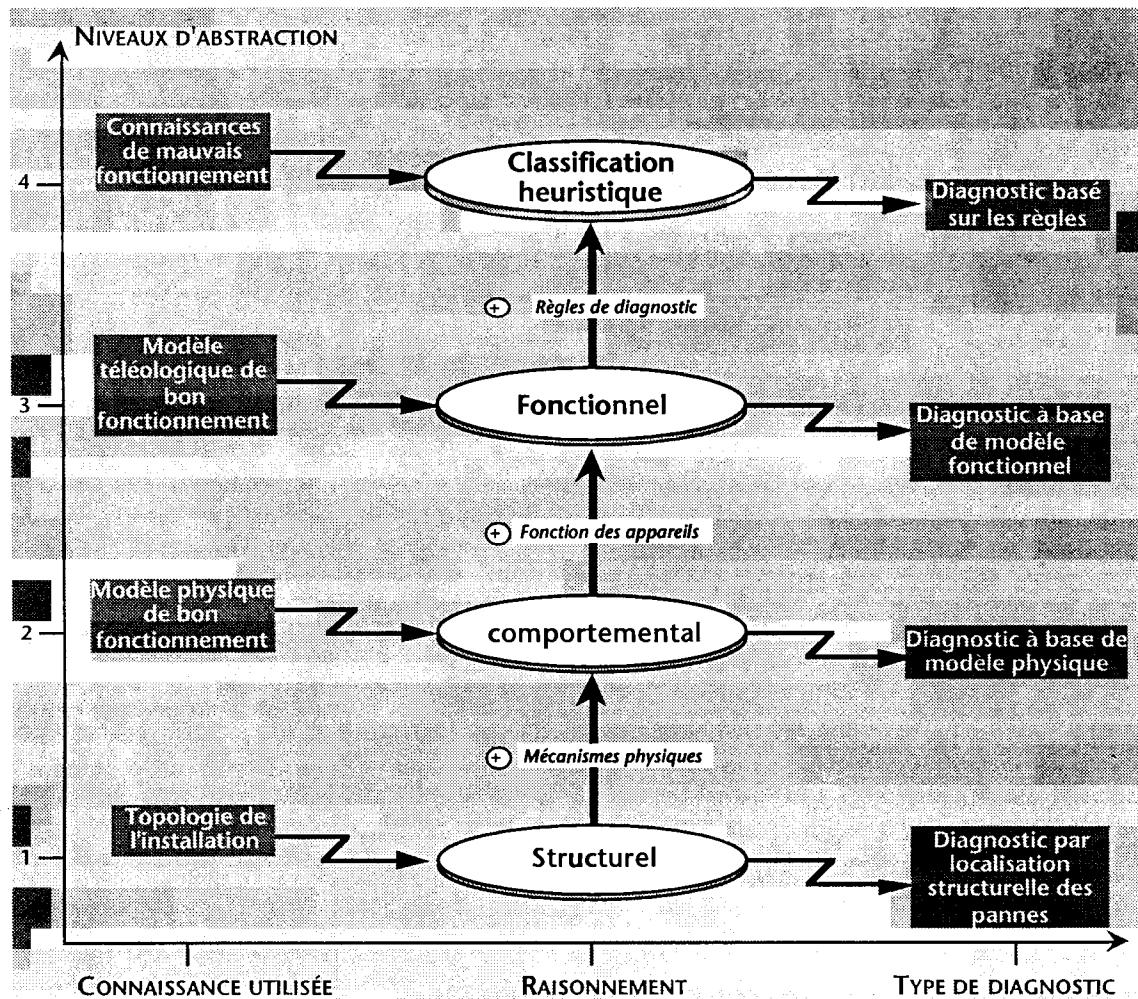


Figure II.4 : Stratégies de diagnostic, selon Milne.

La hiérarchie proposée par Milne est intéressante dans la mesure où elle permet d'envisager les diverses combinaisons possibles entre plusieurs processus de diagnostic, mais placer les connaissances de mauvais fonctionnement au niveau le plus haut de cette hiérarchie d'abstraction est discutable (la hiérarchie d'abstraction pour les trois autres formes de connaissances sont généralement admis ; le lecteur pourra utilement se référer à la hiérarchie d'abstraction de Rasmussen en Annexe I).

II.4.2.2. Une architecture générique

Le diagnostic est une préoccupation commune de l'intelligence artificielle et de l'automatique. Il est intéressant d'analyser la manière dont ces deux disciplines abordent ce thème, dans l'optique de mettre en évidence leurs points de convergence. Nous envisageons ici une description générique du diagnostic qui peut s'appliquer à l'un ou à l'autre paradigme de diagnostic.

II.4.2.2.1. Etapes de diagnostic et tâches primitives

Le diagnostic est un processus complexe qui est généralement décomposé en blocs de traitement des données, quelle que soit la discipline à laquelle on fait référence : en étapes pour l'automatique, et en tâches pour l'intelligence artificielle. Cet aspect est l'objet de ce paragraphe.

En automatique

Le découpage employé pour qualifier les étapes d'un système de diagnostic est le suivant [BRUNE 90] :

- l'étape d'**acquisition de données** du système de contrôle-commande, qui fournit une information préalablement conditionnée et devant constituer un ensemble d'observations tolérant aux bruits de mesure,
- l'étape de **perception** correspond à l'abstraction des données brutes et fournit des indices ou paramètres indicateurs de défauts. Elle correspond à l'étape préliminaire de **génération des résidus** (le résidu est nul en fonctionnement normal, et non nul en fonctionnement dégradé),
- l'étape de **détection de symptômes** d'anomalies permet de décider si le comportement réel du processus est bien en accord avec le comportement attendu,
- l'étape de **localisation/diagnostic** a pour fonction d'attribuer le défaut détecté à un capteur, à un appareil ou un organe de commande et de classer le défaut par type et degré de sévérité. Si l'étape de détection est essentiellement fondée sur un processus décisionnel, l'étape de localisation est, quant à elle, une combinaison de processus de recherche des causes et de processus décisionnels.

Il n'existe pas de norme en la matière, la communauté internationale distingue habituellement deux grandes étapes : la **détection** et la **localisation** de défauts (pour failure detection and isolation) [PATTO 94], la **détection** et le **diagnostic** de défauts (fault detection and fault diagnosis) [ISERM 94].

En intelligence artificielle

L'intelligence artificielle s'intéresse, en réalité depuis ses débuts, au problème du diagnostic : les premiers systèmes ont été des **systèmes experts** médicaux, dont MYCIN est l'archétype [SHORT 76]. Les préoccupations initiales étaient de construire des systèmes capables d'utiliser des **données non plus numériques mais symboliques**, à l'image du raisonnement de l'homme.

Une des motivations fondamentales des travaux actuels (la seconde génération de systèmes experts) est la nécessité de rendre réutilisable tout ou partie des connaissances codées dans le système expert. Les travaux ont alors convergé vers une représentation intermédiaire des connaissances avant leur implémentation sur machine. Il s'agissait, en fait, de décrire la manière dont les connaissances sont utilisées plutôt que la manière dont elles sont implémentées. Ce changement correspond en fait à l'adoption d'une dimension supplémentaire, celle d'**abstraction**, qui introduit un niveau intermédiaire entre les **objectifs** que le système expert est censé atteindre et l'**implémentation**, qui correspond au codage des connaissances et de la stratégie de raisonnement. Dans ce niveau d'**abstraction intermédiaire**, on ne parle plus de **moteur d'inférence** mais de **méthode de résolution de problème** ; les connaissances ne sont plus considérées en termes de **représentations** ou de **symboles** (symbol level) mais en termes de **modèles de connaissances** requis (knowledge level) par la méthode de résolution (pour une synthèse des nouvelles avancées sur le sujet, le lecteur se référera utilement à l'article de Motoda qui effectue une étude bibliographique s'étendant de 1988 à 1991 [MOTOD 94]).

Clancey et Chandrasekaran ont séparément formulé un cadre générique de résolution de problème, fondé l'organisation de noyaux élémentaires de raisonnement : Clancey au travers de sa méthode de **classification heuristique** [CLANC 85], et Chandrasekaran au travers de la notion de **tâche générique** [CHANDR 85, 88].

La méthode de diagnostic par classification heuristique est basée sur l'hypothèse selon laquelle il est possible de découper le processus selon trois noyaux de raisonnement ou **tâches primitives** que sont

(figure II.5) : l'abstraction des données (conversion des données au format adéquat en vue de leur traitement), le recouvrement heuristique (génération des candidats de panne en accord avec les observations), et le raffinement (proposition d'un diagnostic).

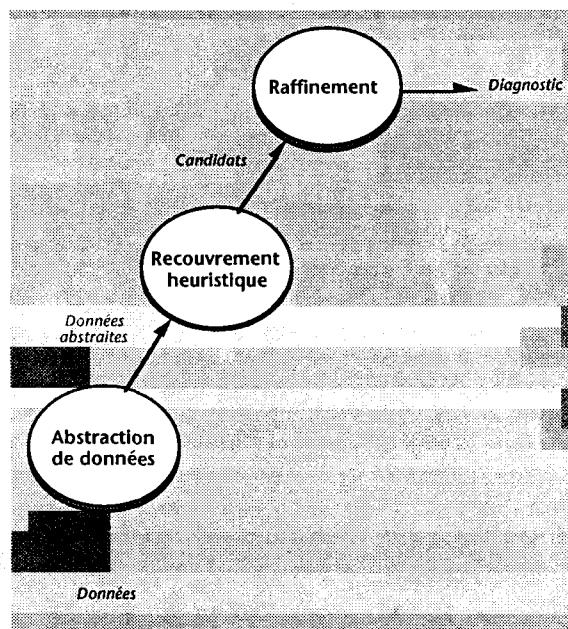


Figure II.5 : Diagnostic par classification heuristique, selon Clancey.

Les travaux de Chandrasekaran ont un caractère plus générique car l'auteur cherche à décrire l'ensemble des méthodes de résolution comme des processus particuliers mettant en œuvre des tâches génériques du type **classification**, **sélection de plan** et **diagnostic**, elles-mêmes décomposables en tâches primitives (building blocks). Chandrasekaran considère que le diagnostic est fondamentalement un processus de classification d'hypothèses de dysfonctionnement mettant en œuvre les quatre tâches primitives suivantes :

- la tâche d'**abstraction des données** (knowledge-directed data abstraction and inference), qui effectue un traitement préliminaire des données observées en informations utilisables par les autres tâches,
- la tâche de **comparaison d'hypothèses** (hypothesis matching), qui fournit un ensemble d'hypothèses de panne,
- la tâche de **classification hiérarchique** (hierarchical classification), qui fournit l'ensemble des hypothèses de panne les plus plausibles,
- la tâche d'**assemblage abductif** (abductive assembly), qui fournit l'hypothèse expliquant le mieux les observations.

La figure II.6 reprend la description de l'organisation des tâches primitives de Chandrasekaran.

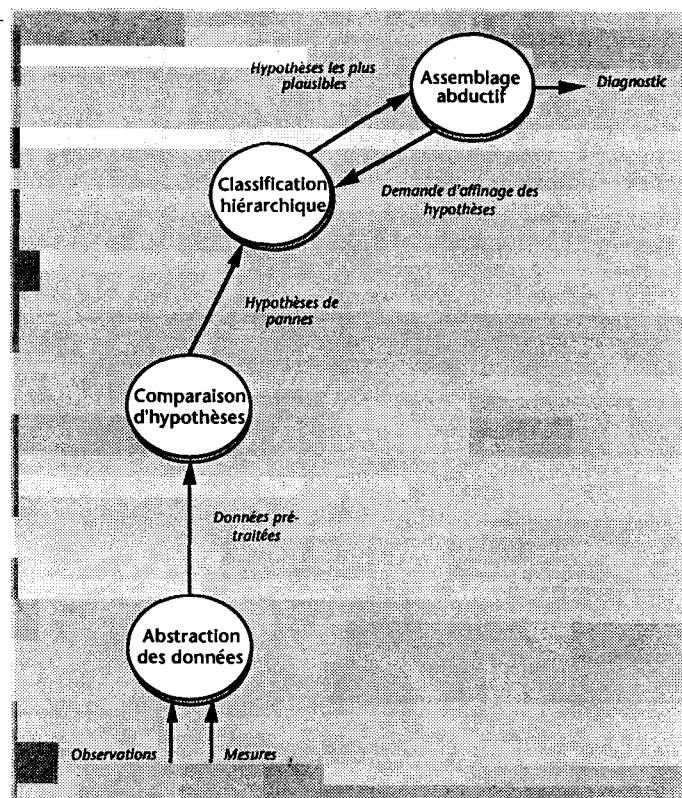


Figure II.6 : Tâche générique de diagnostic par classification heuristique, selon Chandrasekaran.

La méthode de classification heuristique de Clancey est incluse dans la méthode proposée par Chandrasekaran [CHANDR 88]. L'intérêt souligné par Chandrasekaran de cette générnicité est que ces quatre tâches primitives sont **indépendantes de la stratégie de diagnostic** employée et sont susceptibles d'être utilisées dans d'autres tâches. Par ailleurs, un tel découpage offre la possibilité de concevoir des modules informatiques réalisant chacun une tâche primitive.

De ce point de vue, il serait intéressant d'envisager un rapprochement avec les étapes de diagnostic considérées en automatique, de manière à disposer d'une référence commune aux deux disciplines. C'est d'ailleurs l'objet du paragraphe suivant.

Le découpage de Leitch et Gallanti

Sur la base du concept de **tâche primitive** formulée par Clancey et Chandrasekaran, Leitch et Gallanti ont, à leur tour, proposé un découpage plus opérationnel qui tient compte de la dynamique du processus [LEITC 92] :

- la tâche d'**interprétation** est un pré-traitement qui met les données observées sous un format utilisable par les autres tâches,
- la tâche d'**identification** est le processus de recherche de la cause du défaut et a pour charge de fournir des candidats expliquant les observations,
- la tâche de **décision** génère des conclusions ou des hypothèses satisfaisant des contraintes spécifiées,
- la tâche de **prédiction** permet de calculer des états futurs à partir de l'état présent observé.

Les tâches primitives ainsi définies sont combinées pour former l'architecture fonctionnelle d'un système de diagnostic : la figure II.7 schématisé le processus de diagnostic heuristique selon Clancey

et Chandrasekaran, et la figure II.8 schématisé le processus de diagnostic basé sur la cohérence, dans lequel peuvent s'inscrire les approches employées en automatique.

Ce découpage en tâches primitives permet de disposer d'une **description générique du diagnostic** par l'**agencement des tâches primitives** en un réseau de blocs élémentaires et indépendants de raisonnement, conformément aux conceptions de Clancey et Chandrasekaran.

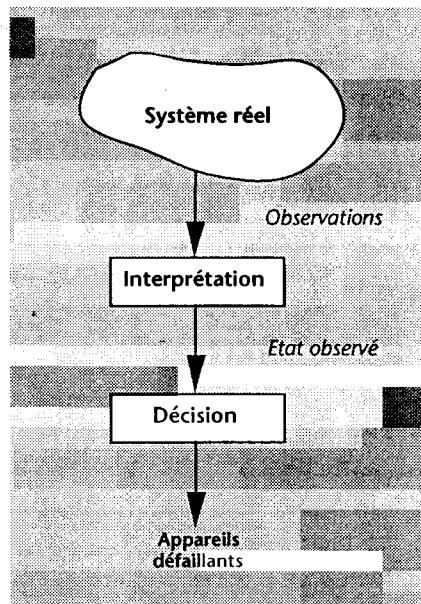


Figure II.7 : Processus de diagnostic heuristique, selon Leitch et Gallanti.

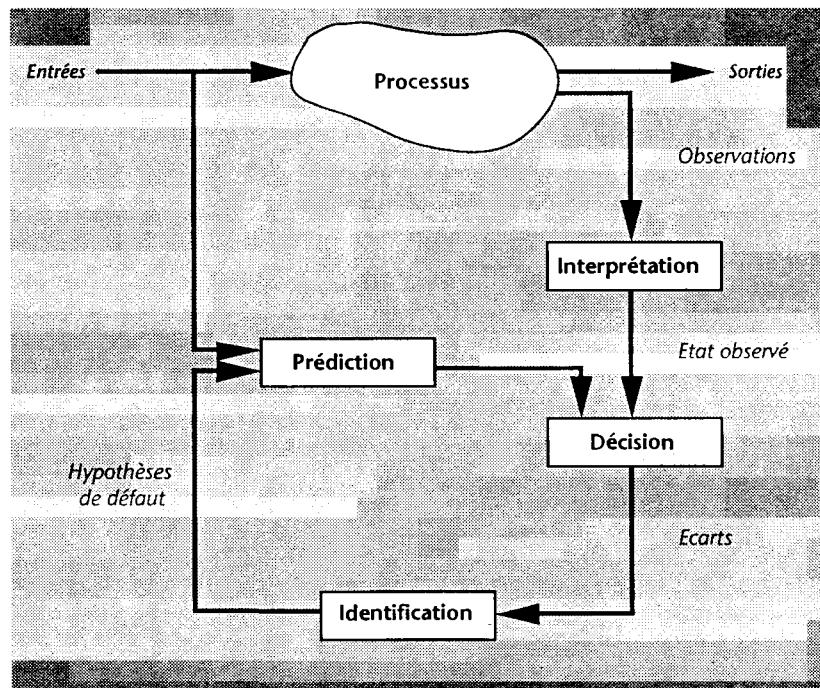


Figure II.8 : Processus de diagnostic basé sur la cohérence, selon Leitch et Gallanti.

A ce niveau d'abstraction, le processus de diagnostic de la figure II.7 n'est pas fondamentalement différent de celui de la figure II.8. Ce dernier peut, en réalité, être envisagé comme une **forme canonique** à partir de laquelle les autres processus, dont le diagnostic heuristique, peuvent être

retrouvés. Le processus de diagnostic heuristique est donc inclu dans le processus basé sur la cohérence.

II.4.2.2. Processus de diagnostic adopté

Le processus canonique introduit par Leitch et Gallanti est celui que nous considérons dorénavant, à quelques modifications près. En effet, Leitch et Gallanti considèrent la tâche d'interprétation comme une mise au format des données mesurées, c'est-à-dire de l'acquisition des mesures ; cela implique que la tâche de décision effectue deux types de traitements : la comparaison des mesures avec les données de référence fournies par la tâche de prédiction, et la décision proprement dite. Nous préférons associer chacun des deux traitements à une tâche bien spécifique, de manière à rester homogène avec la définition de la tâche primitive donnée par Chandrasekaran (considérée comme un bloc élémentaire de traitement de l'information). Cela nous oblige à donner un nouveau sens à la tâche d'interprétation, qui est alors considérée comme la tâche d'évaluation et de qualification du résidu, et la tâche de décision proprement dite à laquelle est associée une logique de décision. De cette façon, à chacune des tâches du processus générique peut être associé un traitement spécifique.

Les étapes de diagnostic adoptées en automatique (détection et localisation) peuvent être considérées comme un agencement particulier de ces mêmes tâches primitives : l'étape de détection met en œuvre les tâches d'interprétation, de prédiction et de décision ; l'étape de localisation regroupe, quant à elle, les tâches de prédiction, de décision et d'identification. Chacune de ces tâches primitives est caractérisée par des données d'entrée et des données produites, les sorties. Le tableau II.2 présente notre interprétation de ces tâches.

Aides en ligne	Tâches primitives	Entrées	Sorties
<i>Aide au diagnostic</i>	<u>Interprétation</u> <i>Traitement préliminaire des données</i>	Données issues de mesures Valeurs de référence Valeurs prédites	Résidu d'observation Résidu de test
	<u>Décision</u> <i>Génération de conclusions ou d'hypothèses qui satisfont des contraintes données ou des spécifications</i>	Résidu d'observation Résidu de test	Défaut Candidat maintenu ou rejeté
	<u>Identification</u> <i>Détermination des états passés ou présents inconnus ou non mesurables à partir de l'état courant observé</i>	Défaut	Candidats à tester
	<u>Prédiction</u> <i>Calcul des états futurs à partir de l'état présent observé</i>	Nouvelles consignes et paramètres de fonctionnement Candidats à tester	Valeurs de référence Valeurs prédites

Tableau II.2 : Informations d'entrée et de sortie pour chacune des tâches primitives.

Dans une approche basée sur la cohérence, le processus de diagnostic procède par vérification de la cohérence entre valeurs de référence calculées et valeurs mesurées. Une incohérence est appelée **résidu** : le résidu est nul dans le cas où le fonctionnement est normal et différent de zéro sur apparition de défaut. L'architecture d'un système de diagnostic est présentée à travers les figures II.9, pour la détection (en traits gras), et figure II.10 pour la localisation, conformément au découpage de Brunet et al.

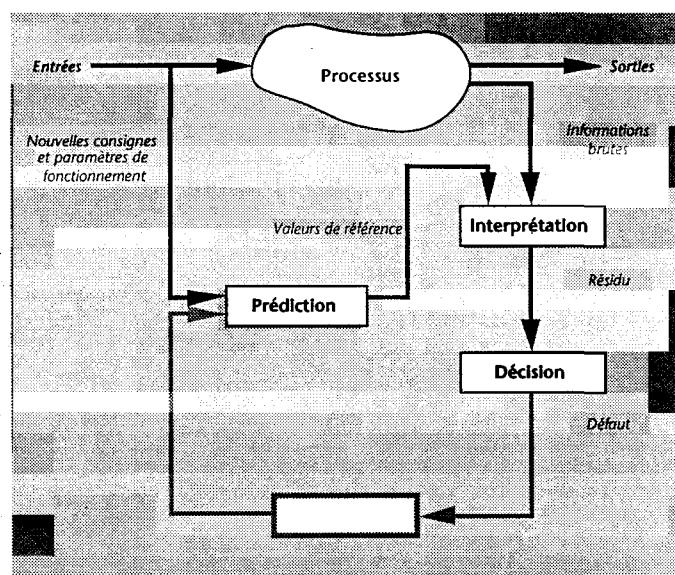


Figure II.9 : Première étape de diagnostic (détection).

Une fois le défaut détecté, la tâche d'identification lance la recherche des candidats potentiels, de manière itérative ; ces candidats peuvent être des **composants**, des **variables** ou des **fonctions**, ou bien encore des **défaillances**, selon la stratégie de diagnostic adoptée.

La combinaison des deux types de techniques conduit à un système de diagnostic très puissant, par exemple le système effectue la recherche des variables sources du dysfonctionnement et essaie de déterminer les défaillances physiques associées (cf. l'exemple de DIAPASON, dans le paragraphe suivant).

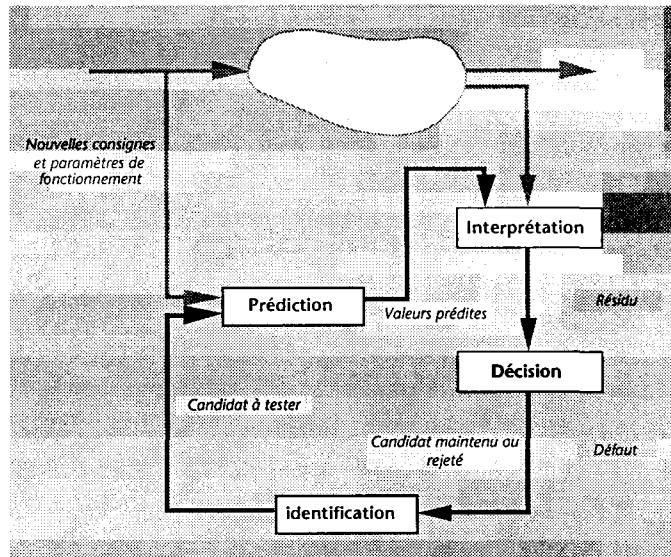


Figure II.10 : Seconde étape de diagnostic (localisation).

Lorsque l'on dispose d'un modèle dynamique du procédé, le processus de recherche de défauts permet de comparer en continu comportement mesuré et comportement attendu. Son avantage est de permettre une détection précoce des dysfonctionnements. Ce type de diagnostic est, par ailleurs, bien adapté aux systèmes où la dynamique ne peut être négligée si l'on veut en comprendre le fonctionnement.

II.4.2.2.3. Description succincte de DIAPASON

Le système **DIAPASON** est un exemple de système de diagnostic fonctionnant sur la base d'un modèle de bon fonctionnement et d'une base de connaissances construite à partir d'une analyse des défaillances d'appareils. Il est constitué des modules dédiés **PROTEE**, **MINOS**³, et **METHYS**, et peut être considéré comme un système fonctionnant selon le processus décrit en figure II.11.

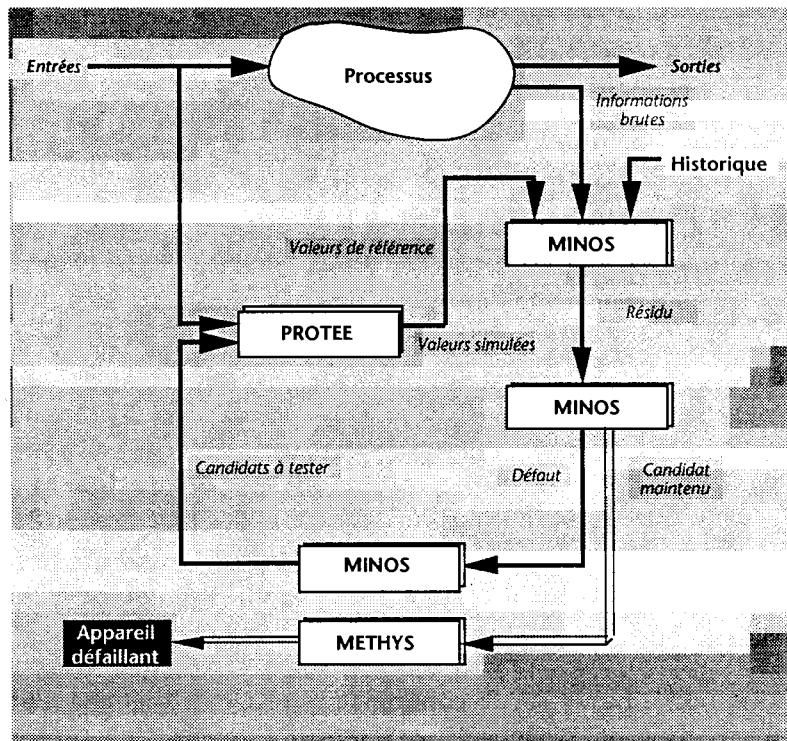


Figure II.11 : Le système DIAPASON à travers la forme canonique de diagnostic.

DIAPASON fonctionne globalement de manière séquentielle. **MINOS** détecte les incohérences entre le comportement de référence fourni par le simulateur **PROTEE** et les mesures. De cet ensemble d'incohérences, qui constituent l'ensemble des défauts, **MINOS** cherche à identifier, par le biais de procédures récursives, le défaut source c'est-à-dire celui qui, par sa présence, est capable d'expliquer l'ensemble des autres défauts constatés. A chaque fois que **MINOS** change d'avis sur le défaut source, il informe **METHYS** de ses conclusions qui se charge, à son tour, de relier les défauts sources sur les variables du procédé à des défaillances d'appareils.

En termes de tâches primitives, la répartition est la suivante : **PROTEE** prend en charge la tâche de prédiction, tandis que **MINOS** prend en charge les tâches d'interprétation, de décision et d'identification. **METHYS** peut être considéré comme un module d'identification complémentaire.

Cette description sommaire du système **DIAPASON** nous a permis de positionner et d'organiser les divers modules employés. Nous verrons plus loin quelles en sont les caractéristiques principales.

³ Les modules **PROTEE** et **MINOS** sont le fruit de deux thèses de doctorat effectuées au CEA, respectivement [LEYVA 91] et [MONTM 92].

II.4.2.3. Choix des outils

Les techniques employées dans le cadre du diagnostic sont très nombreuses. Elles peuvent être regroupées selon les tâches qu'elles assurent, et ceci constituera une première classification, mais cela n'est évidemment pas suffisant pour orienter leur choix. Il nous faut, en effet, définir la **stratégie de diagnostic** que l'on souhaite mettre en œuvre, choisir les techniques à employer en fonction des caractéristiques du modèle de connaissances et de l'instrumentation, etc.

Nous proposons ici de passer en revue les critères de choix qui devraient permettre au concepteur de définir les caractéristiques générales d'un système de diagnostic.

II.4.2.3.1. Choix de la stratégie de diagnostic

Le choix du processus de diagnostic doit se faire en fonction des **connaissances disponibles** et des **Résultats recherchés**. Pour ce faire, il faut préalablement définir le type de diagnostic utilisé au départ : cherche-t-on à faire un diagnostic basé sur un modèle de structure, de comportement, fonctionnel, ou encore un diagnostic à base d'heuristiques ? le diagnostic doit-il fournir en sortie la liste des variables sources de défaut ou bien des défaillances potentielles ?

Il est possible de trancher en considérant que les connaissances de bon fonctionnement sont généralement disponibles dès la conception du processus, alors qu'une part non négligeable des connaissances de mauvais fonctionnement sont acquises par expérience. Par ailleurs, la schématisation de la **stratégie de diagnostic** selon Milne permet d'envisager une approche de diagnostic initiale (diagnostic basé par exemple sur la structure du processus) puis de l'enrichir par d'autres types de connaissances.

De ce point de vue, l'**approche basée sur la cohérence** se révèle initialement plus intéressante, sachant qu'il sera toujours possible d'évoluer vers un **diagnostic abductif**.

La stratégie peut consister à partir d'un système de diagnostic de comportement, puis à envisager la possibilité de faire évoluer le système vers le haut (diagnostic utilisant des connaissances de comportement + connaissances fonctionnelles ou encore connaissances de comportement + connaissances compilées). Nous supposerons dorénavant que les systèmes qui exploitent des connaissances relatives à la structure, au comportement et au fonctionnement relèvent des systèmes dont le principe de raisonnement est fondé sur la validation de la cohérence (structurelle, comportementale ou encore fonctionnelle) ; que les systèmes qui exploitent des connaissances compilées sont des systèmes essentiellement abductifs (bien qu'il puisse exister des cas particuliers).

II.4.2.3.2. Choix des techniques

Les tâches primitives ne sont pas tout à fait indépendantes les unes des autres, ne serait-ce que parce qu'elles échangent entre elles des données et qu'elles sont très spécifiques des données qu'elles peuvent exploiter ; le choix d'une technique pour une tâche est en fait susceptible d'orienter le choix au niveau des autres tâches. Le sens de ces contraintes est donné par le sens dans lequel les traitements sont effectués.

Dans l'**étape de détection** (figure II.9), la tâche de prédiction dépend principalement du modèle qui sert à décrire le fonctionnement normal du processus, donc des connaissances qui ont servi à l'élaborer. La tâche d'interprétation dépend, pour une part, de l'**instrumentation**, mais également de la tâche de prédiction. En effet, la vérification de la cohérence entre valeurs mesurée et attendue suppose que les données soient comparables. Le résidu, issu de cette comparaison, puis qualifié dans

l'étape d'interprétation, présente des caractéristiques propres au modèle et à l'instrumentation. Il est ensuite utilisé en tâche de décision, qui hérite ainsi des caractéristiques du modèle et de l'instrumentation.

Dans l'étape de localisation (figure II.10), l'information qui sert à identifier la cause de défaut est l'ensemble des résidus qualifiés en étape de détection. La tâche d'identification retourne une liste de variables candidates, à partir desquelles des tests seront effectués pour infirmer ou confirmer une hypothèse.

En résumé, le choix des techniques à employer est en grande partie influencé par les caractéristiques propres aux tâches de prédiction et d'interprétation. Il faut voir le processus de diagnostic comme une cascade de traitements avec en amont, la tâche d'interprétation qui génère un résidu dont les caractéristiques vont influer sur l'étape de détection mais aussi sur l'étape de localisation, qui serviront à rechercher le défaut source. Plus en amont encore, la tâche d'interprétation est conditionnée par le modèle (structurel, de comportement, ou encore fonctionnel) qui doit servir de référence. Les caractéristiques de l'instrumentation interviennent principalement en décision, afin de vérifier la cohérence des valeurs mesurées.

Les caractéristiques du modèle et de l'instrumentation sont développées ici, puisqu'ils influent sur l'ensemble du processus de diagnostic.

II.4.2.3.3. Propriétés des modèles de référence

Nous avons jusqu'ici considéré trois types de connaissances à partir desquelles envisager un diagnostic. Mais il faut noter que les systèmes les plus représentatifs utilisent, dans leur majorité et pour les processus continus, des connaissances de comportement.

En considérant la modélisation comportementale, deux critères permettent de caractériser un modèle :

- le niveau de résolution d'un modèle : deux grands axes de modélisation comportementale que sont l'approche automatienne et l'approche du génie des procédés sont généralement empruntés ; ces deux approches se distinguent par le niveau de compréhension des phénomènes modélisés,
- un second critère est la précision du modèle.

La résolution

La résolution traduit l'effort consenti par le concepteur pour décrire les phénomènes physiques ; cela revient à considérer des niveaux d'abstraction de la modélisation des phénomènes. Grossièrement, deux catégories de modèles peuvent être envisagées :

- un modèle de résolution basse est construit à partir des variables suffisantes pour résumer le passé et prédire le comportement futur immédiat du système [BRUNE 90]. Ce type de modèle est employé en automatique pour le contrôle-commande, il est assimilable à un modèle boîte noire, c'est-à-dire un modèle qui prend en compte uniquement les relations mathématiques qui lient les entrées et les sorties de chaque appareil, de sorte que les réponses fournies par le modèle correspondent aux évolutions réelles du processus, sans se préoccuper des phénomènes internes,
- un modèle de résolution haute prend en compte les paramètres physiques du processus. Il est habituellement employé en modélisation physique.

Le choix de la résolution du modèle n'est, a priori, pas imposé aux modélisateurs : dans l'absolu, l'un ou l'autre type de modèle peut être employé pour fournir les valeurs de référence. Le choix doit se faire sur des critères supplémentaires comme la pertinence, le coût, les délais imposés, la réutilisation du modèle hors diagnostic, etc. Les contraintes de coût et de délais généralement imposées aux concepteurs font que le choix du modèle est fixé par les connaissances disponibles. Il est certes légitime de dire qu'un modèle boîte noire est pauvre en connaissances, mais d'un autre côté ce type de modèle est bien adapté au contrôle-commande car relativement aisé à réaliser et à valider. Par ailleurs, un modèle qui prend en compte les aspects physico-chimiques s'intéresse davantage aux lois phénoménologiques pour le calcul des flux produits ou transférés ; c'est une modélisation riche en connaissances mais son coût est nettement supérieur.

Une autre manière de trancher est de choisir le type de modélisation en introduisant le **principe de pertinence** : quel est le type de modèle le mieux adapté à la supervision d'un processus ? En ce sens, les psychologues et ergonomes s'accordent à dire que les opérateurs ont une connaissance superficielle du processus mais suffisante pour leurs besoins, et qu'ils se limitent à considérer les **comportements les plus significatifs** pour la supervision. Cela sous entend qu'il n'est **vraisemblablement pas nécessaire** d'investir une somme considérable d'efforts pour réaliser un système de diagnostic basé sur un modèle de résolution haute, sachant que les informations qui pourront être délivrées ne seront pas utiles à l'opérateur.

La précision

La **précision** d'un modèle qualifie les approximations consenties pour modéliser les phénomènes. Par exemple, une relation entre deux variables x et y peut être exprimée de diverses façons : la variable y varie dans le même sens que x ; la variable y varie sous l'influence de x , dans des proportions telles que le rapport des amplitudes de variation est de 1,5 ; la variable y varie sous l'influence de x , et son évolution est définie par une loi de comportement (une équation différentielle) qui relie x à y . Le choix de la précision est également contraint par les caractéristiques de l'instrumentation : pour un débit donné à 30 % près, il n'est peut être pas nécessaire que le modèle ait une précision supérieure.

Le courant de modélisation de la **physique qualitative** (dont les précurseurs ont été **De Kleer et Brown, Forbus, et Kuipers** [DE KLE 84] [FORBU 84] [KUIPE 86]) fixe comme objectif la représentation d'un système et l'explication de son comportement. Elle adopte, en partie, le point de vue de l'homme qui utilise des "règles de bon sens" afin de comprendre la manière dont un système physique évolue, et conserve un certain niveau de connaissance sur la physique des phénomènes [BOBRO 84]. Les différentes approches que l'on rencontre en physique qualitative jouent en fait sur le poids accordé aux aspects **raisonnement humain**, peu précis car fondé sur une **évaluation intuitive** de la part de l'expert, par rapport à l'aspect **description physique**, plus rigoureuse et **requérant des données précises** : cela débouche sur la notion de **niveau de précision** des connaissances contenues dans un modèle. Pour décrire l'ensemble des cas de figure, nous avons considéré trois niveaux de précision : **qualitatif, mixte et numérique**.

Un inconvénient de l'approche du tout-qualitatif est que l'on s'expose aux ambiguïtés du calcul symbolique [BOURS 89]. C'est pourquoi la plupart des approches actuelles sont fondées sur un compromis quanti-qualitatif de façon à bénéficier des avantages du calcul numérique tout en choisissant le niveau de précision le plus pertinent pour l'opérateur.

II.4.2.3.4. Structure du modèle de référence

Le diagnostic est par essence un processus causal, puisqu'il s'agit de trouver la raison d'un mauvais fonctionnement. Cette causalité peut être explicitée au travers de la **structure du modèle** employé dans la **recherche de candidats**, au niveau de la **tâche d'identification**. En effet, c'est elle qui oriente le raisonnement en fournissant les chemins et le sens de parcours entre objets du modèle au travers des **relations orientées**. "Cette structure causale est également intéressante lorsque l'objectif est d'**expliquer de manière didactique** à l'opérateur les mécanismes internes au processus qui amènent celui-ci à changer d'état sous l'influence de facteurs externes" [LEYVA 91].

D'un point de vue général, le modèle utilisé en tâche d'identification doit pouvoir être décrit au travers du couple {objets ; relations orientées}. Nous envisagerons deux types de modèles : une structure de modèle qui relie des **pannes** entre elles, et une structure de modèle qui relie **causalement** les variables, mesurées ou non, qui caractérisent le fonctionnement du processus.

L'**arbre de pannes** est le modèle le plus classiquement employé dans une approche de diagnostic abductif ; nous le formaliserons de la manière suivante : {pannes, symptômes, événements ; relations de cause à effet}. Un **symptôme** est un indice observable qui révèle un dysfonctionnement du processus. Il peut s'expliquer par un ou plusieurs événements, qui eux-mêmes peuvent s'expliquer par d'autres événements ... On obtient ainsi un arbre causalement structuré dont un **symptôme** est une racine. En général, les événements de différents sous-arbres ne sont pas indépendants mais directement liés soit par des relations instantanées soit par des relations avec une certaine dynamique. De ce fait, si les événements de différents sous-arbres sont connectés, plusieurs symptômes peuvent apparaître en même temps ou selon une certaine séquence [MONTM 92].

La seconde structure de modèle met en jeu une représentation des variables et leurs influences mutuelles, et sont appelés **graphes dirigés** [IRI 79]. Cette structure sert à rechercher les variables qui ont pu causer le défaut observé en remontant les chemins de causalité du graphe et à effectuer des tests sur chacune des variables qui sont susceptibles d'avoir contribué à la perturbation observée sur la variable de détection.

II.4.2.3.5. L'instrumentation

Les contraintes imposées par l'instrumentation sont dues principalement au nombre de capteurs, à leur répartition dans le processus, ainsi qu'à leurs caractéristiques propres (plage de variation, point de fonctionnement, précision, biais minimum détectable). Les caractéristiques propres aux capteurs imposent une limite haute de précision du modèle, d'où une **limite de sensibilité** de la détection. D'un autre côté, le **nombre et la répartition** de ces capteurs imposent une **limite d'isolabilité** ou de **diagnosticabilité**. Selon les termes de Dubuisson : "un système est dit diagnosticable s'il est susceptible d'être soumis à un diagnostic, c'est-à-dire s'il est muni d'organes d'observation (capteurs) et d'un système d'analyse pour étudier les informations fournies. La diagnosticabilité sera l'aptitude d'un système à être diagnostiqué" [DUBUI 90].

Cassar et al. proposent une méthode et un algorithme permettant d'étudier la diagnosticabilité d'un système et de générer le module de surveillance adapté [CASSA 92]. La démarche est basée sur l'utilisation des **Relations de Redondance Analytique** (RRA) : ce sont des relations statiques ou dynamiques composées uniquement de variables et paramètres connus à partir de l'instrumentation (un exemple d'application de la méthode de génération à une installation pétrochimique est proposé dans [CORDI 91]). La violation d'une RRA sera significative d'une défaillance sur la mesure d'une variable ou d'un changement de la valeur d'un paramètre de la relation. L'obtention de ces RRA s'appuie sur l'**analyse fonctionnelle** (les objectifs et les services attendus), **topologique**

(interconnexions entre appareils) et **comportementale** (ensemble de relations qualitatives ou quantitatives liant variables et paramètres entre-eux, du type : $T_3 = f$ (mesure 1, mesure 2) ; équation de confluence $\partial T = \partial P + \partial V$ [DE KLE 84] ; équations différentielles classiques). Pour l'analyse de la diagnosticabilité, on ne s'attache pas, en effet, à définir un modèle de comportement de façon complète, mais plutôt l'ensemble des relations que l'on a pu établir. Cette approche d'analyse a d'ailleurs donné lieu au logiciel D3, qui facilite l'analyse de la diagnosticabilité d'un processus et permet de générer un système de surveillance.

L'étude des RRA permet donc de déterminer la **diagnosticabilité structurelle** du système. Les étapes ultérieures consisteront alors à déterminer l'**isolabilité** des défauts, qui est réalisée en associant à chaque variable connue, une **signature binaire de panne**. L'identification consistera alors à décider quelle variable a la signature de panne la plus voisine de la signature calculée en ligne.

II.4.2.3.6. Conclusion

Les points importants à retenir sont les suivants :

- la qualité de la détection est vue en terme de **sensibilité**, c'est-à-dire d'écart minimal détectable entre la référence et la réalité. Cette sensibilité est donc déterminée par les **caractéristiques de l'instrumentation** et du **modèle** construit pour générer ces valeurs de référence,
- l'étape de détection est qualifiée à travers la notion de **robustesse**, qui définit l'aptitude du système à faire la distinction entre les **défauts caractéristiques de défaillance** d'une part, et les **bruits de mesure et erreurs de modélisation**, d'autre part. La robustesse caractérise la capacité à raisonner sur des informations bruitées et incomplètes, et elle concerne principalement la tâche de décision,
- l'étape de localisation est qualifiée par le critère d'**isolabilité**, ou **diagnosticabilité**, qui revêt deux formes. La première est la **discrimination**, que traduit le cardinal de l'ensemble des candidats ; la seconde est la **justesse ou l'exactitude de la localisation**, qui est la probabilité que la panne effective soit dans l'ensemble des candidats. On l'a vu précédemment, l'**instrumentation** joue ici un rôle important car elle intervient dans la différenciation des causes potentielles de défaut,
- la recherche des candidats est un processus causal qui exploite une structure de modèle.

Ainsi, les résultats fournis par le système d'aide au diagnostic résultent d'un traitement dans des conditions où les informations sont généralement imprécises en raison des **choix de modélisation** et des **caractéristiques de l'instrumentation**.

Muni des types de tâches et des propriétés de **Résolution** et de **Précision**, il est alors possible de décliner une classification des approches les plus importantes pour chacune des tâches de diagnostic.

II.4.2.4. Une classification des outils

La classification proposée ici est essentiellement axées sur les processus continus. Nous passons successivement en revue les techniques employées dans les tâches de **Prédiction**, **Interprétation**, **Décision** et **Identification**. Par ailleurs, dans une même tâche, nous distinguons les techniques en utilisant deux propriétés des connaissances employées que sont la **Résolution** et la **Précision**.

A titre d'illustration et pour chacune des tâches, nous envisagerons comment s'effectuent les traitements au sein de chacun des modules du système **DIAPASON**.

II.4.2.4.1. Prédition

Le tableau II.3 présente une synthèse non exhaustive des principales approches de modélisation et de simulation d'un système industriel employées en diagnostic. Les différentes techniques ont été classées selon la résolution et la précision, qui constituent, selon nous, les principaux critères de sélection.

On remarquera, autant en haute qu'en basse résolution, l'intérêt croissant porté aux approches mixtes qualitatif-quantitatif, qui constituent un compromis intéressant aux faiblesses du **calcul symbolique**, **certain mais imprécis**, et du **calcul numérique - précis mais incertain**. En effet, un modèle de précision numérique nécessite des efforts de modélisation souvent disproportionnés par rapport à l'utilisation qui en sera faite en supervision, d'autant plus que la précision des capteurs et les bruits de mesure rendent illusoire cette précision numérique [MONTM 92]. D'un autre côté, les modèles purement qualitatifs produisent des comportements non pertinents qu'il faut ensuite filtrer en ajoutant un jeu de règles spécifiques pour réduire l'ensemble des possibles.

La modélisation mixte qualitative-quantitative s'avère donc être un bon compromis au tout qualitatif et au tout quantitatif. D'ailleurs, les travaux s'orientent, depuis 1987, vers cette voie. La modélisation mixte s'avère, en fin de compte, fournir des résultats assez proches de la réalité, ce qui la rend intéressante pour la surveillance des processus continus : pour les modèles de résolution haute, l'approche proposée par Kuipers connaît un développement important ; elle a notamment été appliquée à la surveillance de processus hydrauliques [CHARL 92], et également aux bio-procédés [BOUSS 93] ; pour les modèles de résolution basse, encore appelés modèles de comportement, l'approche par fonctions de transfert qualitatives a déjà fourni des résultats concluants, notamment au travers des projets ALLIANCE [LAPPA 89] et DIAPASON.

		Prédiction	
Précision	Simulation par réseau de neurones , [HOSKI 88].	Résolution numérique d'équations différentielles	
Numérique	Fonctions de transfert	Propagation des efforts et des flux énergétiques au travers d'un modèle Bond Graph [LUCAS 94].	
Mixte	Propagation d'effets quantifiés au travers de fonctions de transfert qualitatives (FTQ) au sein d'un graphe causal, [GENTI 87]	Simulation par propagation de contraintes entre paramètres physiques. Outil QSIM de Kuipers [KUIPE 86]	
Qualitative	DIAPASON, module PROTEE [LEYVA 91] : <ul style="list-style-type: none">• exploite les fonctions de transfert qualitatives,• l'influence dynamique entre variables est décrite à travers les gains, retard pur et temps de réponse,• la simulation est événementielle (propagation d'évolution des variables d'entrée du modèle si elle est considérée significative).	Simulation qualitative floue, CA-EN [BOUSS 93].	
Basse	Propagation d'évolutions: signes des variables et tendances au travers d'un graphe de causalité orienté, [IRI 79], [SHIOZA 85], [TSUGE 85], [PALOW 86].	Prédiction de tous les états possibles à partir d'une évolution initiale (physique naïve de Forbus, [FORBU 84] ; conflues de De Kleer et Brown [DE KLE 84])	Haute Résolution

Tableau II.3 : Exemples de techniques de prédiction.

Au sein de DIAPASON, le module PROTEE remplit la tâche de prédiction en simulant le comportement normal du processus sur la base d'un modèle causal dynamique, encore appelé graphe causal [LEYVA 91]. La structure du graphe causal est construite à l'aide des variables significatives pour la supervision et de relations orientées qui indiquent les influences entre variables. Ces relations symbolisent chacune une **loi d'influence** qui prend la forme d'une **fonction de transfert**, classique en automatique. Les perturbations détectées sur les variables d'entrée du modèle sont propagées sur les autres variables si elles sont considérées significatives ; on préfère ainsi décrire le comportement des variables par des **évolutions significatives** plutôt que par des **valeurs précises** et échantillonées, comme dans les simulateurs classiques. La **simulation** est donc la **propagation d'événements significatifs** à l'aide des informations portées par chaque arc pour déduire le comportement des autres variables. L'évolution d'une variable est alors perçue comme une **séquence chronologique d'événements**.

Le choix d'un modèle causal s'est révélé intéressant dans la mesure où il permet de comprendre la manière dont les perturbations se propagent dans le modèle, on parle alors de pouvoir explicatif de l'approche qualitative au travers de la structure causale du modèle [LEYVA 91].

II.4.2.4.2. Interprétation

Le tableau II.4 présente une synthèse des techniques utilisables pour évaluer et qualifier un résidu. Comme nous l'avons précédemment souligné, la technique qu'il convient de choisir dépend étroitement des propriétés du modèle employé en tâche de prédiction.

		Interprétation	
		Precision	Résolution
Numérique	Precision	Méthode des relations de parité : redondance directe et redondance temporelle [PATTO 91]	Pas de méthode spécifique. Il est possible d'utiliser les méthodes numériques employées en basse résolution dans certains cas particuliers
	Résolution	Méthode des observateurs (résidus en boucle fermée), filtre de Kalman et dérivés (observateurs stochastiques, [DUNK 91], [SELIG 91], [PATTON 91], [FRANK 93]) Estimation des paramètres d'un modèle (variation des paramètres de référence) [ISERM 91]	
Mixte	Precision	Résidus en boucle ouverte (calcul d'écart entre évolutions simulée et réelle) et interprétés qualitativement , DIAPASON module MINOS [MONTM 92]	Historique concis pour chacune des variables mesurées, à chaque période d'échantillonage ; les valeurs des variables sont positionnées dans un espace quantité. QDIAG, [CHARL 92]
Qualitative	Precision	Alarmes (+,-)	Vérification de cohérence entre deux états stables (passé et courant) QUARAF, [LEPET 87]

Tableau II.4 : Exemples de techniques d'interprétation.

Dans le système DIAPASON, la tâche d'interprétation est basée sur la comparaison, par le module MINOS, de données provenant respectivement des données de mesure et des valeurs calculées par le simulateur PROTEE. La technique mise en œuvre est le calcul des résidus en boucle ouverte, et interprétés qualitativement : dès qu'un événement survient, il est aussitôt propagé à l'ensemble du

graphé et comparé avec l'évolution observée sur les variables mesurées. Compte-tenu du caractère qualitatif du modèle contenu dans PROTEE, la comparaison entre observations et simulation se fait sur des critères qualitatifs comme la forme et la tendance des évolutions. La décision se fera donc sur la base de ces critères.

II.4.2.4.3. Décision

Comme pour les autres tâches, nous avons choisi de classer les techniques de décision selon les connaissances employées (tableau II.5). Distinguer les techniques selon la résolution n'a pas de sens ici, puisque la décision est réalisée sur un écart par rapport à une référence.

Le processus décisionnel est mis en œuvre dans les étapes de détection et de localisation pour décider de l'apparition d'un défaut de fonctionnement ainsi que du maintien ou du rejet d'un candidat potentiel. On demande au système :

- en détection, d'être sensible aux défaillances et robuste aux bruits de mesure et aux erreurs de modélisation. Cela pose le problème de la sensibilité aux fausses alarmes, et de la non détection des défauts de faible amplitude,
- en localisation, de correctement isoler les causes de défaut. Cela pose le problème de la signature des défauts, sachant que plus les signatures seront éloignées les unes des autres, plus il sera aisément de distinguer les défauts les uns des autres. L'isolabilité n'est pas liée aux propriétés du modèle de simulation, elle est directement dépendante des caractéristiques structurelles de l'installation en matière d'instrumentation.

La difficulté réside alors dans le choix d'une frontière entre une évolution qui sera jugée normale d'une évolution anormale. Le dilemme sera alors de choisir entre deux critères antagonistes que sont la précision et la certitude, qui s'exprime par le fait que si l'on souhaite rendre plus précis le contenu d'une proposition, on tendra à accroître son incertitude et inversement [DUBOI 88].

Si l'on choisit de travailler sur dépassement de seuil, on se trouve confronté à une grande sensibilité de la décision au voisinage du seuil de déclenchement. Ce manque de robustesse peut être réduit en ajoutant un compteur derrière la logique ou bien en filtrant le signal avant la logique [BRUNE 90]. La technique du comptage permet de différer la décision tant que le seuil n'a pas été atteint un nombre de fois déterminé. Doyle introduit la notion de seuil adaptatif pour tenir compte des différents modes de fonctionnement : l'auteur propose d'ajuster les seuils de façon dynamique et de sélectionner les capteurs à suivre en fonction du contexte [DOYLE 89].

Une manière de lever les limites inhérentes à la logique à seuils est de travailler sur des données numériques. L'approche numérique d'élaboration de la décision, ici appelée test statistique, revient à associer à un indicateur, défini par sa valeur moyenne ou sa variance, une probabilité d'appartenance à une hypothèse de fonctionnement parmi celles qui ont été préalablement définies. Pour une variable donnée (ou un vecteur de variables) et ayant déterminé deux hypothèses de fonctionnement, deux cas de figure se présentent : le résidu est approximativement nul aux bruits de mesure près, ou bien le résidu est en dehors du seuil de tolérance fixé. La détection consiste alors à déterminer laquelle de ces hypothèses se rapproche le plus de l'indicateur qui vient d'être calculé. Pour ce faire, on décompose l'espace d'observation (par exemple la plage de variation pour une variable) en autant de sous-espaces que d'hypothèses de modes de fonctionnement (dans le cas le plus simple : mode nominal et mode dégradé). A chacun de ces sous-espaces est associée une valeur de référence (une valeur moyenne caractérisant la marche nominale, une valeur moyenne caractérisant l'apparition d'une défaillance), une loi de probabilité conditionnelle (généralement une fonction gaussienne) qui tient compte des variations aléatoires dues aux prises de mesures, ainsi qu'un seuil de détection (cf figure II.12).

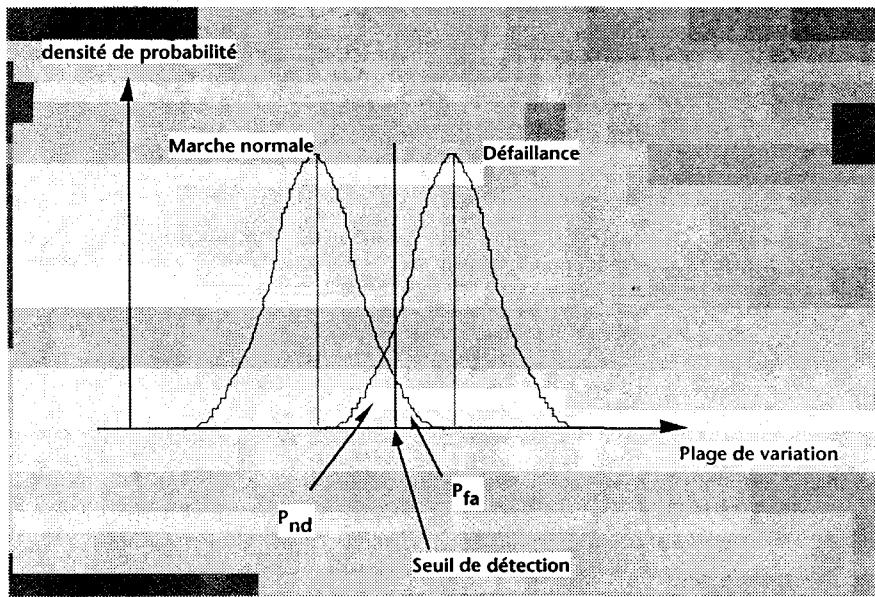


Figure II.12 : Densité de probabilité d'appartenance aux deux modes de marche.

Le recouvrement partiel des deux distributions représente l'**incertitude** quant à l'état dans lequel se trouve la variable : cette incertitude est décrite à travers les notions de **probabilité de non détection** P_{nd} et **probabilité de fausse alarme** P_{fa} . L'inconvénient majeur est que l'on s'expose aux fausses alarmes ou à la non détection, puisque la loi de distribution réelle n'est pas connue mais posée comme hypothèse de travail. La **qualité de la détection de panne** résulte en fait d'un **compromis** entre le **taux de fausse alarme**, la **vitesse de détection**, la **sensibilité aux pannes**, la **robustesse aux erreurs**, le **choix des signaux indicateurs** et la **détection en fonction du système et de ses pannes** [BRUNE 90].

Deux attitudes sont adoptées quant à l'incertitude liée à l'appartenance d'une variable à un état de fonctionnement ou à un autre, comme dans le cas de la figure II.12 où les deux domaines ont une zone commune de recouvrement. La première attitude, qui caractérise les approches statistiques, consiste à associer à une variable un domaine selon sa valeur, ce qui revient à travailler dans l'espace $\{0, 1\}$, et à faire abstraction des incertitudes inhérentes au recouvrement des deux domaines. Cela a pour inconvénient d'induire des risques d'erreurs (fausses alarmes ou non détection) aux limites des deux domaines. La seconde attitude, qui caractérise l'approche par les **ensembles flous** [ZADEH 65], propose d'attribuer une valeur réelle d'appartenance à chacun des domaines, de sorte qu'une variable dont la valeur se situe dans la zone d'intersection entre états normal et anormal (figure II.12), puisse à priori être considérée comme appartenant aux deux états avec, pour chacun d'eux, une valeur d'appartenance dans l'intervalle réel $[0, 1]$. De cette façon, la décision qui utilise la théorie des ensembles flous est vue comme l'agrégation de l'ensemble des critères dans un environnement imprécis et incertain [MONTM 92, 94].

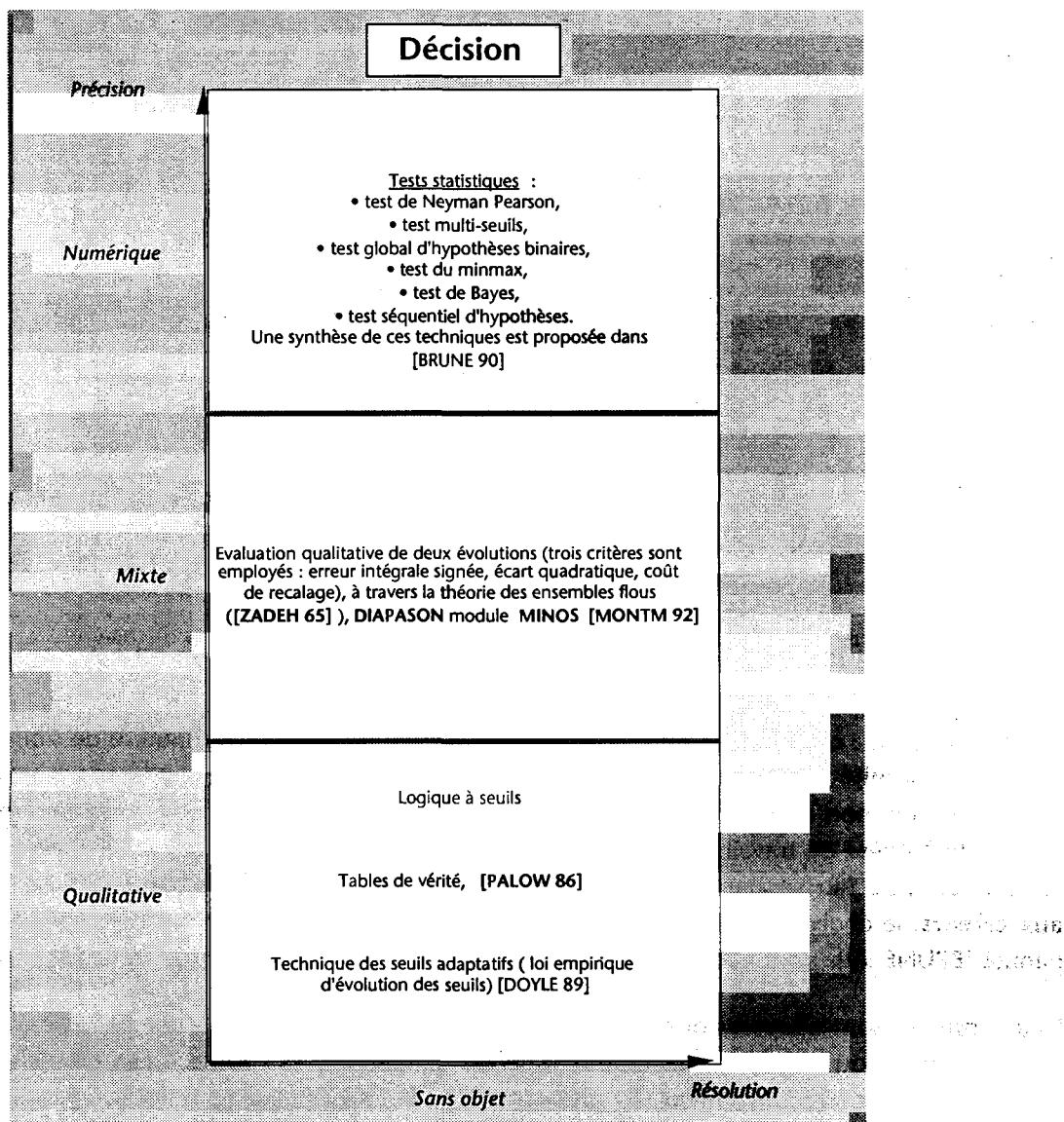


Tableau II.5 : Exemples de techniques de décision.

Dans le système DIAPASON, la décision qui intervient en **détection** est fondée sur les résultats fournis par la tâche d'interprétation, qui évalue les écarts entre la forme et la tendance des évolutions simulée et observée. La décision est vue comme l'agrégation de **trois critères** :

- l'**erreur intégrale signée** caractérise l'écart moyen entre deux évolutions sur une période temporelle donnée,
- l'**écart quadratique** caractérise la translation à effectuer pour mettre en correspondance les deux évolutions simulée et réelle,
- la **norme du vecteur de translation** fournit une idée du coût de la translation (le recalage), autrement dit la distance entre les deux courbes.

La décision est alors motivée par un écart trop important entre les deux évolutions, ou par le coût induit par la translation (le recalage) [MONTM 92]. Dans le cas d'une panne brutale, la décision peut rapidement être prise ; dans le cas de dérives lentes, la décision est suspendue tant que le coût de recalage ne dépasse pas une certaine limite ; sachant que les effets de la dérive iront en grandissant, la détection se fera dès qu'une limite de coût de recalage aura été dépassée. De cette façon, il est possible de privilégier la robustesse devant la précocité, selon les seuils de recalage admis.

II.4.2.4.4. Identification

L'identification est une étape importante du processus de diagnostic car elle consiste à découvrir la source du défaut à travers les chemins de causalité, sachant qu'en raison des problèmes de seuillages des variables du processus, une variable effectivement déclarée en défaut peut, en fait, subir l'influence d'une autre variable non déclarée en défaut mais qui est responsable du dysfonctionnement. L'identification des candidats potentiels au défaut détecté peut prendre des formes multiples. Quelques unes des techniques sont figurées dans le tableau II.6, toujours en les distinguant selon les critères de résolution et de précision des connaissances qu'elles manipulent.

Un exemple d'approche consiste à partir d'un graphe de causalité et à comparer le comportement réel avec l'ensemble des comportements possibles, qui ont préalablement été générés hors ligne et structurés sous forme d'un arbre représentant l'ensemble des évolutions permises avec les contraintes imposées. L'identification associe à l'évolution observée une ou plusieurs branches de l'arbre [CHARL 92].

Identification	
Précision	
Numérique	<p><u>Technique des résidus structurés</u> : en présence d'un défaut unique, seul un sous-ensemble de résidus spécifiques du défaut deviennent non nuls.</p> <p><u>Techniques des vecteurs de résidus directionnels</u> : en réponse à un défaut unique, le vecteur de résidus est confiné dans une direction spécifique d'un défaut.</p> <p>Une synthèse de ces techniques est proposée dans [PATTO 94].</p>
Mixte	<p>Recherche de candidat à travers un graphe signé dirigé dont les arcs sont affectés d'un poids à valeur floue et traduisant les délais de réponse aux perturbations [TAKED 94]</p> <p>Recherche des candidats par parcours inverse aux chemins de causalité ; les variables amont à la variable de détection sont susceptibles d'être les sources effectives, KB-MUSICA, [MOUSS 93], DIAPASON modules PROTEE et MINOS [MONTM 92].</p> <p>Recherche des candidats par analyse structurelle et comparaison avec une base de données de dysfonctionnements classés selon leur degré de croyance (classification établie par un expert du processus) [PAASC 93], ou selon la fiabilité des appareils [ATKIN 93].</p>
Qualitative	<p>Raisonnement hypothétique et stratifié utilisant les connaissances de mauvais fonctionnement des appareils, DIAPASON, module METHYS [COUDO 91]</p> <p>Parcours d'arbre de défaut : recherche exhaustive des combinaisons de pannes qui expliquent les observations [DE KLE 87]</p> <p>Inférence de règles correspondant aux effets d'un défaut d'une variable donnée sur l'ensemble des variables du graphe causal, [PALOW 86].</p>
Basse	<p>Reconnaissance de signature de défaut par redondance analytique, outil D3 [CASSA 92].</p> <p>Classification de contraintes quantitatives (équations du procédé) : à une contrainte est associé l'ensemble des défaillances possibles compatibles avec l'état de la contrainte, [KRAMÉ 87].</p> <p><i>Pas de méthode spécifique, mêmes techniques qu'en résolution basse</i></p>
Haute	<p>Reconnaissance de l'évolution observée avec l'ensemble des évolutions dysfonctionnelles et générées en-ligne, MIMIC [DVORA 89]</p> <p>Reconnaissance de l'évolution observée avec l'ensemble des évolutions dysfonctionnelles et générées hors-ligne, QDIAG [CHARL 92]</p>
Résolution	<p>Recherche dans un graphe fonctionnel du procédé, [FINCH 87].</p> <p>Isolation du sous-ensemble de paramètres de l'ensemble des perturbations dont la valeur qualitative est "croissante" ou "décroissante" QUARAF [LEPET 87]</p>

Tableau II.6 : Exemples de techniques d'identification.

Pour identifier l'origine du défaut, le module MINOS fait appel au module PROTEE qui va alors lancer une simulation locale, c'est-à-dire limitée à une partie du modèle, sur les variables à tester.

MINOS identifie la cause de défaut parmi un ensemble de défauts constatés grâce à la structure causale du modèle de **PROTEE**, qui fournit l'ensemble des chemins possibles de propagation des défauts : au temps t , un défaut constaté sur une variable peut s'expliquer par les défauts de ses antécédents en consultant les historiques simulé et réel de chaque variable concernée. L'hypothèse est faite que les défauts se propagent avec la dynamique du fonctionnement du procédé, donc en accord avec des retards et des temps de réponse portés par les arcs du graphe. La recherche des antécédents ne peut être faite que sur un sous-graphe dont les nœuds sont nécessairement des antécédents des variables de détection.

Le module **METHYS** est particulier à **DIAPASON** puisqu'utilisé en tant que module d'affinage des conclusions tirées par **MINOS** : il assure la correspondance entre les défauts constatés puis structurés par le filtrage, et les causes de défaillances physiques ou matérielles. Il met en œuvre un raisonnement inductif basé sur la mise en correspondance d'hypothèses de défauts et de défaillances contenues dans sa base de faits. Il est, par ailleurs, capable de remettre en cause ses conclusions, en fonction des informations qui lui sont envoyées par **MINOS**. Les connaissances qui constituent sa base sont des règles hypothétiques construites à partir d'une analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE).

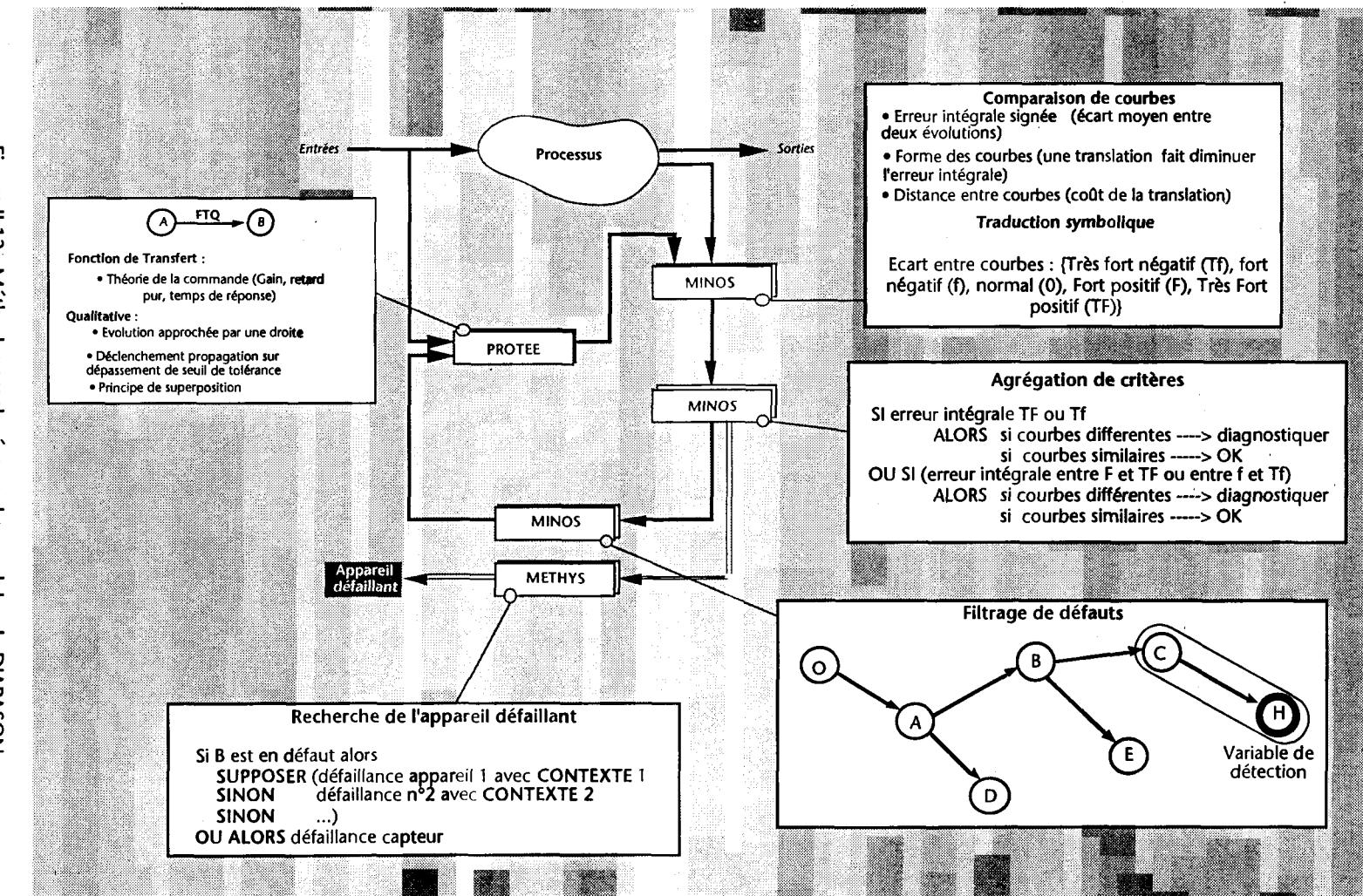
II.4.2.5. Conclusion

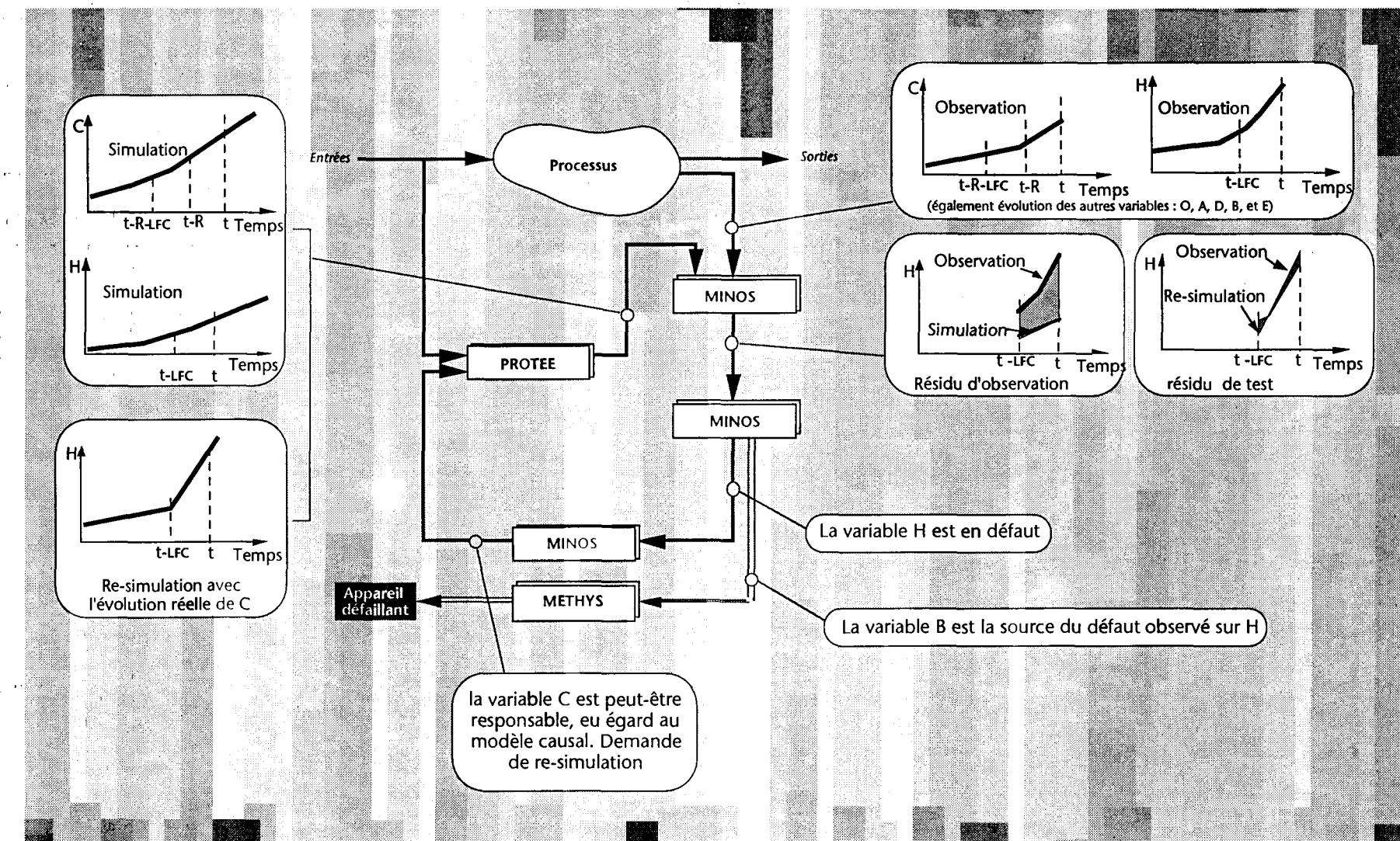
Dans la plupart des cas - pour ne pas dire dans la majorité - un système de diagnostic sera construit par tâtonnement, puisqu'on ne peut savoir, a priori, quelles sont les techniques qui donneront les meilleurs résultats. La conception d'un système de diagnostic revient généralement à réaliser un système spécifique, en raison des choix effectués tout le long des étapes de conception.

Pour tenter de poser les critères généraux de choix d'un système de diagnostic, nous avons essayé de décrire les caractéristiques d'un tel système à un niveau intermédiaire entre les spécifications de besoins, à caractère trop général pour être directement utilisables, et sa réalisation effective, trop spécifique pour servir de guide de choix dans d'autres projets. Il nous a préalablement fallu définir ce niveau de description intermédiaire, en nous gardant de tomber dans l'un ou l'autre de ces écueils.

La description sous forme de tâches génériques permet de découper le processus de diagnostic selon quatre unités primitives de traitement : la **prédition**, l'**interprétation**, la **décision** et l'**identification**. Nous avons caractérisé chacune de ces tâches par un jeu d'entrées/sorties, et précisé, pour chacune d'elles, des exemples de techniques selon deux propriétés des connaissances : résolution et précision. Nous avons également énuméré les critères de choix qui nous paraissent qualifier le système. L'étape de **détection**, qui correspond à l'activité de **surveillance**, peut être qualifiée à travers les critères de **robustesse** (aptitude à ne détecter que les défauts), de **sensibilité** (aptitude à détecter tous les défauts) et de **précoce** (aptitude à détecter les défauts dès leur apparition). L'étape de **localisation**, qui suit l'étape de détection, est qualifiée par le critère d'**isolabilité**, qui caractérise à la fois la capacité à discriminer les candidats et à déduire, dans la liste de candidats, le défaut source.

Les figures II.13 et II.14 récapitulent les méthodes et les résultats de traitement par les modules de **DIAPASON**.





II.5 ERREURS D'INTÉGRATION

Tout comme les erreurs d'évaluation, les erreurs d'intégration intéressent la dimension cognitive de l'activité humaine. Les améliorations envisageables nous semblent relever du **conseil à l'opérateur** une fois la détection et le diagnostic d'un dysfonctionnement effectués. Cet aspect **conseil à l'opérateur** a jusqu'ici été peu étudié, aussi ce qui suit doit être considéré comme une tentative de définition de ses principales caractéristiques.

II.5.1. Approche automaticienne du conseil

Une conception automaticienne du conseil s'attache à définir, au travers des lois de commande à appliquer, les **moyens d'action** sur le processus, c'est-à-dire les **variables sur lesquelles agir**, l'**amplitude** et la **durée** de l'action de correction, ainsi que les moyens d'en estimer les effets. A un défaut répertorié et détectable doit correspondre une loi de commande que l'opérateur n'aurait alors plus qu'à appliquer.

Par exemple, considérons une route à deux voies séparées par une ligne continue et sur laquelle circule une voiture. Faisons l'hypothèse d'un système embarqué et chargé d'informer l'automobiliste de tout écart par rapport à la trajectoire optimale, de le prévenir dès qu'il y a risque de franchissement de la ligne blanche, et de lui indiquer les actions à effectuer pour redresser la trajectoire de la voiture s'il ne l'a pas déjà fait. Si ce type de conseil peut être envisagé dans des cas simplifiés à l'extrême (systèmes comportant très peu de variables de contrôle), elle se révèle impraticable pour les processus industriels. Il faudrait, en effet, que le diagnostic fournisse des résultats précis et certains, alors que l'on ne peut actuellement attendre d'un système de diagnostic qu'un faisceau d'hypothèses de défauts pour une même panne. Dans ce cas, agir sur les causes de défaut paraît alors peu réaliste. D'un autre côté, définir les lois de commande contrebalançant les effets prédicts des défauts détectés pourrait être envisagé à condition d'avoir prévu tous les effets potentiels et de les avoir associés aux causes de défauts ; cette voie se révèle très difficile à réaliser, d'autant plus que l'exhaustivité n'est pas garantie. Une autre voie, encore peu explorée en automatique, est de définir des systèmes de commande robustes aux défauts et capables de s'adapter activement aux changements inopportunus de mode de fonctionnement (cf. [AUBRU 94] pour une synthèse des méthodes de reconfiguration de la commande).

II.5.2. Une approche plus humaine du conseil

Il est sans doute nécessaire de repenser complètement le conseil, qui doit être davantage **tourné vers les opérateurs** : à une approche automaticienne du conseil nous privilégions une **approche cognitive** orientée vers la définition d'une aide à la **représentation de la situation**, qui indiquerait quelles sont les **alternatives** envisageables dans un **contexte donné**. L'objectif du conseil est d'alerter suffisamment tôt l'opérateur d'une situation à venir non conforme à la normale, de manière à lui permettre d'anticiper et de planifier les actions de correction avant qu'elles ne deviennent des actions de récupération. Il s'agit donc de privilégier une **conduite anticipative** plutôt qu'une **conduite réactive**.

Définir ce que doit être ce type d'aide nous renvoie alors à notre vie quotidienne : comment réagissons-nous face à une situation imprévue et redoutée? Quelles sont les informations et/ou les représentations qui nous aident à nous adapter à la nouveauté?

II.5.3. Un exemple

Prenons l'exemple de l'automobiliste dont l'objectif est d'atteindre un point "arrivée" (figure II.15), et considérons que cet automobiliste dispose d'une radio branchée en permanence sur les informations routières qui lui permet de connaître l'état des routes. Cet automobiliste connaît le chemin optimal ou habituel pour atteindre son objectif (itinéraire (1)). On annonce à la radio qu'un début de bouchon est en train de se créer sur la route qu'il est justement en train d'emprunter. Pour éviter d'être coincé, l'automobiliste décide de se définir un nouvel itinéraire (itinéraire (2)), en se gardant la possibilité de revenir sur la route principale dès que la circulation sera rétablie (itinéraire (3)). Dans le cas contraire, il est obligé de poursuivre sur l'itinéraire (4). L'opérateur peut ainsi adapter son itinéraire en fonction de la situation.

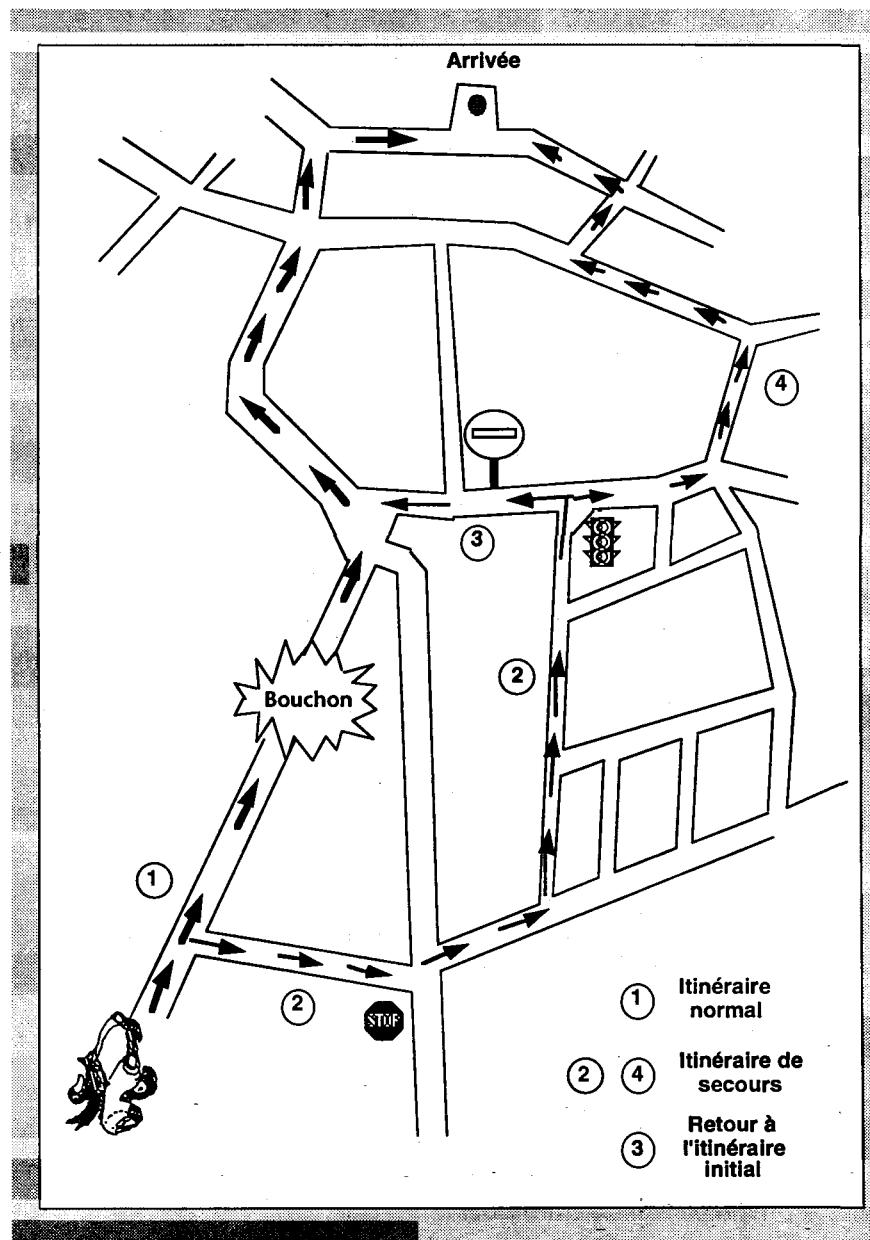


Figure II.15 : Stratégies de conduite dans l'exemple de l'automobiliste.

Ainsi, pour pouvoir être en mesure de décider d'une réorientation, l'automobiliste doit être informé suffisamment tôt (rôle de la radio), il doit connaître sa position actuelle même de manière

approximative, il doit connaître la localisation du bouchon et il doit avoir une idée des itinéraires de la région ; le rôle du plan ou de la carte routière est ici déterminante. Si l'information concernant l'événement redouté parvient tardivement à l'automobiliste, ce dernier a alors toutes les chances de se retrouver bloqué ; dans ce cas, ni le diagnostic ni le conseil n'ont plus leur raison d'être. Il est donc nécessaire que le diagnostic et le conseil aient un caractère précoce pour avoir une quelconque utilité.

Le conseil à l'automobiliste doit donc être fonction du temps et être capable de connaître la position de l'automobiliste par rapport au problème à venir : s'il existe plusieurs itinéraires, le conseil devrait fournir ceux qui restent à choisir si l'automobiliste n'a pas encore décidé de réagir.

Les itinéraires proposés par le conseil doivent tenir compte des contraintes relatives au contexte : dans le cas où l'automobiliste circule de ville en ville, l'aide doit avoir l'ensemble des données relatives aux limitations de vitesse pour chaque tronçon de route ; dans le cas où l'automobiliste circule en ville, l'aide doit avoir en mémoire l'ensemble des données relatives aux rues qui peuvent être fermées de manière périodique (les jours de marché), permanente (les sens uniques) ou temporaires (pour cause de travaux), etc.

L'automobiliste reste entièrement maître de la conduite de son véhicule ; l'aide n'intervient pas au niveau de la manière de conduire son véhicule, c'est à l'automobiliste de respecter la signalisation routière (feux, stop, carrefour giratoire, etc.), et d'adapter sa vitesse en fonction de l'état de la route et des conditions atmosphériques (pluie, neige, verglas, brouillard, jour, nuit, etc.). Les aspects conduite et stratégie sont ainsi bien découplés : l'aide ne doit pas, à notre sens, intervenir au niveau de la conduite du véhicule, mais donner les moyens à l'automobiliste d'atteindre son objectif en lui évitant les erreurs, les arrêts nécessaires pour consulter sa carte, et le stress induit dès qu'il s'agit de définir un nouvel itinéraire.

Dans le cas d'un long trajet, l'automobiliste se fixe des objectifs intermédiaires qui, atteints les uns après les autres, lui permettront finalement de remplir l'objectif qu'il s'est fixé. Par exemple, pour aller à Paris en partant d'Avignon via la route nationale, l'automobiliste se fixe les étapes suivantes : Montélimar, Valence, Lyon, Mâcon, Beaune puis Auxerre. On peut ainsi distinguer deux niveaux stratégiques : entre deux villes, l'automobiliste a généralement peu de manœuvres à effectuer, car la route nationale est relativement droite. Par contre, la traversée d'une ville peut se révéler très délicate, c'est pourquoi un changement d'échelle de l'aide s'impose : l'aide doit alors se focaliser sur les moyens de traverser cette ville. C'est également le cas lorsqu'il s'agit d'éviter un bouchon annoncé : l'aide doit focaliser à l'endroit où se trouve l'automobiliste ainsi que la position du bouchon pour lui fournir un plan détaillé de la région.

La stratégie est considérée comme un séquencement d'états à atteindre ; les distances entre états donnent une idée du coût (horaire, consommation) induit.

II.5.4. Application à la supervision de processus industriels

Par analogie avec l'exemple de l'automobiliste, l'opérateur a besoin d'une description physique des "itinéraires" permis de manière à être à même de développer ses stratégies en ayant un support informationnel adéquat. Il a essentiellement besoin d'un plan ; comme le souligne Hoc, "un plan est une structure schématique et anticipatrice de l'activité, composée de connaissances déclaratives [le plan n'est donc pas un programme exécutable], et constituant un guide à l'activité humaine, de sorte que l'activité pourra s'organiser en suivant la structure du plan" [HOC 87].

Aujourd'hui encore, une telle description n'existe pas. En effet, les schémas de l'installation fournis par l'interface homme-machine sont assimilables à un schéma de fonctionnement de la voiture, avec les

paramètres à vérifier (vitesse, direction, niveau d'essence, niveau d'huile, température moteur, etc.), mais l'objectif de l'automobiliste est autre : il s'agit pour lui d'utiliser la voiture comme moyen de transport pour aller d'une ville à l'autre. C'est d'une toute autre description que le schéma de fonctionnement de la voiture dont l'automobiliste a réellement besoin : il a besoin d'avoir une idée de la route à suivre pour atteindre son objectif, en ayant pour consigne le respect du code de la route, c'est-à-dire les consignes de sécurité (vitesse limite autorisée), et la signalisation routière (feux, stop, priorités, etc.). Pour l'opérateur, le problème est rigoureusement le même : il s'agit d'avoir une description des "itinéraires" qui peuvent être empruntés, avec pour chacun, les contraintes imposées par les ingénieurs (modes opératoires, consignes de sécurité, configurations de marche interdites, règles de conduite, etc.).

En supervision de processus, le diagnostic de défauts et de défaillances fournit une indication sur des difficultés présentes ou à venir ; il est alors comparable à l'information routière qui fait un état de la circulation. La position de l'automobiliste correspond à l'état du processus fourni par l'ensemble des mesures. A notre connaissance, il n'existe pas d'équivalent de la carte routière en supervision. De manière intuitive, une telle représentation devrait à la fois prendre en compte l'ensemble des contextes de conduite, des procédures, de l'objectif principal, de la position actuelle par rapport à l'objectif. A priori, les contraintes d'exploitation sont telles qu'il y a moins de "chemins" possibles, donc qu'un plan de route devrait assez facilement être constitué. Nous proposons d'associer à cette notion d'itinéraire celle de configuration de marche du processus de fabrication, qui indique que l'objectif de l'opérateur est de produire en faisant passer l'installation par différents états de marche (arrêt, mise en régime, régime nominal, etc.). Le nombre de configurations et donc d'itinéraires est limité, c'est ce qui caractérise un processus industriel complexe : d'ailleurs, dans sa description des processus complexes, Reason indique qu'une caractéristique de ces systèmes est qu'il y a très peu de possibilités différentes d'atteindre un but donné" [REASON 93].

Les possibilités de passage entre ces configurations de marche rappelle la notion de plan de route pour l'automobiliste, à partir duquel peuvent être envisagés différents itinéraires (passage de la configuration d'arrêt à celle de marche nominale, en passant par la configuration de mise en régime).

Un itinéraire qui fait, par exemple, passer l'installation de l'arrêt à la marche nominale sera assimilé à une **stratégie**. Cela correspond, pour l'opérateur, à suivre un séquencement d'objectifs intermédiaires jusqu'à atteindre les conditions de marche nominale.

L'aide ne doit pas avoir pour rôle la manière de conduire le processus de fabrication, mais d'indiquer quelles sont les stratégies possibles.

En résumé, le conseil peut être vu comme un niveau supérieur d'aide à l'activité humaine. Il comporte l'ensemble des niveaux d'aide précédemment décrits (aide à la représentation mentale et aide au diagnostic) avec une fonctionnalité particulière : la possibilité de proposer des "chemins" alternatifs, nécessairement sous-optimaux par rapport au "chemin" préféré, mais qui permettent d'éviter l'arrêt de la production tout en respectant les contraintes de sûreté (tout en acceptant, dans une certaine mesure, des pertes de performances). Il ne s'agit pas de définir des procédures à appliquer en regard de la situation diagnostiquée, mais plutôt d'orienter l'opérateur vers des objectifs réalistes en rapport avec la situation telle qu'elle est diagnostiquée. Le conseil est une aide qui se révèle particulièrement utile dans le cas de systèmes complexes : il doit permettre à l'opérateur d'avoir des indications quant aux orientations vers lesquelles il convient de se diriger relativement à des performances, des conditions environnementales et des contextes d'exploitation. Intuitivement, le conseil en supervision de processus doit comporter le diagnostic si possible précoce de la situation, il doit rappeler l'objectif à atteindre, indiquer les modes de fonctionnement et les configurations de marche atteignables.

II.6 ERREURS DE PLANIFICATION

Les erreurs de planification sont le signe d'une mauvaise sélection d'un but, d'une cible ou d'une tâche, de décisions non prises en temps voulu, ou d'actions mal adaptées en regard de la situation. L'amélioration de la capacité à prédire les états futurs suite à des actions de l'opérateur, l'amélioration de la connaissance des contraintes et des zones de flexibilité et le suivi des plans d'action peuvent permettre de réduire ce type d'erreur. Dans le prolongement des aides à l'évaluation et à l'intégration évoquées précédemment, nous dirons que l'objectif d'une telle aide consiste à intervenir au niveau du choix et du suivi des stratégies d'exploitation. Cela est bien en accord avec l'idée selon laquelle l'aide ne doit intervenir qu'au niveau cognitif, donc que l'opérateur reste responsable du processus. Nous appelons ce niveau d'aide cognitive aide à l'anticipation afin de bien souligner le fait que l'aide intervient dans la préparation des plans d'action de l'opérateur. Ses caractéristiques fonctionnelles sont les suivantes : elle doit être capable d'effectuer, en temps réel, un classement des stratégies possibles, en fonction de critères de performance et de sûreté ; l'aide doit être capable de justifier ses conclusions de manière à permettre à l'opérateur de suivre ses "raisonnements". Cette aide doit fonctionner en prenant en compte le temps de manière à offrir à l'opérateur une stratégie adaptée au contexte dynamique de la supervision (d'où l'importance du diagnostic précoce et de l'analyse de conséquences).

II.6.1. Un exemple

En reprenant l'exemple de l'automobiliste, l'aide à l'anticipation pourrait se matérialiser par un itinéraire optimal régulièrement remis à jour en fonction des événements (bouchon, route provisoirement fermée, traversée d'une ville, etc.). Les critères invoqués par l'automobiliste pour choisir un nouvel itinéraire sont généralement : le plus direct, le plus rapide, le plus sûr, etc. L'aide à l'anticipation devrait intégrer certains de ces critères et évaluer chacun des itinéraires pour ne retenir que les plus pertinents. Par exemple, dans le cas où la sûreté est le critère prédominant, l'aide à l'anticipation pourrait fournir l'itinéraire qui s'écarte le plus du bouchon à partir du moment où ce dernier a pu être diagnostiqué de façon certaine (localisation du bouchon et estimation de son étendue).

L'aide pourra se matérialiser sur un écran par une description des routes de la région sur lequel seront indiqués l'itinéraire proposé, la position du bouchon, et la position de l'automobiliste.

II.6.2. Cas des processus industriels

Par comparaison avec l'exemple de l'automobiliste, l'aide à l'anticipation en supervision de processus doit proposer des stratégies alternatives en fonction de l'objectif à atteindre.

Comme pour l'aide à l'intégration, une description des stratégies possibles pourrait avoir la forme d'un plan indiquant les différentes configurations de marche. A la demande de l'opérateur, l'aide devrait proposer une stratégie de conduite menant à une configuration de marche sous-nominale, une configuration de repli, ou bien une configuration d'arrêt.

Les configurations transitoires et les passages d'une configuration de marche à une autre sont celles qui exigent le plus d'attention de la part de l'opérateur. Elles doivent donc être assistées de façon spécifique, comme dans le cas de la focalisation de l'aide sur une ville ou bien dans la région à traverser. Il s'agit donc de décrire des sous-objectifs qui permettront d'atteindre une configuration particulière.

II.7 ERREURS DE COORDINATION

Les erreurs de coordination ont pour causes des problèmes de communication entre agents ou une mauvaise répartition des tâches. Ce type d'erreur pourrait être réduit par un **renforcement du réseau conversationnel**, l'amélioration de la **résolution collective de problème**, ou une **meilleure répartition des tâches**. On cherche ici à améliorer la performance des opérateurs en introduisant dans l'organisation un système doté de capacités de traitement, de dialogue avec les opérateurs et d'action sur le processus. Ce type d'aide prendra le terme générique **d'aide au travail collectif**. Un agent artificiel doté de capacités de résolution de problème, ou capable de prendre en charge certaines tâches humaines de manière autonome, est généralement appelé **système coopératif**.

II.7.1. Communication homme-homme

Un premier moyen d'aider les opérateurs est d'agir au niveau de la **communication homme-homme**, en proposant des moyens informatiques visant spécifiquement les échanges informationnels entre opérateurs, ainsi que la répartition des tâches entre opérateurs. Les solutions que l'on rencontre actuellement, relèvent du domaine de la bureautique, le **groupware** et le **workflow**, mais il est intéressant d'en avoir une idée même succincte. Le **groupware** ou travail en groupe propose une nouvelle organisation du travail. Il repose essentiellement sur les avancées récentes en matière de réseaux informatiques, qui permettent d'échanger de l'information entre postes de travail. Le principe du **groupware** est de "constituer des entités de travail virtuelles avec des personnes (bien réelles) affranchies de contraintes d'espace et de temps" [LEVAN 94]. Les buts sont de faire mieux travailler ensemble un groupe de gens, de faciliter la communication, la coopération et la coordination des tâches. Le **workflow** traduit l'idée d'un partage et d'envoi des tâches aux agents d'une même équipe, par l'intermédiaire d'un système informatique. Ce type d'aide peut constituer un moyen complémentaire de communication qui possède la caractéristique de pouvoir garder la trace des messages échangés entre opérateurs et des tâches qui leur ont été confiées : l'opérateur peut consulter sa "fenêtre de dialogue" qui lui indiquera les tâches demandées par le chef de quart, ou les messages que lui a transmis l'opérateur situé à l'extérieur de la salle de contrôle. Nous ne connaissons pas d'application industrielle de ce type.

II.7.2. Résolution collective de problème

Dans le cadre de la **résolution collective de problème**, qui est d'ailleurs un des centres d'intérêt de l'intelligence artificielle, l'enjeu est de définir les modalités de **Résolution conjointe de problème**. Une caractéristique importante de ces systèmes est la capacité à **rechercher ensemble la solution à un problème**, par un dialogue adapté.

Baker distingue deux niveaux d'interaction homme-machine : le **niveau coopération** et le **niveau collaboration** [BAKER 92] : selon l'auteur, "la **coopération** n'est effective qu'à partir de l'instant où l'aide explique ou justifie et l'opérateur reçoit effectivement ses explications", par ailleurs, "la **collaboration** diffère fondamentalement de la coopération en ce sens qu'elle implique l'**action conjointe et un engagement à maintenir une compréhension mutuelle pour la tâche à accomplir**" [BAKER 92].

Il s'agit de construire ensemble l'explication au travers de chaque échange. De cette façon, les explications peuvent émerger du dialogue par un processus de **négociation**. Les conflits qui peuvent survenir à propos de divergences d'appréciation d'une situation ou de mesures à prendre doivent être gérés par le système d'aide et l'opérateur. Cela doit être l'occasion d'amener l'opérateur à comparer

ses conclusions avec celles proposées par le système et à rechercher les erreurs ayant pu être commises, que ce soit par l'opérateur ou par le système lui-même.

Les travaux dans le domaine de l'explication sont, à notre connaissance, encore largement au stade de la recherche, c'est pourquoi nous ne connaissons pas de système fonctionnant selon ce mode.

II.7.3. Répartition des tâches entre l'homme et la machine

Une autre conception de l'aide à la coordination entre machine et opérateur suppose que chacun des deux surveille et pallie la défaillance de l'autre si celle-ci n'est pas récupérée, ce mode nécessitant l'allocation, ou répartition, dynamique des tâches. C'est ce que Millot nomme la **coopération horizontale** entre l'homme et la machine [MILLOT 88].

Cette approche de l'aide à l'opérateur est du ressort de l'automatique humaine, discipline mixte automatique et ergonomie qui se propose de définir les moyens de répartir de manière dynamique et optimale les tâches entre un opérateur et le système de contrôle-commande afin d'éviter toute surcharge de travail. La mise en œuvre de cette aide est basée sur l'utilisation de modèles d'estimation des performances de l'opérateur qui font notamment appel à la théorie de la commande et à la théorie de l'information [MILLOT 88].

La **répartition dynamique des tâches** se justifie pour des systèmes où les variations de charge de travail de l'opérateur peuvent se révéler importantes. Il s'agit de faire réaliser par une machine un certain nombre de tâches qui normalement sont du ressort de l'opérateur, mais qui ne peuvent l'être pour cause de surcharge cognitive. Une condition d'applicabilité évidente de cette approche est que la tâche à répartir soit automatisable. Ce sont donc les tâches de compensation de perturbations et de mauvais réglage qui sont plus particulièrement visées [KAMOU 89]. Cette approche a également été expérimentée dans le domaine du contrôle aérien [VANDE 94] : le système expert SAINTEX de régulation du contrôle aérien est couplé au répartiteur de tâches SPECTRA, qui distribue automatiquement les tâches à effectuer entre l'opérateur et le système expert.

La répartition des tâches peut se révéler intéressante dans les cas où l'opérateur doit consacrer toute son attention à la résolution d'un problème. Dans ce cas, les tâches routinières peuvent se révéler gênantes ; la répartition dynamique des tâches peut permettre de décharger l'opérateur de ces tâches au profit de tâches cognitives centrées sur le problème. Il ne s'agit pas d'ôter à l'opérateur toutes les tâches de routine, mais de trouver le compromis satisfaisant entre activité de routine et activité en situation dégradée, afin de lui permettre de maintenir un certain niveau de compétence [BAINB 83] [POYET 90].

II.7.4. A propos de la coopération homme-machine

“Pour pouvoir coopérer, l'aide doit pouvoir assister l'opérateur dans la mise en œuvre de ses stratégies, même si elles sont sous-optimales, et proposer, sur demande, la stratégie appropriée” [FALZO 89]. Par ailleurs, l'opérateur reste responsable du fonctionnement du processus et doit pouvoir, à tout moment, porter un jugement sur les conclusions tirées par l'aide [HOC 95]. Cela suppose des modalités de dialogue homme-machine particulières, car il s'agit de convaincre l'opérateur de la pertinence des conclusions du système d'aide [BAKER 92] : “la coopération n'est effective qu'à partir de l'instant où l'aide explique ou justifie et l'opérateur reçoit effectivement ses explications”.

Les concepts de la coopération sont largement encore à l'étude, certains ajoutent même qu'elle n'a pas encore été définie de manière satisfaisante [NOTTE 95]. Hoc considère que la coopération, telle

qu'envisagée actuellement, c'est-à-dire comme l'allocation des tâches entre l'homme et la machine, est soit trop tournée vers la machine, en l'occurrence le **partage des tâches**, soit non satisfaisante, car l'hypothèse de **buts communs** entre homme et machine apparaît illusoire [HOC 95].

La mise en œuvre d'aides correspondant à ce niveau demande donc encore des efforts de recherche importants notamment de modélisation de l'opérateur.

La notion de coopération homme-machine est un thème qui préoccupe de nombreuses disciplines, comme l'intelligence artificielle et l'automatique, mais chacune ayant sa propre vision de la coopération. Devant la multiplicité des définitions de la coopération, il devient difficile de s'en faire une idée précise.

II.8 CONCLUSION

La mise en évidence des dimensions humaines et des erreurs associées constitue le cadre qui nous a servi à décliner une typologie des aides en ligne.

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'apporter quelques définitions parmi lesquelles :

- l'aide à l'opérateur ou aide à la supervision : dénomination générale qui recouvre l'ensemble des aides,
- l'aide à la décision : concerne les aides de la dimension cognitive (aide à la représentation mentale, aide au diagnostic, aide à l'adaptation et aide à l'anticipation),
- l'aide au diagnostic : concerne les aides visant à fournir des informations préalablement élaborées sur l'état du processus,
 - surveillance : activité d'évaluation de certaines caractéristiques du processus et débouchant sur la détection d'un dysfonctionnement,
 - diagnostic : tâche activée après détection d'un dysfonctionnement ; cette tâche consiste à en localiser la cause.

Pour chacune des erreurs humaines mises en évidence, a été associé un type d'aide qui doit permettre d'en réduire les risques d'occurrence. Pour la dimension cognitive, qui nous intéresse plus particulièrement, quatre types d'aide ont été mis en évidence :

- les aides à la représentation mentale recouvrent l'ensemble des travaux visant à fournir des moyens visuels permettant à l'opérateur de mieux appréhender les aspects temporels et de se faire une meilleure image du processus,
- les aides au diagnostic regroupent les travaux effectués notamment dans les domaines du génie des procédés, de la physique qualitative, de la décision, de l'automatique et de l'informatique pour fournir des systèmes de traitement avancé devant permettre d'assister l'activité de l'opérateur dans ses tâches de diagnostic et de récupération,
- les aides à l'adaptation doivent permettre d'assister l'opérateur dans les changements d'orientation, que nous associons à des changements de configuration de marche. Le conseil est vu comme la proposition d'une liste de choix possibles, en fonction de la situation, à charge pour l'opérateur de choisir celle qu'il estime la plus pertinente,
- les aides à l'anticipation sont vues comme des moyens de fournir à l'opérateur une aide au choix de stratégies à adopter suite à l'apparition de dysfonctionnements.

Les deux premiers types d'aide sont actuellement les plus représentés ; nous nous sommes penchés sur l'aide au diagnostic car des applications industrielles commencent à voir le jour. Quant aux deux types d'aide suivants, après avoir constaté qu'il n'existe pas de support informationnel prenant en compte les aspects stratégiques en conduite de processus, nous avons proposé de dégager les caractéristiques qui nous semblaient importantes : ces caractéristiques sont issues d'une analyse comparative des situations de conduite d'une automobile et la situation de supervision de processus industriels. L'exemple de l'automobiliste nous a conduit à envisager la notion de "plan de route" pour l'opérateur, qui doit lui permettre de s'adapter plus facilement aux contextes dynamiques.

Les aides cognitives peuvent être perçues en termes de niveaux d'interaction croissants avec l'opérateur (figure II.16) : l'aide à la représentation mentale est vue comme l'aide regroupant l'ensemble des résultats provenant des autres niveaux ; l'aide au diagnostic est un second niveau d'aide qui est actuellement représenté par un ensemble conséquent de techniques et d'outils de diagnostic des défauts de fonctionnement et dont les résultats sont visualisés à travers l'interface homme-machine ; l'aide à l'adaptation se base sur le diagnostic de la situation pour proposer un

conseil. L'aide à l'anticipation est le niveau de complexité le plus élevé, qui est encore largement à l'état de recherche et qui recouvre les trois précédents types d'aide.

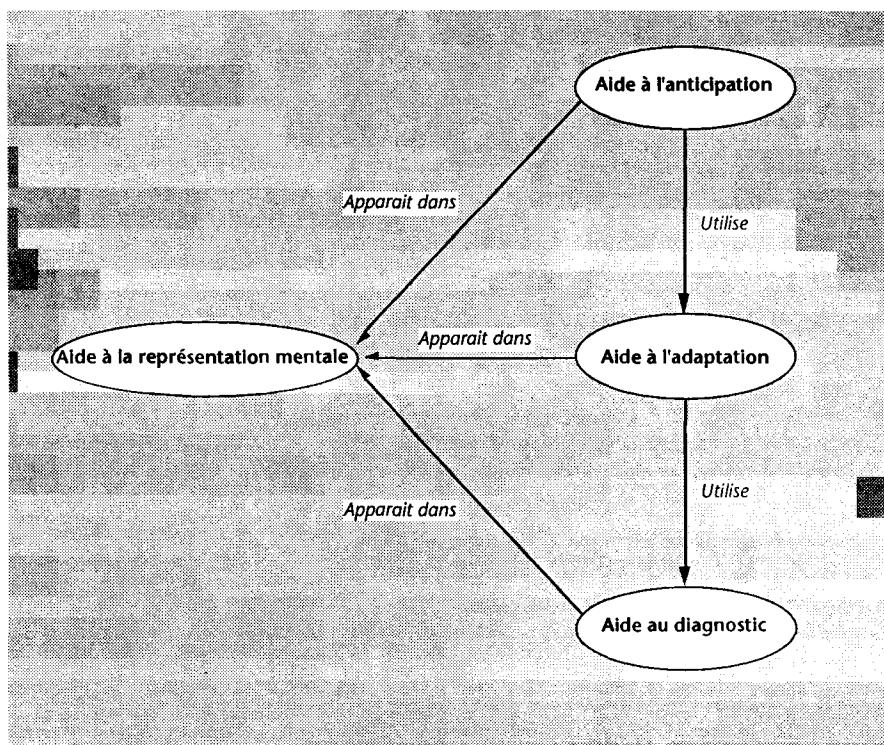


Figure II.16 : Interactions entre les aides du niveau cognitif.

Ainsi avons-nous défini le cadre qui permettra de décliner les premières étapes d'une méthodologie de conception d'aide à l'opérateur, objet du chapitre suivant.

Références bibliographiques

- [ATKIN 93] R.M. Atkinson, M.R. Montakhab, D.J. Woollons, P.A Hogan, C.R. Burrows, K.A. Edge,
DESHC : a diagnostic expert system for hydraulic circuits,
Tooldiag'93, International Conference on fault diagnosis, Toulouse, pp. 882-895, April 5-7, 1993.
- [AUBRU 94] C. Aubrun, H. Noura, F. Hamelin, D. Sauter,
Accommodation des lois de commande des systèmes soumis à des défauts,
Journées d'Etude S3 (Sûreté, Surveillance, Supervision), Stratégies de conduite en présence de défaillances, Ed. LAIL USTL, Paris, le 8 décembre 1994.
- [BAKER 92] M. Baker,
Le rôle de la collaboration dans la construction d'explications,
Explication-1992, Actes des 2èmes Journées Explication du PRC-GDR-IA du CNRS, Sophia-Antipolis, INRIA, 17-19 Juin 1992.
- [BAINB 83] L. Bainbridge,
Ironies of automation,
Automatica, vol. 19, n° 6, pp. 775-779, 1983.
- [BOBRO 84] D. G. Bobrow,
Qualitative reasoning about physical systems : an introduction,
Artificial Intelligence, n°24, pp. 1-5, 1984.
- [BOURS 89] P. Bourseau, G. Muratet,
Certains aspects pathologiques en physique qualitative,
Revue d'Intelligence Artificielle, 3, n°4, pp. 111-132, 1989.
- [BOUSS 93] K. Bousson, F. Guerrin, L. Trave-Massuyes,
Qualitative prediction and interpretation for bioprocess supervision,
Toolgiag'93, Toulouse, April 5-7, pp. 1044-1053, 1993.
- [BRUNE 90] J. Brunet, D. Jaume, M. Labarrère, A. Rault et M. Vergé,
Détection et diagnostic de pannes,
Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Hermès, 1990.
- [CARD 83] S.K. Card, T.P. Moran, A. Newell,
The psychology of Human-Computer Interaction,
Lawrence Erlbaum Ass., Hillsdale, New Jersey, 1983.
- [CASSA 92] J. P. Cassar, M. Staroswiecki, P. Declerck,
Structural decomposition of large scale systems for the design of failure detection and identification procedures,
System Science XI, Wroclaw, Poland, September 22-25, 1992.
- [CHANDR 85] B. Chandrasekaran,
Generic tasks in knowledge based reasoning : high level building blocks for expert system design,
IEEE Expert, vol. 1, N°3, pp. 23-30, 1985.

- [CHANDR 88] **B. Chandrasekaran,**
Generic tasks as building blocks for knowledge-based systems : the diagnosis and routine design examples,
Technical research report, Laboratory for Artificial Intelligence Research, Ohio State University, 88-BC-Routine, June 28, 1988.
- [CHARL 92] **A. Charles,**
Aide à la détection d'anomalies de fonctionnement de systèmes dynamiques : une approche fondée sur des modèles qualitatifs et quantitatifs,
Thèse de l'Université Technologique de Compiègne, 1992.
- [CHAT 93] **J-N. Chatain,**
Diagnostic par système expert,
Traité des Nouvelles Technologies série Diagnostic et Maintenance, Hermès, 1993.
- [CLANC 85] **W. J. Clancey,**
Heuristic classification,
Artificial Intelligence, n° 27, pp. 289-350, 1985.
- [CLANC 86] **W. J. Clancey,**
Viewing knowledge bases as qualitative models,
Department of Computer Science, Stanford University, CA, Report N° STAN-CS-87-1170, 1986.
- [CORDI 91] **B. Cordier, C.T. Huynh, J.Ph Cassar, M. Staroswiecki, E. Herbault**
Supervision system design for a petroleum production application,
IFAC/IMACS-Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Safeprocess'91, R. Isermann editor, vol.2, pp. 289-293, Baden-Baden, September 10-13 1991.
- [COUDO 91] **L. Coudouneau, J-M. Penalva,**
Fault diagnosis in DIAPASON : a continuous process control aid system,
IFAC/IMACS-Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Safeprocess'91, R. Isermann editor, vol.2, pp. 99-104, Baden-Baden, September 10-13, 1991.
- [DAVIS 84] **R. Davis,**
Diagnostic reasoning based on structure and behavior,
Artificial Intelligence, n°24, pp. 347-410, 1984.
- [DE KLE 84] **J. De Kleer, J. S. Brown,**
A qualitative physics based on confluences
Artificial Intelligence Journal, vol. 24, pp. 7-83, 1984.
- [DE KLE 87] **J. De Kleer, J.S. Brown,**
Diagnosing multiple faults,
Artificial Intelligence, n°32, pp. 97-130, 1987.
- [DOYLE 89] **R. Doyle, S. Sellers, D. Atkinson,**
A focused context-sensitive approach to monitoring,
IJCAI, pp. 1231-1237, Detroit, 1989.
- [DUBOI 88] **D. Dubois, H. Prade,**
Théorie des possibilités. Application à la représentation des connaissances en informatique,
2nde édition, MASSON, 1988.
- [DUBUI 90] **B. Dubuisson,**
Diagnostic et reconnaissance des formes,
Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Hermès, 1990.

- [DUNK 91] **W. Dunkel, R. Brockhaus,**
A nonlinear observer fault detection in an airplane,
IFAC/IMACS-Syposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Safeprocess'91, R. Isermann editor, vol.1, pp. 233-238, Baden-Baden, September 10-13 1991.
- [DVORA 89] **D. Dvorak, B. J. Kuipers,**
Model-based monitoring of dynamic systems,
IJCAI'89, Detroit, pp. 1338-1343, 1989.
- [FALZON 89] **P. Falzon,**
Assister l'activité,
AVIGNON 1989, vol. n°1, pp. 383-391.
- [FINCH 87] **F.E. Finch, M.A. Kramer,**
A rule-based approach to fault diagnosis unsing the signed directed graph,
AIChE Journal, vol.33, n°7, July 1987.
- [FREY 92] **P.R. Frey, W.B. Rouse,**
Big graphics and little screens : designing graphical displays for maintenance tasks,
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 22, N°1, January/February 1992.
- [FORBU 84] **K.D. Forbus,**
Qualitative Process Theory,
Artificial Intelligence, 24, pp. 85-168, 1984.
- [GENTI 87] **S. Gentil, S. Feray-Beaumont, P. Caloud,**
Qualitative modeling for supervision systems,
ECAI, Brighton, pp. 335-349, 1986.
- [GREEN 94] **M. Green, E. Hollnagel, Y. Niwa,**
Guidelines for the presentation of emergency operating procedures using advanced information technology,
International Atomic Energy Agency Specialists Meeting on Advanced Information Methods and Artificial Intelligence in Nuclear Power Plant Control Rooms, Halden, Norway, 13-15 September, pp. 86-93, 1994.
- [HAAN 91] **G. de Haan, G.C. van der Veer, J.C. van Vliet,**
Formal Modelling Techniques in Human-Computer Interaction,
Acta Psychologica, 1-3 (78): 27-67, 1991.
- [HOC 87] **J. M. Hoc,**
Psychologie cognitive de la planification,
Sciences et Technologies de la Connaissance, PUG, 1987.
- [HOC 95] **J. M. Hoc,**
La résolution de problème en situation dynamique : apports de la psychologie cognitive et implications sur la conception de la coopération homme-machine,
Journées d'étude S3, Supervision et Coopération homme-machine du GDR Automatique, Paris, les 12-13 Janvier 1995.
- [HOSKI 88] **J. C. Hoskins, D. M. Himmelblau,**
Neural network models for knowledge representation in process engineering,
Comp. in Chem. Engng, 12, pp. 881-892, 1988.
- [IRI 79] **M. Iri, K. Aoki, E. O'Shima, H. Matsuyama,**
An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process,
Computer Chem. Engng, 3, 489-493, 1979.

- [ISERM 89] **R. Isermann,**
Process fault diagnosis on process model knowledge,
IFAC Symposium on Advanced Information Processing in Automatic Control, Nancy, 1989.
- [ISERM 91] **R. Isermann,**
Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing,
SAFEPROCESS'91, vol.1, sept. 10-13, pp. 121-133, Baden-baden, 1991.
- [ISERM 94] **R. Isermann,**
Integration of fault detection and diagnosis methods
IFAC Safeprocess'94, Helsinki University of Technology, Finland, pp.597-612, June 13-16 1994.
- [KAARE 94] **K. Kaarela, J. Oksanen,**
Communicating the safety aspects of industrial plants,
IFAC Safeprocess'94, Helsinki University of Technology, Finland, June 13-16 1994.
- [KAMOU 89] **A. Kamoun,**
Contribution à la répartition dynamique des tâches entre opérateur et calculateur pour la supervision de systèmes automatisés,
Thèse de l'Université de Valencienne, 1989.
- [KOLSKI 93] **C. Kolski,**
Ingénierie des interfaces homme - machine, conception et évaluation,
Traité des Nouvelles Technologies, série Automatique, eds HERMES, 1993.
- [KRAME 87] **M.A. Kramer, Palowitch,**
A rule based approach to fault diagnosis using the signed directed graph,
AIChE Journal, vol. 33, n°7, pp. 1067-1078, July 1987.
- [KUIPE 86] **B. J. Kuipers**
Qualitative simulation
Artificial Intelligence, 29, pp. 289-338, 1986.
- [LAPPA 89] **D. de Lapparent, P. Calloud, Y. Descotte, S. Feray-Beaumont, S. Gentil, V. Taborin, P. Millot,**
Le projet ALLIANCE,
Systèmes experts et conduite de processus, Rapport de synthèse du groupe Systèmes Experts, Masson, pp. 81-94, 1989.
- [LARSS 94] **J.E. Larsson,**
Diagnostic reasoning strategies for means-end models,
Automatica, Vol. 30, N° 5, pp 775-787, 1994.
- [LE BOT 90] **P. Le Bot, R. Solermann, G. Guesnier, G. Beltranda, B. Papin, A. Poujol,**
Development and testing on full-scope simulator of computerized accident operating procedures for the new EDF 1400 MW (N4) class control room
International Atomic Energy Agency, International Symposium on Balancing Automation and Human Action in Nuclear Power Plants, 9-13 July 1990, Munich, Federal Republic of Germany.
- [LEITC 92] **R. Leitch and M. Gallanti,**
Task classification for knowledge-based systems in industrial automation,
IEEE trans. Syst., Man and Cyber., vol. 22, N° 1, January/February 1992.
- [LEPET 87] **M. Lepetit, D. Vernet,**
Physique qualitative et contrôle de processus,
7èmes Journées Internationnales, Les systèmes Experts et leurs Applications, AVIGNON'87, EC2, vol. 2, pp. 1229-1248, 13-15 mai 1987.

- [LEVAN 94] **S.K. Levan, A. Liebmann,**
Le groupware,
Collection Systèmes d'Information, Hermès, 1994.
- [LEYVA 91] **L. Leyval,**
Raisonnement causal pour la simulation de procédés industriels continus,
Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 1991.
- [LIND 82] **M. Lind,**
Multilevel flow modelling of process plant for diagnosis and control,
International Meeting on Thermal Nuclear Power Safety, Chicago, 1982.
- [LIND 89a] **M. Lind,**
Human machine interface for diagnosis based on multilevel flow modeling,
Proc. 2nd European Meeting on Cognitive Science Approaches to Process Control, Siena, Italy, 1989.
- [LUCAS 94] **B. Lucas**
Méthode d'aide à la modélisation par graphes de liaison et utilisation pour le diagnostic qualitatif de systèmes physiques,
Thèse de doctorat de l'Université PARIS XI Orsay, mai 1994.
- [MILL 92] **R. C. Mill,**
Human Factors in Process Operations,
Institution of Chemical Engineers, Robert C. Mill Editor, 1992.
- [MILLOT 88] **P. Millot,**
Supervision des Procédés Automatisés et Ergonomie,
Traité des Nouvelles Technologies, Hermès, 1988.
- [MILNE 87] **R. Milne,**
Strategies for diagnosis,
IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, SMC-17, pp.333-339, 1987.
- [MITCH 86] **C.M. Mitchell, R.A. Miller,**
A discrete control model of operator function : a methodology for information display design,
IEEE Trans. Man, Cybern., Vol. SMC 16, pp 343-357, 1986.
- [MONTM 92] **J. Montmain,**
Interprétation qualitative de simulations pour le diagnostic en ligne de procédés continus
Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 1992.
- [MONTM 92] **J. Montmain,**
Raisonnement approximatif et graphes causaux pour la détection et la localisation de défaillances,
Journées d'études du GRECO "Sûreté, Surveillance, Supervision", Paris, 17-18 novembre 1994.
- [MORIZ 91] **P. Morizet-Mahoudeaux, B. Dubuisson,**
Apport des techniques d'Intelligence Artificielle au diagnostic des systèmes,
Rapport du GR Automatique "Automatique et Intelligence Artificielle", CNRS, Ed. S. GENTIL et D. DUBOIS, 1991.
- [MOTOD 94] **H. Motoda,**
Second-generation expert systems,
IEEE Expert, Vol. 9, n°2, pp. 66-76, April 1994.
- [MOUSS 93] **P. Mousset,**
An alarm filtering system : a causal graph based method,
Tooldiag'93, vol.1, pp. 55-64, 5-7 avril 1993.

- [NORMA 84] **D.A. Norman,**
Stages and levels in human-machine interaction,
Int. J. Man-Machine Studies, 21, pp. 265-375, 1984.
- [NOTTE 95] **D. Notte,**
Pour une conception pluridisciplinaire des systèmes coopératifs homme
machine : mythes et réalités,
Journées d'Etude S3 (Sûreté, Surveillance, Supervision), Supervision et coopération
homme-machine, Ed. LAIL USTL, Paris, les 12-13 janvier 1995.
- [OLSSON 94] **G. Olsson, P.L. Lee,**
Effective interfaces for process operators - a prototype,
J. Proc. Cont., Volume 4, Number 2, 1994.
- [PAASC 93] **R.K. Paasch, A.M. Agogino,**
A structural and behavioral reasoning system for diagnosing large-scale systems,
IEEE Expert, pp. 31-36, August 1993.
- [PALOW 86] **B. Palowitch, M. Kramer,**
The application of a knowledge-based expert system to chemical plant fault
diagnosis,
American Control Conference, pp. 646-651, 1986.
- [PATTO 91] **R.J. Patton,**
A review of parity space approaches to fault diagnosis,
SAFEPROCESS'91, vol.1, pp. 239-255, sept.10-13, Baden-baden, 1991.
- [PATTO 94] **R.J. Patton,**
Robust model-based fault diagnosis : the state of the art,
IFAC symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical
Processes, Safeprocess'94, Vol.1, pp. 1-24, june 13-16, Finland, 1994.
- [POOLE 89] **D. Poole,**
Normality and faults in logic-based diagnosis,
IJCAI, pp. 1304-1310, Detroit, 1989.
- [POYET 90] **C. Poyet,**
L'homme, agent de fiabilité dans les systèmes automatisés,
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, ouvrage collectif
sous la direction de J. Leplat et G. de Terssac, éditions OCTARES Entreprises, pp. 223
- 240, 1990.
- [RASMU 83] **J. Rasmussen,**
Skills, rules and knowledge : signals, signs, and symbols, and other distinctions in
human performance models,
IEEE trans. Syst., Man and Cyber., vol. SMC - 13, N° 3, May/ June 1983.
- [REASON 93] **J. Reason,**
L'erreur humaine,
Traduit de l'anglais par J-M. Hoc, Le travail Humain, PUF, 1993.
- [SEMBU 86] **V. Sembugamoorthy, B. Chandrasekaran,**
Functional representation of devices and compilation of diagnostic problem-
solving systems,
Experience, memory and reasoning, J. L. Kolodner and C. K. Riesbeck, eds.,
Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N. J., pp. 47-73, 1986.
- [SHIOZA 85] **J. Shiozaki, H. Matsuyama, K. Tano, E. O'Shima,**
Fault diagnosis of chemical processes by the use of signed directed graphs.
Extension to five-range patterns of abnormality,
International Chemical Engineering, vol. 25, n°4, pp. 651-659, 1985.

- [SHORT 76]** **E. Shortliffe,**
A rule-based computer program for advising physicians regarding antimicrobial therapy selection,
Ph. D dissertation, Stanford University, 1976.
- [TABOR 89]** **V. Taborin,**
Coopération entre opérateur et système d'aide à la décision pour la conduite de procédés continus : application à l'interface opérateur système-expert du projet ALLIANCE,
Thèse de Doctorat de l'Université de Valenciennes, Mars 1989.
- [TAKED 94]** **K. Takeda, B. Shibata, Y. Tsuge, H. Matsuyama,**
The improvement of fault diagnosis algorithm using signed directed graph,
IFAC SAFEPROCESS'94, Vol. 1, Finland, June 13-16, pp. 368-373, 1994.
- [TSUGE 85]** **Y. Tsuge, J. Shiozaki, H. Matsuyama, E. O'Shima, Y. Iguchi, M. Fuchigami, M. Matsushita,**
Feasibility study of a fault diagnosis system for chemical plants,
International Chemical Engineering, vol. 25, n°4, pp. 660-667, 1985.
- [VANDE 94]** **F. Vanderhaegen, I. Crevits, S. Debernard, P. Millot,**
Human-machine cooperation : toward an activity regulation assistance for different air traffic control levels,
International Journal of Human-Computer Interaction, vol. 6, n°1, pp. 65-104, 1994.
- [VICEN 92]** **K. J. Vicente, J. Rasmussen,**
Ecological interface design : theoretical foundations,
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 22, N°4, July/August 1992.
- [ZADEH 65]** **L.A. Zadeh,**
Fuzzy sets,
Information and control, vol. 8, n°3, pp. 338-353, 1965.

CHAPITRE III :

Propositions méthodologiques

Les propositions méthodologiques décrites dans ce chapitre partent du constat suivant : il est essentiel que les phases initiales du projet spécifient clairement les objectifs afin de réussir la conception de l'aide.

Les spécificités de la conception d'une aide sont dégagées, puis les caractéristiques du projet DIAGPEV évoquées. Les enseignements tirés sont exploités à travers une démarche de conception qui distingue cinq phases.

La première phase consiste en l'identification des objectifs du projet. La seconde phase est la définition du cahier des charges fonctionnel, qui représente le référentiel du projet. La troisième phase est la proposition des solutions techniques qui doivent figurer dans le cahier des charges. Les autres phases concernent davantage la réalisation proprement dite de l'aide : l'étude de faisabilité technique des solutions arrêtées ainsi que le développement proprement dit.

III.1	Introduction	98
III.2	Particularités d'un projet d'aide à l'opérateur	99
III.3	Le projet DIAGPEV et ses enseignements	102
III.4	Découpage du projet	106
III.5	Phase 1 : Spécification des objectifs	107
III.6	Phase 2 : Elaboration du cahier des charges fonctionnel	117
III.7	Phase 3 : Expression des solutions proposées	122
III.8	Les phases suivantes	125
III.9	Conclusion	128
Références bibliographiques		132

III.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre I, nous avons proposé une synthèse des principaux aspects qui interviennent de façon cruciale sur la performance de l'opérateur. Nous avons vu que l'opérateur est une composante de la fiabilité du processus de fabrication et que, d'un autre côté, cette capacité s'accompagne d'inconvénients spécifiques tels que la variabilité, qui est liée à son état (état cognitif, psychologique et physiologique), au contexte de conduite (marche normale, marche dégradée, etc.) et aux conditions de travail (ambiance sonore, visuelle, etc.). Une manière de réduire le risque lié à cette variabilité est d'apporter une aide à l'activité des opérateurs. La spécification de l'aide la plus indiquée se heurte cependant à la diversité des solutions potentielles.

La difficulté majeure, à notre sens, est de parvenir à spécifier les objectifs de l'aide par rapport à des attentes, des besoins, ou des problèmes. En effet, les concepteurs disposent de peu de critères quantitatifs qui permettraient d'orienter le projet et d'évaluer la qualité de l'aide à chaque phase de la conception. Jusqu'à présent, la grande majorité des projets d'application ont été menés avec comme objectif la mise en application sur cas réels de techniques issues des recherches. Peu de travaux ont, par contre, porté sur la définition d'une méthodologie de conception permettant de passer du stade de l'innovation, de la démarche exploratoire au stade de la mise en œuvre effective. Une méthodologie est définie comme l'étude systématique, par observation, de la pratique scientifique, des principes qui la fondent et des méthodes de recherche qu'elles utilisent" (Petit Larousse illustré).

D'une approche de conception purement technique de l'aide, il nous paraît maintenant souhaitable de poser les bases d'une approche visant d'abord et avant tout à cerner les objectifs afin d'être en mesure de concevoir une aide répondant enfin à des spécifications précises. Nous proposons, dans ce chapitre, de considérer comment le développement d'une aide peut se ramener, sous certaines conditions, à une démarche de conception "classique".

Les recommandations qui figurent ici sont notamment issues de l'expérience du Laboratoire d'Informatique Appliquée en recherche et développement d'outils entrant dans le cadre des aides au diagnostic ; notre implication dans le projet DIAGPEV, en particulier, nous a permis de tirer quelques enseignements sur la manière d'aborder un tel projet sur une installation industrielle.

Ce chapitre n'a pas l'ambition de décrire une méthode de conception éprouvée, nous essayons plutôt de tracer des voies qui nous semblent intéressantes et relever d'une démarche vers la mise en application industrielle de techniques de traitement destinées à assister le travail de l'opérateur.

Une méthodologie est considérée comme une organisation de méthodes, de techniques et d'outils hétérogènes permettant d'atteindre un objectif donné. Certains auteurs ajoutent une composante supplémentaire, celle de "gestion de projet" qui représente la stratégie d'atteinte de l'objectif et qui organise les méthodes entre elles, met en œuvre des techniques particulières et utilise des outils de construction [DUBRI 95].

Elle n'a pas le caractère universel que l'on associe à une méthode, qui est un plan d'action à appliquer (il y a une logique d'action) ; une méthodologie trace les contours d'un plan, et l'on y fait appel quand on n'a pas de méthode prête à l'emploi pour parvenir au résultat. Une méthodologie est donc le fruit de tâtonnements qui caractérisent l'apparition de nouveaux champs d'action, en l'occurrence l'aide à l'activité de l'opérateur.

III.2 PARTICULARITÉS D'UN PROJET D'AIDE À L'OPÉRATEUR

L'hypothèse qui sous-tend notre travail est qu'apporter une aide à l'opérateur, c'est apporter des solutions pour éviter que ses erreurs n'entraînent de conséquences graves sur la performance et la sécurité. Mais la multiplicité des erreurs ainsi que leurs causes potentielles suppose des aides également multiples. Vers quel type d'aide s'orienter plus particulièrement ? Une aide informatisée est-elle la plus indiquée ? Quel est le cycle de développement le plus approprié ?

Pour cerner correctement les fonctions d'un produit technique, l'approche la plus immédiate consiste à utiliser les méthodes déjà éprouvées d'analyse de la valeur, qui préconisent l'analyse fine du besoin et des fonctions recherchées : il s'agit de décomposer les services attendus en autant de services élémentaires et d'affecter, à chacun d'eux, des niveaux de contrainte ; ces derniers permettront ensuite de hiérarchiser les services auxquels le produit devra satisfaire en priorité selon des critères déterminés. Un premier principe stipule que le besoin est correctement identifié par analyse des services demandés ; un second principe stipule qu'à chacun de ces services peut être associée une caractéristique évaluable, qui permettra ensuite de vérifier l'adéquation entre spécifications et réalisation effective, en cours de développement du produit. Autrement dit, en analysant finement les besoins, on parvient à définir les fonctions attendues ainsi que les critères techniques de performance auxquels le produit devra se conformer. Le produit réalisé sera évalué, en fin de réalisation, par comparaison entre les spécifications contenues dans le cahier des charges et les caractéristiques du produit.

Ces deux principes sont difficilement transposables au domaine de l'aide à l'opérateur, car :

- l'analyse de besoins suppose que les contours du produit soient à peu près connus, la démarche d'analyse consistant en réalité à préciser les caractéristiques techniques les plus importantes ; l'aide à l'opérateur n'est pas une réponse évidente à un besoin, car elle s'insère dans un environnement organisationnel complexe qu'est l'entreprise,
- comment définir la notion de **qualité** - de valeur - pour une aide à l'opérateur ? S'agit-il d'un service à l'opérateur de production ? S'agit-il d'un service pour le personnel de la gestion technique ? S'agit-il d'un service à rendre en direction de la gestion financière ? S'agit-il d'un service à rendre pour l'ensemble des activités de l'entreprise ? Ces questions ne sont pas triviales et demandent une sérieuse réflexion,
- le système d'aide devant essentiellement interagir avec les opérateurs et améliorer leur performance, il est difficile de lui attribuer des critères de qualité quantifiables,
- en vertu du précédent point, la distinction entre **fonction d'usage** (les services que le produit doit remplir en priorité) et **fonction d'estime** (les services qui améliorent l'image du produit) n'est pas claire,

L'application des méthodes normalisées d'analyse fonctionnelle des besoins s'avère mal adaptée puisque les fonctions d'aide ne peuvent être décomposées en fonctions évaluées individuellement par des critères techniques, ou tout au moins le sont-elles difficilement. En fait, la conception d'une aide à l'opérateur dépasse le cadre de la conception de systèmes techniques devant remplir un certain nombre de fonctions bien différenciées, c'est pourquoi, il nous faut

- mettre en œuvre d'autres méthodes que l'analyse fonctionnelle de besoins,
- admettre que l'aide s'insère dans une organisation dont les enjeux dépassent les besoins de l'opérateur,
- élargir le champ du problème de l'aide à l'opérateur à celui de l'entreprise dans son ensemble.

Considérons l'entreprise comme une organisation d'acteurs ayant chacun une activité spécifique : gestion financière, gestion technique, production et maintenance (figure III.1). Voici le cadre dans lequel nous proposons d'inscrire un projet d'aide.

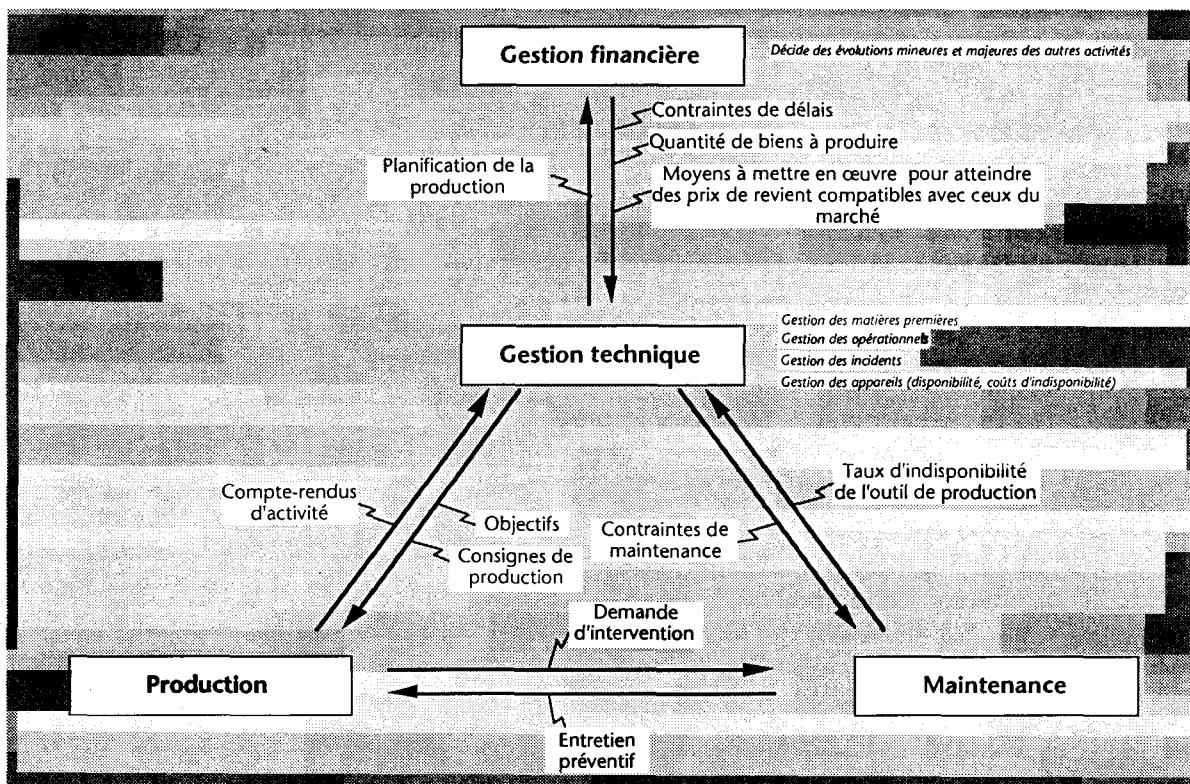


Figure III.1 : Organisation des acteurs de l'entreprise.

Chacune des activités de l'entreprise a ses préoccupations propres, ses besoins et ses insatisfactions, la difficulté étant d'en déterminer les points de convergence : définir une aide qui remplisse un rôle économique (l'aide doit permettre une diminution des coûts), définir une aide qui facilite la gestion technique du processus de fabrication (accroissement de la disponibilité par détection rapide des dysfonctionnements, par exemple), définir une aide qui améliore l'activité de supervision, et définir une aide qui facilite les opérations de maintenance. Voilà une manière d'aborder le problème de la justification de l'aide.

En gestion financière, les préoccupations sont à caractère stratégique et économique. Il s'agira de convaincre qu'une aide peut répondre, dans une certaine mesure, à ce type de préoccupations. Au niveau de la gestion technique, l'apport d'une aide est évaluée à travers des données de

maintenabilité et de disponibilité du processus de fabrication ; elles sont obtenues par recensement des données concernant les défaillances, les temps de détection de ladite défaillance et le temps au bout duquel la défaillance est réparée. Les apports d'une aide ne s'évaluent pas seulement par des critères de sûreté de fonctionnement, mais également par des critères de qualité, tels que le taux de rejet correspondant aux produits hors norme. Ces gains ont des conséquences directes sur l'activité de gestion financière de l'entreprise, en termes de coût d'exploitation et de coût de production.

L'apport de l'aide au diagnostic de dysfonctionnements est généralement bien perçue par les industriels. Mais faut-il considérer que c'est l'aide qui convient le mieux à l'ensemble des situations ? si l'aide au diagnostic apporte un plus certain par rapport aux informations fournies par le SNCC, on ne peut prétendre que cela réponde de manière générale à l'ensemble des besoins. La thèse que nous soutenons est que l'aide au diagnostic doit être considérée comme un type d'aide parmi d'autres, et qui répond à des besoins spécifiques qui doivent être mis en évidence.

Les difficultés auxquels peut se heurter le concepteur d'un système d'aide sont :

- la difficulté à replacer la problématique de l'aide à l'opérateur dans le cadre global de l'entreprise (fournir une aide à l'opérateur pour remplir quels objectifs, quelle finalité ?),
- la nécessité de prendre en compte la composante humaine dans le processus de conception, tout simplement parce que le système est destiné à fortement interagir avec l'opérateur (quels sont les critères d'acceptabilité de l'aide du point de vue de l'opérateur ?),
- la nécessité de passer par des étapes de maquettage et de prototypage successifs pour s'assurer que l'aide intègre davantage les préoccupations des opérateurs (quand et comment faire intervenir les utilisateurs dans la boucle de conception ?),

Du point de vue du concepteur de l'aide, la conception s'apparente à un problème ouvert, c'est-à-dire que la solution n'est pas contenue dans les données du problème, par opposition à un problème fermé où les données qui accompagnent un problème, par exemple de calcul de l'enthalpie d'une réaction chimique, orientent, en quelque sorte, la stratégie de résolution puisque l'on sait qu'il n'existe qu'une seule solution. Dans le cas du projet d'aide, cette solution est plutôt à construire. D'où l'intérêt de se baser sur l'expérience de projets analogues, comme par exemple le projet DIAGPEV.

III.3 LE PROJET DIAGPEV ET SES ENSEIGNEMENTS

Le projet **DIAGPEV** a démarré en 1991 ; c'est un projet interne au CEA qui vise la conception d'une aide aux opérateurs de conduite et appliquée à l'installation Prototype Evolutif de Vitrification.

Le prototype de vitrification de Marcoule (P.E.V.) est une installation fonctionnant en inactif (ne traitant pas de matières radioactives réelles mais simulées) à l'échelle 1. La mission assignée à PEV consiste à **réaliser des essais tests pour valider des choix de procédé**, avant une application sur des installations industrielles réelles.

Le prototype P.E.V. permet :

- de produire des verres inactifs représentatifs des verres contenant des déchets nucléaires,
- d'aider à la détermination d'une formule de verre en mettant en lumière les contraintes d'ordre technologique qui sont à prendre en compte dans le choix d'une composition de verre adaptée à une solution de produits de fission donnée,
- de caractériser l'influence de la composition en matières premières et des paramètres de conduite sur la qualité du verre. Cette caractérisation passe par une étude de fiabilité au cours d'essais de longue durée (de deux à trois semaines, en règle générale) où seront déterminées les limites de variation des principaux paramètres de conduite du processus,
- de rechercher les conditions optimales d'élaboration du verre.

III.3.1 Description du projet

Le projet **DIAGPEV** a principalement un caractère prospectif ; il s'agit d'appliquer en grandeur réelle des fonctionnalités de diagnostic, afin de démontrer l'intérêt de ce type de fonctionnalités aux acteurs des activités de gestion financière qui désirent ainsi mieux en percevoir les potentialités économiques et stratégiques.

III.3.1.1 Les motivations

Le projet **DIAGPEV** est motivé par :

- la valeur ajoutée espérée vis-à-vis des clients et partenaires industriels,
- le souhait d'évaluer l'apport de techniques nouvelles en grandeur réelle,
- l'amélioration de l'exploitation du PEV (qualité du verre, fiabilité du processus de fabrication, disponibilité de l'installation),
- la volonté de diminuer les coûts d'exploitation (était notamment évoquée la réduction du travail posté),

III.3.1.2 Les besoins

En raison du caractère prospectif du projet **DIAGPEV**, le recueil des besoins n'était pas un impératif absolu. Nous passons tout de même en revue les besoins recueillis au cours de différents entretiens.

Les besoins exprimés par la gestion financière ont davantage trait à la capitalisation des acquis en matière d'exploitation du procédé de vitrification.

Les principaux besoins formulés par la gestion technique (les ingénieurs d'exploitation) sont :

- la synthèse des mesures issues des essais pour capitaliser et gérer l'archivage des données de campagnes,

- la maîtrise accrue des paramètres de fonctionnement pour garantir la qualité du verre produit.

Les opérateurs de conduite ont des besoins plus immédiats, en particulier une meilleure gestion des alarmes, et la résolution des problèmes de perte temporaire de certaines mesures. Les opérateurs supervisent le PEV en salle de contrôle et en local, où de nombreuses mesures (notamment les débits d'eau de refroidissement) ne sont pas transmises au SNCC. La présence de l'opérateur est requise pour effectuer les prises d'échantillons, surveiller le bon fonctionnement général des appareils, et effectuer les tâches requises pendant la phase de coulée, qui est une phase transitoire du processus (se référer en annexe II).

III.3.1.3 Les contraintes

Les contraintes de développement du système de diagnostic sont :

- le procédé est semi-continu (cycles d'alimentation et de coulée qui perturbent les paramètres de fonctionnement de la vitrification),
- l'exploitation du processus dans de nombreuses configurations de marche,
- une évolution continue de l'instrumentation, au gré des besoins en recherche et développement,
- des perturbations aléatoires mais bien connues, qui se traduisent par des pertes de mesure en acquisition ; ce phénomène peut persister sur plusieurs périodes d'échantillonnage,
- la migration du système de contrôle-commande en cours de projet (remplacement du système de contrôle-commande TDC 2000 par le TDC 3000 qui est plus récent et de coût de maintenance très inférieur),
- la prise en compte des caractéristiques de l'installation de production de déchets réels en début de projet de manière à faciliter la conception d'un système d'aide au diagnostic sur cette seconde installation.

III.3.1.4 Les solutions proposées

Le Laboratoire d'Informatique Appliquée se propose de mettre en application les fonctionnalités de détection, de filtrage et de diagnostic de dysfonctionnements, mises au point dans le cadre du programme DIAPASON.

III.3.1.5 Les risques

Les risques sont multiples :

- l'installation n'est pas conçue pour recevoir un système de diagnostic ; un aménagement est nécessaire pour "brancher" le futur système d'aide,
- les techniques mises en œuvre dans DIAPASON peuvent être mal adaptées au PEV (le caractère semi-continu de la partie vitrification rend problématique l'emploi du modèle PROTEE, qui n'est valide que dans une zone restreinte du domaine de fonctionnement du processus et surtout qui est conçu comme un simulateur de systèmes continus),
- le programme de changement de système de contrôle-commande rend plus complexe la gestion du projet (de nombreuses modifications sont prévues, notamment au niveau de l'instrumentation) ; cela nécessite une collaboration étroite avec la maintenance et la gestion technique, ainsi que des contraintes supplémentaires de délais de migration,
- le PEV fonctionne sur le même principe que l'installation réelle à La Hague, mais de nombreuses particularités doivent être prises en compte. Il faut, en effet, considérer les spécificités de chaque installation, non pas seulement sous l'angle des appareils, mais également de l'organisation du

- travail au niveau de la production (conduite essentiellement sur écrans, répartition des rôles au sein de l'équipe, etc.), les différences dans les modes d'exploitation (exploitation par campagnes d'essais pour l'installation PEV),
- la part de recherche et développement impliquée est importante : la conception implique notamment des études de faisabilité technique pour chacune des fonctions retenues,

Visiblement, les risques sont importants. Etant donné que ce projet doit évoluer dans un cadre de recherche et développement, ces risques sont admis.

III.3.1.6 La gestion du projet

Le projet DIAGPEV est organisé en quatre lots, qui correspondent à des catégories de tâches à réaliser :

- **étude du PEV et constitution d'un référentiel technique** : il s'agit de répertorier les connaissances disponibles, de construire une représentation regroupant les principales caractéristiques fonctionnelles, structurelles (l'installation, son instrumentation, etc.), et opérationnelles du PEV et de son exploitation (la gestion par les opérateurs), de manière à constituer une base de connaissances de référence pour l'ensemble des intervenants du projet. La modélisation du PEV selon la méthode SAGACE est retenue (se reporter au chapitre IV qui en présente un descriptif) ; l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets selon la méthode AMDE est prévue, de même que l'analyse des tâches opérateur,
- **définition de la structure d'accueil informatique** : le choix de la structure informatique est fait en fonction de l'installation de production réelle. Il s'agit de choisir un des deux environnements industriels de supervision G2 ou RTWORKS, qui intégrera les modules PROTEE, MINOS et METHYS ; il s'agit ensuite d'étudier la connexion d'une machine autonome sur le SNCC du PEV, puis de concevoir l'interface homme-machine, d'intégrer les modules dans l'environnement et d'établir la connexion en ligne du système d'aide et du SNCC,
- **réalisation à court terme d'un système de diagnostic** : il s'agit de spécifier les besoins logiciels, de réaliser les modules PROTEE, MINOS et METHYS sur une partie réduite de l'installation, de mettre au point l'ensemble des modules, puis de former les opérateurs,
- **réalisation complète du système de diagnostic** : il s'agit ici de reprendre les jalons du lot précédent et d'étendre le système de diagnostic à l'ensemble du PEV.

III.3.2 Enseignements

Le projet DIAGPEV a essentiellement un caractère exploratoire, c'est-à-dire que l'on cherche à évaluer des fonctionnalités nouvelles de diagnostic en situation réelle, par le biais de la mise en application de techniques directement issues de recherches sur une installation de taille modérée. C'est un projet qui répond d'abord à des **motivations de la gestion financière** et pas nécessairement aux besoins immédiats des activités de gestion technique, de production et de maintenance.

Si l'on se place dans une autre perspective, celle de la conception d'un système d'aide dans une logique industrielle, il faut d'abord se demander si les caractéristiques du système de production s'y prêtent :

- accès difficile à l'installation (délocalisation de la salle de contrôle et de l'installation, installation dont l'accès est réglementé, comme dans le nucléaire),
- installation traitant de grandes quantités de matière,
- procédé comportant une part de risque (emballage de réaction, et plus généralement les phénomènes à "évolution exponentielle" [REASON 93]), qui implique des dispositions

- particulières de sécurité, des temps de réaction les plus courts possibles et la mise en place de stratégies adaptées,
- exigences de qualité sévères (produits devant répondre à des spécifications précises, dont les zones de tolérance admises sont étroites),
- installation fortement automatisée (exploite peu la dimension opératoire des opérateurs),

Un des inconvénients de l'analyse de besoins est de supposer à peu près cerné le produit qui devra être réalisé (le besoin contient sa réponse attendue, en quelque sorte : le besoin de capitalisation des mesures sur le PEV suppose la mise en place d'un système informatique dédié, restent à définir le type de machine, le type de support de sauvegarde, le coût, etc.).

Quand doit-on introduire l'idée d'une aide à l'opérateur? Cette interrogation est en réalité cruciale sur la manière d'aborder le problème de la justification de l'aide : on peut décréter qu'il faut une aide puis la réaliser, en supposant que son utilité émergera en fin de projet ; on peut également se demander quels sont les besoins exprimés ou latents, et peuvent-ils être résolus par une aide en particulier ou bien est-il plus pertinent de rechercher d'autres solutions ?

Nous privilégierons la seconde approche, qui est certes plus exigeante quant aux efforts qu'elle suppose, mais ne fait aucune hypothèse a priori sur les solutions à envisager. L'ensemble des acteurs de l'entreprise doit être impliqué, cela nécessite la hiérarchisation des besoins selon les acteurs interrogés (gestion financière, gestion technique, production et maintenance).

III.4 DÉCOUPAGE DU PROJET

Nous insisterons plus particulièrement sur l'importance de nous assurer que les spécifications de l'aide ont été correctement mises en évidence. C'est, selon nous, la phase critique dans un projet d'aide, car en phase de développement, les étapes successives de prototypage ne servent qu'à ajuster les caractéristiques de l'aide, c'est-à-dire rattraper les lacunes d'une spécification partielle (le cycle de développement en spirale se prête bien à des prototypages successifs), mais c'est bel et bien la phase de spécification qui donne l'orientation générale au projet : l'adoption d'un cycle de développement en spirale ne dispense aucunement de correctement orienter le projet, au contraire ... Le prototypage est presque une nécessité pour ces systèmes informatiques qui ont pour principale raison d'être de fournir un support informationnel à l'opérateur. C'est généralement un moyen d'orienter, de manière empirique, les options choisies et de les valider au travers du filtre que sont les opérateurs.

Bien entendu, le développement du système pose des problèmes de faisabilité technique, que nous avons d'ailleurs évoqués dans le chapitre II, mais ce chapitre sera principalement centré sur les aspects spécification et orientation préliminaire.

Le processus de conception sera envisagé au travers des phases suivantes :

- en phase 1, la spécification des objectifs,
- en phase 2, la rédaction du cahier des charges fonctionnel au niveau duquel sont définies les spécifications de l'aide,
- en phase 3, l'expression des solutions proposées en termes de choix des techniques et d'environnement,
- en phase 4, l'étude de faisabilité des diverses solutions et conception préliminaire engagée avec la construction du référentiel de connaissances correspondant,
- en phase 5, le développement des solutions, c'est-à-dire la réalisation des modules et l'intégration dans l'environnement logiciel choisi,
- en phase 6, l'industrialisation du système, c'est-à-dire la mise en ligne du système d'aide.

Chacune de ces phases est abordée, dans les paragraphes suivants.

III.5 PHASE 1 : SPÉCIFICATION DES OBJECTIFS

Nous partons du principe que le choix du produit à concevoir n'est pas arrêté et qu'il s'agit, dans cette phase, d'en définir les caractéristiques générales.

La démarche préconisée consiste à envisager l'ensemble des approches, y compris l'analyse fonctionnelle de besoin, pouvant servir à mettre en lumière les objectifs. Utilisées de façon complémentaires, ces approches doivent permettre de s'assurer que les caractéristiques du système à concevoir seront correctement spécifiées.

Mis à part le recueil des motivations de la gestion financière, nous avons recensé cinq méthodes d'analyse :

- spécification des aides à apporter relativement à des tâches confiées aux opérateurs, qualifiée **d'approche par les tâches**,
- prise de contact avec la gestion technique pour essayer de tracer les contours du projet, c'est-à-dire adopter une **approche par les attentes**,
- réponse à des erreurs humaines, c'est-à-dire adopter une **approche par les problèmes**,
- définition des améliorations à apporter pour la gestion technique, c'est-à-dire adopter une **approche par les besoins**,
- spécification du type d'aide à concevoir, c'est-à-dire adopter une **approche par les fonctionnalités**.

L'identification du projet revient alors à **tracer les contours** grâce aux attentes et aux tâches qu'ils souhaiteraient voir assistées, à détailler par une analyse des besoins puis à vérifier par l'analyse des problèmes posés aux opérateurs. Cela permet notamment de mettre en évidence les contradictions **avant le lancement effectif du projet**.

III.5.1 Recensement des motivations

Les acteurs de l'activité de gestion financière s'intéressent principalement aux aspects économiques et stratégiques de l'entreprise. Ce sont eux qui décident des grandes orientations, des évolutions mineures et majeures à apporter au niveau des activités de gestion technique, de production et de maintenance. Recueillir leurs motivations est une étape initiale dans tout projet : il s'agit de déterminer quels sont les objectifs généraux qui les intéressent plus particulièrement, quelles sont leurs insatisfactions par rapport à leurs préoccupations principales - les coûts d'exploitation, les coûts de maintenance, la valeur commerciale du produit fabriqué, la position stratégique de l'entreprise, etc.

Il s'agit ainsi de placer le projet d'aide dans le contexte économique et stratégique de l'entreprise.

III.5.2 Approche par les tâches

Pour avoir une idée du profil de tâches les plus fréquemment effectuées, une approche peut consister à faire l'analyse des tâches effectuées par les opérateurs (tâches de transition d'états, tâches de suivi, tâches de diagnostic et tâches de compensation), et à indiquer celles qui impliquent plus particulièrement l'exécution de certaines actions (dimension opératoire), celles qui nécessitent la coordination entre opérateurs (dimension collective), et celles qui demandent l'élaboration d'une décision (dimension cognitive).

La fréquence d'occurrence des types de tâches est une caractéristique du processus de fabrication tel qu'il a été conçu (pour le PEV, les tâches de transition sont régulières), mais les dimensions impliquées dans la réalisation de chacun des types de tâches sont caractéristiques des opérateurs. Ce qui signifie que l'on peut ainsi espérer avoir une "empreinte" de l'interaction complexe entre l'opérateur et le processus de fabrication. Cette étude doit servir à dégager des tendances sur la façon dont les opérateurs gèrent le processus de fabrication et les dimensions de l'activité les plus sollicitées.

Cette analyse permet d'indiquer où se concentre principalement l'activité de l'opérateur puisqu'une tâche peut requérir les trois dimensions. Elle ne permet pas de privilégier une dimension vis-à-vis des autres. C'est plus une analyse pour comprendre que pour spécifier une aide.

Cependant, l'analyse pourrait être menée en plaçant en salle de contrôle des observateurs chargés de répertorier les comportements des opérateurs dans la grille décrite dans le tableau III.1. Ce tableau de correspondances entre types de tâches et dimensions de l'activité fournit une image des zones d'activité les plus sollicitées par l'opérateur dans le cadre de ses tâches. Il nous semble que cette analyse est faisable et qu'elle pourrait fournir de bons indicateurs de la répartition de l'attention de l'opérateur, et de l'importance de la communication entre opérateurs.

Tâches de compensation	Tâches de diagnostic	Tâches de suivi	Tâches de transition	Dimensions
+++	+++	++	+++	collective
++	+++	+	+	cognitive
+++	++	+++	+++	opératoire

Tableau III.1 : Tableau de correspondances entre tâches et dimensions (tiré de l'étude du PEV).

Ce tableau est issu d'une analyse qualitative des tâches opérateur en salle de conduite du PEV. Ce n'est qu'une première approche, mais qui fournit tout de même des indications intéressantes, elle met notamment en évidence les dimensions de l'activité les plus sollicitées. Il est intéressant de constater que la dimension collective, de même que la dimension opératoire, interviennent de manière importante dans tous les types de tâches. En effet, ce prototype sert à effectuer des essais technologiques par campagnes et il est soumis à de fréquents changements de régime de fonctionnement (se reporter à l'annexe II). Une étude statistique (fréquence des interventions de l'opérateur dans chacun des types de tâches et mise en œuvre de chacune des activités) devrait permettre d'affiner cette répartition et en donner ainsi une image plus proche de la réalité de cette répartition.

Une approche par les tâches revient à déterminer quels sont les types de tâches qui sollicitent le plus une dimension de l'activité opérateur par rapport aux autres. Si cette cartographie s'avère intéressante pour avoir une vue instantanée de la répartition des activités humaines selon les tâches,

celle-ci est susceptible de varier en fonction de l'expérience. Même s'il était possible de déterminer quantitativement la contribution de chacune des dimensions pour chacun des types de tâches, il ne nous paraît pas souhaitable d'orienter le projet d'aide uniquement là-dessus.

III.5.3 Approche par les attentes

L'approche par les attentes consiste à envisager une aide privilégiant une ou plusieurs dimensions de l'activité de l'opérateur :

- il peut être question de centrer le projet sur l'amélioration des conditions d'exécution des procédures, ce qui intéresse spécifiquement la **dimension opératoire**,
- le projet peut être orienté vers des **aides à la décision**, qui correspondent à la **dimension cognitive**,
- enfin, le projet peut être centré sur l'amélioration des conditions du travail collectif, qui relève spécifiquement de la **dimension collective**.

Les résultats de l'analyse décrits dans le tableau III.1 peuvent être exploités pour déterminer quelles sont les dimensions les plus sollicitées. En partant de l'hypothèse selon laquelle la dimension la plus sollicitée pour l'ensemble des types de tâches indique le "lieu" où la charge de travail est la plus importante, il est légitime de s'orienter vers une aide à cette dimension.

Par exemple, dans les centrales nucléaires, l'activité des opérateurs est restée très opératoire de manière à :

- éviter la complexification que l'automatisation à outrance aurait pu engendrer,
- maintenir le niveau de connaissances des opérateurs en leur évitant d'entrer dans la routine,
- éviter de placer l'opérateur dans une situation de décision qui risque de conduire à l'accident.

Ainsi, la dimension opératoire des opérateurs est particulièrement sollicitée ; on s'en rend compte par le quantité de procédures existantes et régulièrement remises à jour. Les aides que l'on trouve le plus souvent sont justement des aides à l'exécution de procédures (se référer au chapitre II).

Cette approche peut donc constituer un cadrage du projet ; elle est réalisée par des entretiens avec les personnes qui ont initié le projet et également avec les exploitants.

III.5.4 Approche par les problèmes

Les problèmes exprimés par la gestion technique sont en général les révélateurs d'un mauvais fonctionnement du processus : les incidents qui augmentent les coûts et réduisent le taux de disponibilité de l'installation, un niveau de qualité des produits difficilement maintenu. Elles peuvent avoir pour causes : des erreurs de conception, des erreurs humaines (des activités de production ou de maintenance), des défaillances techniques, un mauvais encadrement, ainsi que des causes externes au système de production (matières premières non conformes, par exemple) [MILL 92].

Nous avons choisi d'axer notre démarche en partant de l'étude des erreurs humaines, plus particulièrement celles des opérateurs de conduite. La raison en est évidente : c'est un aspect saillant qui interpelle l'industriel car les erreurs humaines se traduisent en termes de performance et de sûreté de fonctionnement, d'un autre côté, les erreurs sont le signe de difficultés ressenties par l'opérateur. Notre hypothèse de travail est que l'aide doit se focaliser sur certains aspects du raisonnement et de comportement de l'opérateur pour lesquels des faiblesses auront été repérées. L'erreur humaine devient alors le révélateur à partir duquel sera engagé un dialogue avec les activités de gestion

technique et de production. L'objectif qui nous paraît réaliste pour justifier et entamer une spécification des objectifs de l'aide consiste donc à mettre en évidence les erreurs humaines afin d'en prévenir les conséquences les plus néfastes pour la performance et/ou la sûreté.

L'analyse des problèmes en termes d'incidents n'est pas triviale car il s'agit d'évaluer la contribution humaine à ces incidents. Une des premières étapes consistera donc à distinguer les défaillances des appareils des défaillances humaines. Ensuite, au niveau des défaillances humaines, il faut distinguer ce qui relève d'**erreurs actives** (associées à l'activité des opérateurs, et dont les effets se font ressentir presque immédiatement) et les **erreurs latentes**, qui sont le fruit de l'activité des personnels de maintenance, des concepteurs, décideurs, directeurs, etc. qui participent ou ont participé - de près ou de loin - à la construction du processus et à son utilisation [REASON 93]. Les conséquences néfastes des erreurs de conception peuvent demeurer longtemps en sommeil et se manifester par un concours de circonstances mêlant défaillances physiques et erreurs des opérateurs.

Quelles sont les erreurs qui doivent nous intéresser plus particulièrement ? : les erreurs actives qui sont difficilement corrigées par l'opérateur, c'est-à-dire celles qui peuvent induire des effets non maîtrisés. En analysant les erreurs commises par l'opérateur (par exemple par la méthode de l'analyse des protocoles, qui consiste à faire exprimer l'opérateur en situation de travail puis analyser les erreurs qu'il commet), il doit être possible de déterminer les erreurs qui reviennent le plus souvent, et celles qui surviennent plus particulièrement lors des postes de jour et celles qui surviennent lors des postes de nuit. Une telle analyse n'a pas été menée, à notre connaissance. Pourtant, ce type d'analyse se révélerait certainement fécond en enseignements : l'évaluation des taux d'erreurs en fonction des rythmes biologiques des opérateurs, de sorte à leur proposer une aide adaptée non pas seulement à leur activité, mais également à leurs capacités fonctionnelles. C'est, il est vrai, un point qui est généralement peu soulevé, et qui pourtant est d'importance : les grands accidents industriels se sont tous déclarés la nuit ! Quel type d'aide pour un travail posté de jour ? Quel type d'aide pour un travail posté de nuit ?

L'analyse des incidents permet de se concentrer sur certains types d'erreurs, celles qui n'ont pas été corrigées (événements humains et combinaison de défaillances physiques qui ont amené au phénomène redouté). Fort heureusement, l'occurrence d'incidents est faible, ce qui signifie qu'un bon nombre d'erreurs sont récupérées par l'opérateur ou sont "absorbées" par le processus. La difficulté est que peu d'erreurs sont non récupérées. Il est donc difficilement envisageable de définir une aide sur la base des erreurs ayant conduit à un incident. Il est toutefois possible de définir une aide à partir d'une analyse des conséquences redoutées telle que la propose Neboit et al [NEBOI 90].

III.5.4.1 La démarche d'analyse de Neboit

La démarche proposée par Neboit et al. peut fournir des indicateurs pertinents quant au type d'aide à apporter aux opérateurs. Elle consiste en l'analyse des incidents répertoriés au travers des dysfonctionnements humains, en partant de l'analyse du processus de fabrication : erreurs de perception, d'évaluation, de planification, d'exécution. C'est une démarche itérative utilisant principalement les méthodes fiabilistes appliquées à l'opérateur : l'AMDE et les arbres de défaillances.

La méthode **AMDE**, pour Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets, permet de recenser les défaillances pouvant survenir sur chacun des appareils de l'installation, et d'en expliciter les causes. C'est une méthode inductive car elle propose d'aller du local vers le global : il s'agit d'analyser les comportements dysfonctionnels sur chacun des appareils puis d'en analyser les causes (l'appareil

subit la perturbation provenant des appareils amont) et les conséquences potentielles, c'est-à-dire les effets induits sur les appareils aval, ainsi que sur l'ensemble du système.

La méthode des arbres de défaillances met l'accent sur les enchaînements d'événements dysfonctionnels et leurs combinaisons qui conduisent à des événements redoutés. La méthode permet de structurer ces événements sous forme d'arborescences avec, au sommet, l'événement redouté, et à la base les événements initiaux. C'est une méthode déductive car elle focalise progressivement sur les événements élémentaires nécessaires - mais non suffisants s'ils surviennent seuls - à l'apparition de l'événement redouté. L'ouvrage de Villemeur recense et décrit les principales méthodes d'analyse de sûreté [VILLEM 88].

Elle est décrite au travers des cinq étapes suivantes :

- l'étape préliminaire vise à se forger une description du processus de fabrication, par **analyse fonctionnelle et structurelle**, des fonctions automatisées et des tâches assignées aux opérateurs ; Neboit et al. utilisent la méthode des **diagrammes blocs** (description du système physique en termes de fonctions et de flux de matière et d'énergie) et les **graphes de fluence** (description de la répartition des tâches décisionnelles en tâches humaines et tâches automatisées) pour avoir une compréhension générale du processus ; d'autres méthodes peuvent être employées (se référer au chapitre IV qui est consacré au recueil des connaissances, et plus particulièrement aux méthodes d'analyse),
- la première étape vise l'**analyse qualitative des dysfonctionnements**, sans chercher à isoler les défaillances des appareils ou des hommes ; elle consiste en l'analyse des modes de défaillance (AMDE) et la construction de scénarii pouvant conduire à chaque dysfonctionnement retenu, à l'aide de la méthode des **arbres de défaillance** (combinaison des événements techniques et humains), et enfin sélection des dysfonctionnements critiques qui devront être plus finement analysés, selon leur degré de gravité, leur fréquence d'occurrence et leur origine (seuls seront dorénavant considérés les événements initiés par les opérateurs qui peuvent causer les dysfonctionnements recensés). Cette combinaison AMDE et arbres de défaillance permet de recenser les dysfonctionnements et de repérer les plus critiques, puis de considérer les enchaînements d'événements qui participent à leur occurrence,
- l'**analyse des dysfonctionnements des opérateurs** est ensuite envisagée. Elle consiste à sélectionner les événements humains qui ont conduit aux dysfonctionnements humains retenus, puis à construire les scénarii qui peuvent expliquer ces dysfonctionnements (la méthode des **arbres de défaillances** permet de décrire l'enchaînement des événements qui conduisent aux dysfonctionnements). Cette étape d'analyse correspond à une étape d'affinage de l'arbre de défaillance précédemment construit,
- la troisième étape reprend les résultats de la précédente et détaille les causes de dysfonctionnement. Elle est basée sur l'analyse des erreurs de raisonnement qui ont abouti aux dysfonctionnements (les erreurs commises par l'opérateur dans la prise d'information et l'exécution de procédures),
- la synthèse des résultats débouche sur la proposition de **solutions** minimisant les risques de dysfonctionnement du système de production en empêchant certains événements d'avoir lieu.

La figure III.2 schématisé les diverses étapes de ce processus.

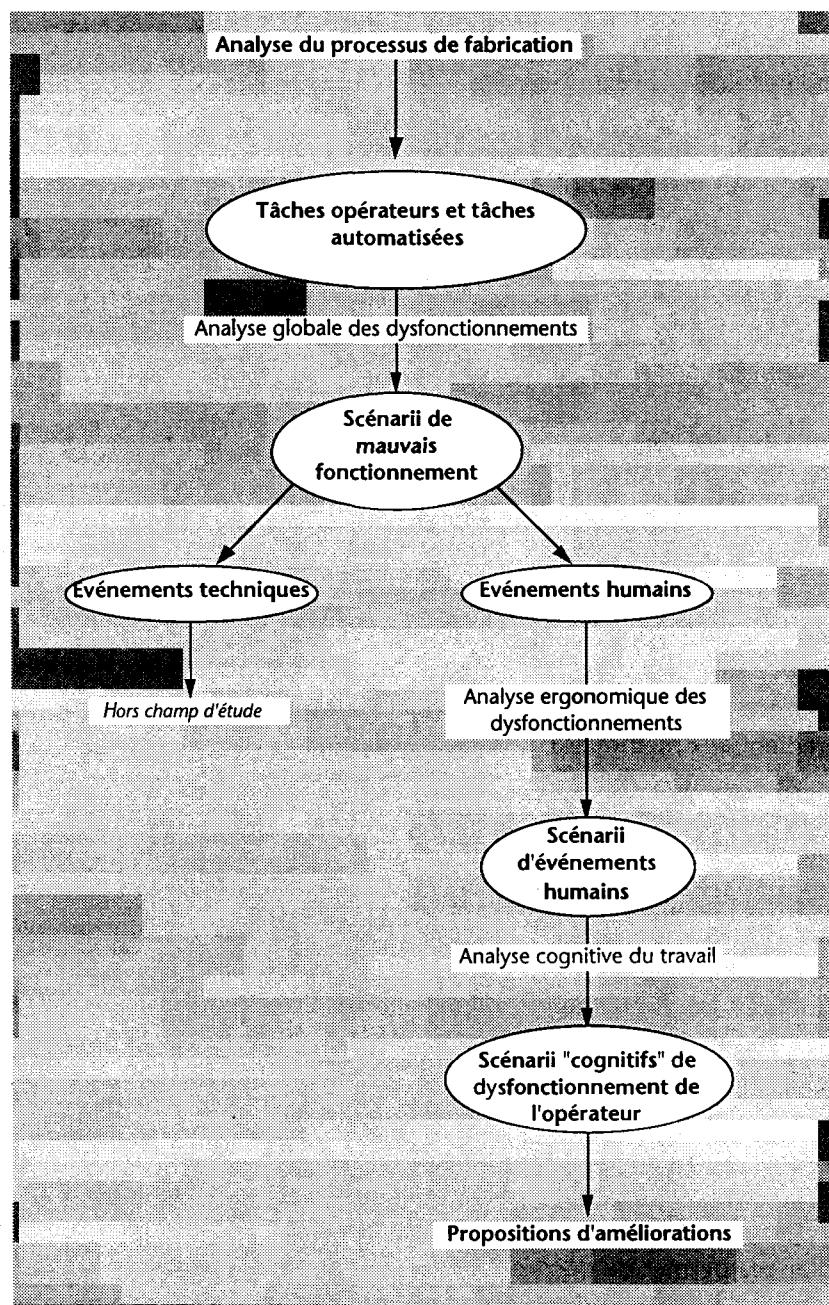


Figure III.2 : Méthodologie d'analyse des dysfonctionnements des opérateurs.

C'est à l'issue d'une telle analyse que l'on peut discerner les erreurs commises par les opérateurs et mettre en lumière celles sur lesquelles il convient de porter l'attention.

D'autres approches fiabilistes peuvent permettre de déboucher sur une évaluation quantitative des erreurs humaines. Elles sont décrites dans le paragraphe qui suit.

III.5.4.2 Autres approches

Ces autres approches utilisent également des méthodes d'analyse fiabiliste mais elles ont un caractère prévisionnel car utilisées pour évaluer les risques d'une erreur de l'opérateur effectuant une tâche.

Les étapes d'une analyse prévisionnelle de la fiabilité humaine sont : la **recherche des erreurs humaines potentielles**, la **sélection des erreurs pertinentes**, puis leur **analyse détaillée**, c'est-à-dire l'étude probabiliste des erreurs. L'expérience accumulée sur les systèmes à haut degré de sûreté, en particulier dans le nucléaire, peut être une base de **recherche des erreurs humaines** ; en effet, les contraintes de sûreté sont telles que les événements anormaux sont soigneusement répertoriés et analysés. Il existe donc une base sur laquelle une analyse objective peut être entamée. La **sélection des erreurs pertinentes** se fera sur [VILLEM 88] :

- **leurs conséquences** : l'erreur mène-t-elle directement à l'événement indésirable ou bien doit-elle être combinée avec des défaillances ou d'autres erreurs ?
- **la probabilité des défaillances** ou des autres erreurs avec lesquelles elle doit être combinée pour aboutir à l'événement indésirable,
- **la probabilité de l'erreur elle-même**.

Il sera ainsi possible d'orienter le projet d'aide en se guidant de ces critères. Cette analyse constitue un moyen de cadrer les problèmes et un moyen de mettre en évidence les priorités d'une intervention.

De nombreuses méthodes d'analyse des risques humains sont actuellement employées. Ce sont, par exemple, des méthodes comme **THERP** ou **SHERPA** d'analyse quantitative des erreurs humaines [FADIER 90] [VILLEM 88] (une description de ces méthodes est proposée dans le chapitre IV). Ces méthodes permettent d'évaluer la probabilité d'apparition d'erreurs humaines dans une tâche.

Ces méthodes nécessitent un découpage fin des tâches, ainsi que l'intervention de spécialistes en fiabilité. C'est pourquoi leur utilisation, dans le cadre de la spécification des objectifs de l'aide à l'opérateur, peut s'avérer longue et délicate.

III.5.5 Approche par les besoins

L'approche par les besoins vise à recueillir les **insatisfactions exprimées** et à envisager les **améliorations correspondantes**. Ces dernières ont été classées, dans le second chapitre, en fonction des dimensions de l'activité humaine et des types d'erreurs associés.

L'approche par les besoins peut fournir des indicateurs intéressants si elle est établie par des personnes autres que les concepteurs (afin d'éviter les biais consistant à ne relever que les besoins auxquels ils peuvent apporter une solution). Dans l'idéal, il faudrait demander à l'ensemble des acteurs de l'entreprise d'indiquer les manques, les insatisfactions, ce qu'ils souhaiteraient voir améliorer. S'il y a recouvrement avec les améliorations que peut apporter une aide, l'analyse pourra alors être poussée plus avant. La méthode de recueil privilégiée est l'entretien.

Besoins de la gestion financière

Les besoins de la gestion financière sont relatifs à des coûts d'exploitation, des coûts de maintenance, l'assurance que le produit fabriqué réponde au marché, etc. Le besoin peut être à caractère stratégique : la capitalisation des connaissances, comme actif de l'entreprise.

Besoins de la gestion technique

L'activité de gestion technique se préoccupe davantage de la gestion des matières, des incidents, etc. Elle met en accord les décisions de la gestion financière en termes d'objectifs de production, de gestion de la disponibilité de l'installation, etc.

Ses besoins s'expriment donc dans ce cadre : augmentation de la disponibilité du système de production et de la sécurité, augmentation de la productivité et réduction des rejets, etc.

Besoins de la production

L'activité de production regroupe principalement les opérateurs de conduite. Leurs besoins s'expriment en termes de gestion au quotidien du fonctionnement du processus de fabrication.

Besoins de la maintenance

Le personnel chargé de la maintenance intervient sur requête des opérateurs ou bien de façon programmée pour assurer la disponibilité du processus de fabrication. Leurs préoccupations sont liées aux problèmes de diagnostic des pannes et de réparation des appareils.

Tableau récapitulatif

Une grille faisant la synthèse de l'analyse des besoins doit ensuite être établie ; il s'agit de mettre en regard l'ensemble des résultats, et de mettre en évidence une tendance. A titre d'exemple, le tableau III.2 recense les besoins exprimés par l'ensemble des acteurs du PEV.

	Gestion financière	Gestion technique	Production	Maintenance
<i>Aide au travail collectif</i>	•	•	•	•
<i>Aide à l'anticipation</i>	•	•	•	•
<i>Aide à l'adaptation</i>	•	•	•	•
<i>Aide au diagnostic</i>	Valeur ajoutée au processus de vitrification	Assurance de la qualité du verre	•	•
<i>Aide à la représentation</i>	•	•	Interface plus conviviale	•
<i>Aide à l'exécution de procédures</i>	•	•	•	•
Autres	Capitalisation des connaissances	Synthèse des données d'essais	•	•

Tableau III.2 : Résultats d'une analyse de besoins (DIAGPEV).

III.5.6 Approche par les fonctionnalités

L'approche par fonctionnalités a jusqu'ici été la plus pratiquée. L'objectif du projet est spécifié par un type d'aide à concevoir :

- soit le projet consiste à tester certaines techniques "pour voir", c'était le cas du projet DIAGPEV,

- soit les objectifs sont clairement identifiés, le projet consistera à préciser les caractéristiques du système.

Le projet ALLIANCE a démarré en 1986 et regroupait plusieurs laboratoires et entreprises françaises [LAPPA 89]. Les objectifs qui ont motivé ce projet ont été : le besoin de systèmes d'aide à la conduite capables de fournir une analyse de la situation plus élaborée que les informations fournies jusqu'ici par les systèmes de contrôle-commande et la nécessité de définir une interface de communication adaptée à l'opérateur. Ce projet était fortement novateur en ce sens qu'il était un des premiers à mettre en œuvre des techniques issues de la physique qualitative, de l'automatique et de nouvelles approches d'interfaces homme machine. Le projet a donné lieu à un prototype simulant un fonctionnement en ligne à l'aide de fichiers, de mesures enregistrées sur l'installation réelle.

III.5.7 Une classification

Les approches par les tâches, les attentes, les problèmes, les besoins et les fonctionnalités ont été classées en fonction d'un **degré de liberté** de choix de type d'aide qu'elles autorisent. L'approche par les tâches laisse une ouverture assez grande puisqu'elle peut nécessiter la mise en œuvre de l'ensemble des dimensions de l'activité de l'opérateur (opératoire, individuelle, cognitive et collective), donc l'ensemble des aides. L'approche par les attentes, quant à elle, met l'accent sur une dimension particulière, et doit être affinée si le choix se porte vers une aide à la dimension cognitive. L'approche par les problèmes et les besoins laisse peu de liberté au concepteur. L'approche par les fonctionnalités vient évidemment en dernière position puisque les fonctionnalités sont alors imposées (figure III.3).

Il ne s'agit pas de préférer une approche de spécification par rapport à une autre, en fonction du degré de liberté qu'elle offre, il y a plutôt tout intérêt à contraindre le projet. Il nous semble que toutes les approches doivent être explorées pour avoir le plus de chances de cerner correctement les objectifs. La définition claire des objectifs est à ce prix.

L'interrogation du personnel de gestion financière permet de cerner ses motivations et ses besoins, l'interrogation du personnel de gestion technique fournit des précisions sur ses attentes et ses besoins, l'interrogation du personnel opérationnel permet de recueillir les insatisfactions, analyser les tâches ainsi que les dimensions de l'activité impliquées, les difficultés et les problèmes qu'il rencontre, sous l'angle de ces erreurs.

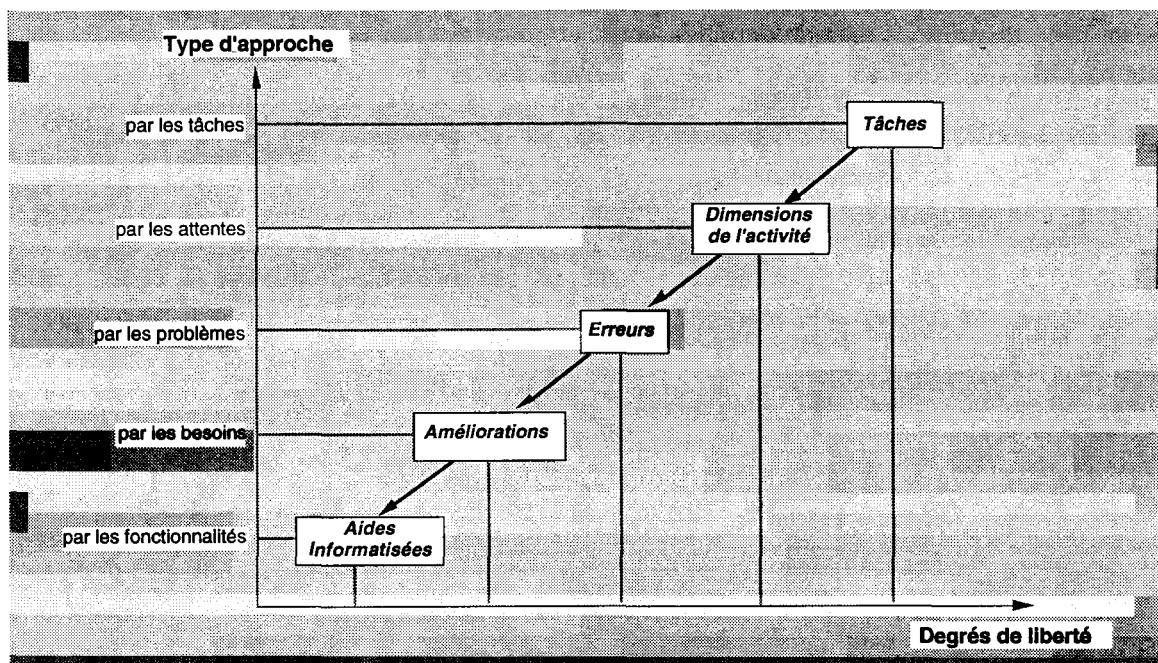


Figure III.3 : Identification du projet par focalisation.

Un point qui a son importance et que nous avons passé sous silence, est le suivant : le processus de fabrication fonctionne-t-il au moment où est lancé le projet d'aide, ou bien est-il en cours de conception ? Nous nous sommes jusqu'ici placé dans le premier cas, étant entendu que le recueil des besoins des opérateurs et de la gestion technique, l'analyse des tâches et des erreurs humaines, ne peuvent être effectués que sur la base de l'expérience des opérateurs et du personnel de gestion technique. Qu'en est-il pour un processus de fabrication en cours de conception ? La spécification d'une aide a priori ne paraît pas réaliste, elle se limiterait de toute façon à bâtir un système à partir des motivations de la gestion financière, et absolument pas sur l'expérience des opérationnels ; une telle aide ne peut prétendre satisfaire ses futurs utilisateurs.

Par contre, ce que l'on peut faire de plus pertinent, dans le cas d'un processus de fabrication en cours de conception, c'est préparer le terrain pour un futur projet d'aide en faisant l'acquisition des connaissances et en prévoyant l'ajout de capteurs, etc. Ce sont autant d'éléments qui permettront de réduire les temps de développement. En effet, une grosse part du projet est consacrée à la compréhension du processus et à la constitution d'un référentiel technique pour les besoins du projet ; DIAGPEV n'échappe d'ailleurs pas à cette règle. Si l'on pouvait réduire les temps de construction de ce référentiel, en démarrant le recueil depuis la conception du processus et en poursuivant ensuite pendant l'exploitation, cela induirait des gains appréciables.

En définitive, concevoir une aide sur un processus existant est plus contraignant que de concevoir une aide sur un processus lui-même en cours de conception, car il est alors possible de préparer le processus à recevoir une aide, et les connaissances susceptibles d'intéresser le projet seraient immédiatement disponibles.

III.6 PHASE 2 : ELABORATION DU CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL

La conception d'une aide est un processus long qui exige une étroite collaboration entre les différents acteurs de l'entreprise ainsi que le concepteur. C'est pourquoi l'**élaboration du cahier des charges**, en tant que **référentiel contractuel** dans lequel figure l'ensemble des spécifications, s'avère cruciale.

Ce cahier des charges est fonctionnel car il décrit principalement les aspects coûts du projet, les fonctionnalités techniques retenues, les aspects maintenance et les interactions avec le personnel de l'activité de production.

Les normes¹ de conception en vigueur permettent de définir le cadre général d'instanciation du cahier des charges, que nous utiliserons pour spécifier les caractéristiques requises d'un système d'aide à l'opérateur.

III.6.1 Définition du projet

La définition du projet permet de préciser son contexte, ainsi que les motivations des industriels.

III.6.1.1 L'aide à l'opérateur et son marché

La centralisation de la conduite a engendré une concentration des informations et des commandes sur des écrans de visualisation en salle de contrôle, ce qui induit la complexification des tâches et l'évolution du rôle de l'opérateur : la conduite de l'installation s'est progressivement transformée en supervision. Elle est accompagnée d'une réduction des effectifs, et de l'augmentation de leur charge de travail. La non performance de l'opérateur peut avoir des conséquences économiques importantes voir conduire à des situations dangereuses.

Ainsi, l'aide à l'opérateur intéresse paradoxalement l'ensemble des installations fortement automatisées. Il s'agit de proposer un système capable de fournir des informations plus élaborées que celles fournies par les systèmes de contrôle-commande actuels. C'est donc un marché potentiellement très important.

III.6.1.2 Le contexte du projet, les motivations

La description du contexte du projet impose à replacer le projet dans la stratégie de l'entreprise. Les objectifs de l'aide peuvent être :

- le support aux opérateurs en situation normale et surtout dégradée, par l'introduction de fonctionnalités d'aide dans l'environnement de conduite,
- l'amélioration des conditions de travail des équipes postées.

¹ La démarche d'analyse fonctionnelle a fait l'objet de documents normatifs portant sur un guide d'élaboration (Norme AFNOR NF X 50-151), un vocabulaire (NF X 50-150), qui tient lieu de norme de conception d'un cahier des charges et diverses recommandations (NF X 50-153).

III.6.2 Description fonctionnelle

Il s'agit de déterminer les aides à envisager en prenant pour base l'analyse croisée des besoins, des attentes, des fonctions souhaitées ainsi que des problèmes rencontrés.

L'élaboration du cahier des charges nécessite de passer en revue les points suivants :

- l'**énoncé des spécifications du système**, qui définit l'exigence fondamentale du personnel de gestion financière, les limites du projet, la finalité du système d'aide, les utilisateurs plus particulièrement visés,
- l'**environnement du système**,
- les **fonctions** que le système doit remplir,
- les **flexibilités**, c'est-à-dire les niveaux d'exigence des fonctions souhaitées,
- les **contraintes** de fonctionnement du système d'aide, par exemple les réglementations, les normes.

III.6.2.1 Enoncé des spécifications du système

Les spécifications représentent les limites de l'étude ainsi que les finalités du produit.

Les **limites de l'étude** portent sur le **champ** que le projet doit couvrir, c'est-à-dire ce sur quoi l'effort doit être porté. En règle générale, le champ d'étude est restreint à une portion significative de l'installation, c'est-à-dire celle qui pose le plus de difficultés aux opérateurs.

Les **finalités** recherchées peuvent être, par exemple :

- l'augmentation de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement en réduisant les risques liés à la non performance des opérateurs,
- la réduction du nombre d'opérateurs sans nuire à la productivité et la disponibilité du processus,
- la compensation des insuffisances des systèmes de contrôle-commande en termes d'abstraction des informations pour la supervision,
- la garantie d'une constance de la qualité des produits.

III.6.2.2 Cycle de vie

Il s'agit ici de préciser les aspects conception, utilisation et arrêt du système. Sa description incite à passer en revue les phases fondamentales d'un produit, à savoir : sa conception, son cycle d'utilisation et son arrêt.

Le cycle d'utilisation de l'aide est l'ensemble des conditions d'emploi de l'aide : l'aide est-elle destinée à fonctionner en régime établi ou bien doit-elle fournir un soutien dans les phases transitoires ? La majorité des aides au diagnostic sont conçues pour fonctionner dans une zone de fonctionnement nominal, cela est dû aux limites inhérentes au modèle.

Cela impose, de la part de la gestion financière :

- de préciser quelles sont les capacités d'évolution souhaitées,
- de replacer ce cycle de vie du système relativement à celui du processus, donc de préciser son espérance de vie.

III.6.2.3 Environnement de l'aide

La spécification de l'environnement permet de définir les interactions au cours de son cycle d'utilisation. Le système d'aide est certes destiné à être installé en salle de conduite centralisée. La difficulté est de définir si le système va être implanté sur une machine à part, ou bien intégré dans le système de contrôle-commande. A terme, il est effectivement question de l'intégrer dans le SNCC.

Son environnement sera, de toute façon, constitué par :

- le **processus**, qui inclut le procédé de fabrication, l'installation, l'instrumentation, les automatismes, les moyens de communication entre opérateurs, ainsi que le système de contrôle-commande. Les caractéristiques de chacune de ces composantes sont importantes à signaler car elles permettront de définir les grandes lignes du système à concevoir. En effet, le type de processus (continu, batch ...), la qualité de l'instrumentation ... auront une incidence importante sur le choix des techniques envisageables,
- l'**équipe postée**, dont l'organisation est une donnée importante pour déterminer si l'aide doit être ciblée sur un utilisateur particulier (chef de quart) ou être une aide consultable par l'ensemble des opérateurs,
- la **salle de conduite**, qui inclut les panneaux de contrôle et le(s) poste(s) de conduite,
- l'**environnement informatique**, c'est-à-dire la machine sur laquelle l'aide sera installée, les liaisons informatiques de communication avec le système de contrôle-commande.

III.6.2.4 Les fonctions

La description fonctionnelle est la partie essentielle du cahier des charges fonctionnel. Elle constitue la référence pour l'ensemble des intervenants du projet. Elle joue, en effet, un rôle dans la bonne compréhension pour le concepteur de ce qui est souhaité par le demandeur. Sa structuration et sa présentation sont ici déterminantes.

Deux types de fonctions sont classiquement considérées : les **fonctions d'usage** et les **fonctions d'estime**. Les fonctions d'usage sont la réponse au désir fondamental ou à l'exigence principale exprimée. Elles correspondent au service que l'on attend de la part de l'aide. Les fonctions d'estime ne sont pas directement liées à la satisfaction du besoin fondamental mais apportent un plus.

La **typologie des aides** décrite dans les précédents chapitres définit en fait une **typologie des fonctionnalités d'aide** qui peuvent être demandées par les exploitants : aide à l'exécution de procédures, aide à la représentation mentale, aide au diagnostic, aide à l'adaptation, aide à l'anticipation. Si, à l'issue des spécifications, plusieurs types d'aide sont souhaités, il faudra envisager d'établir des priorités.

III.6.2.5 Critères et niveaux de flexibilité

Les critères d'appréciation permettent d'évaluer la qualité des aides proposées en regard des souhaits exprimés par le personnel de gestion technique. Puisque le domaine de l'aide à l'opérateur est encore récent, il n'existe pas suffisamment de retour d'expérience pour permettre de dégager des critères suffisamment fins, sauf peut-être pour les aides à la représentation mentale et au diagnostic, qui sont plus particulièrement étudiés. Nous distinguerons trois familles de critères : qualité technique, qualité opérationnelle et qualité commerciale.

La qualité commerciale est commune à l'ensemble des fonctionnalités d'aide. Ce sont la :

- **maintenance** : elle exprime la faculté du système à être corrigé, modifié une fois réalisé,
- **réutilisation** : elle traduit la capacité d'employer l'aide réalisée pour d'autres installations,
- **documentation du projet** : elle représente le lien entre les différents intervenants et la trace du projet,
- **formation des utilisateurs**,

Pour l'aide à la représentation mentale, les critères qui peuvent être invoqués sont :

- **en qualité technique** (d'après [COUTA 88]) :
 - * **portabilité** : "la portabilité placée au niveau du poste de travail signifie la définition d'un système de fenêtrage standard. La portabilité au niveau des entités de dialogue cache la diversité des systèmes de fenêtrage. Dans l'attente d'un système de fenêtrage 'officiel', il est raisonnable de placer la frontière de portabilité au niveau des entités de dialogue",
 - * **extensibilité** : l'extensibilité permet au programmeur de définir les objets (graphiques) adaptés à son domaine,
 - * **personnalisation** : exprime la possibilité, pour l'utilisateur, de modifier l'interface sans avoir à programmer,
 - * **interactivité** : exprime la possibilité d'une réponse immédiate et la manipulation directe sur l'interface.
- **en qualité opérationnelle** :
 - * **ergonomie** : exprime la notion d'adéquation entre les représentations et modes de représentation de l'utilisateur et l'image fournie par l'interface (densité et structuration des informations, nombre d'écrans, codage de l'information, etc. ; une synthèse de ces critères est proposée par [KOLSKI 93]),
 - * **non redondance** : dans le cas où l'aide est destinée à être indépendante du système de contrôle-commande, cette seconde interface doit être clairement différenciée,
 - * **navigation** : possibilité de changer de représentation du processus (dans le projet ALLIANCE, l'interface présentait trois types de vue : "vue synoptique", "vue propagation" qui indique la manière dont les dysfonctionnements se propagent dans l'installation, et une "vue courbe", qui fournit une trace des évolutions de variables importantes),
 - * **focalisation** : elle exprime la possibilité de passer d'une vue générale de l'unité à une vue à une vue locale sur un appareil.

Pour l'aide au diagnostic, les critères d'appréciation sont :

- **en qualité technique** :
 - * **précocité**, aptitude à détecter un dysfonctionnement dès son apparition et avant que les systèmes d'alarmes n'entrent en jeu,
 - * **robustesse**, aptitude à distinguer les pannes des erreurs de modélisation et des bruits de mesure,
 - * **isolabilité**, qui regroupe les concepts de **discrimination**, c'est-à-dire l'aptitude à discriminer les fausses pannes de l'ensemble de pannes possibles, et d'**exactitude**, c'est-à-dire aptitude à inclure la vraie panne dans l'ensemble des pannes possibles,
 - * **sensibilité**, qui est l'aptitude à détecter tous les défauts,
 - * **fiabilité** : le système de diagnostic ne devrait pas échouer de façon brutale mais voir dégrader ses performances de manière progressive et toujours fournir des solutions,
- **en qualité opérationnelle** :
 - * **pertinence** : les informations présentées aux opérateurs doivent être suffisantes pour leur permettre d'évaluer convenablement la situation,

- * **justification des conclusions** : les fonctionnalités d'aide doivent permettre à l'opérateur de suivre le "raisonnement" effectué par le système,
- * **exactitude** : exprime l'aptitude à fournir la vraie solution parmi un ensemble de solutions proposées (le diagnostic fournit généralement un faisceau d'hypothèses de dysfonctionnement),
- * **paramétrabilité** : exprime la capacité d'adaptation à de nouvelles conditions d'utilisation.

La gestion technique peut indiquer quels sont les critères techniques qui le préoccupent le plus : privilégier la sensibilité par rapport à la robustesse de la détection, préférer l'exactitude ou la précision des informations fournies par le système de diagnostic. Mais ce sont les caractéristiques du processus qui déterminent, pour une bonne part, ce qu'il est techniquement possible de réaliser. Pour l'aspect qualité opérationnelle, sont réunis les critères d'acceptabilité par l'opérateur.

Pour les autres types d'aide, il nous manque encore beaucoup de données pour avoir une idée des caractéristiques qui qualifient ces aides.

III.6.2.6 Les contraintes

Les contraintes sont les limitations à la liberté du concepteur, et servent à préciser les conditions de réalisation du système. Les contraintes peuvent porter sur les méthodes et les outils à employer, le respect d'une norme ou d'un règlement, les connaissances disponibles ou encore sur les techniques à mettre en œuvre. Les connaissances disponibles ont été caractérisées, dans le chapitre II, à travers les propriétés de résolution et de précision associées aux modèles de connaissances. Les connaissances disponibles font l'objet du chapitre IV.

III.7 PHASE 3 : EXPRESSION DES SOLUTIONS PROPOSÉES

Les solutions exprimées représentent les **fonctions techniques** que le concepteur propose de développer, en réponse au cahier des charges fonctionnel. Ces fonctions techniques sont internes au produit et dépendent de celui-ci. Elles correspondent au rôle, à l'action d'un composant à l'intérieur du système d'aide et ne contribuent pas explicitement à la satisfaction d'un besoin ou d'une contrainte du point de vue des gestion financière et technique. Etant interne au produit, elles résultent d'un **choix technique** de la part du concepteur. Plus le cahier des charges sera contraint et plus la latitude d'action sera étroite.

Le choix de ces fonctions relève d'un processus de mise en correspondance des fonctions souhaitées et contenues dans le cahier des charges, avec les fonctions techniques que le concepteur maîtrise. Ce choix est le fruit d'une évaluation de ses capacités à garantir la qualité du système à construire, qui s'exprime en termes de réutilisation, d'adaptabilité, de retour d'expérience, etc.

III.7.1 Les solutions

Pour une aide au diagnostic, les fonctions à implanter relèvent des traitements effectués sur les données ainsi que de l'interface homme-machine qui sert de support de communication de ces résultats vers l'opérateur.

III.7.1.1 Fonctions techniques

La proposition de fonctions techniques doit classiquement être effectuée après une analyse de la valeur, côté concepteur. Cette étude a pour but de mettre en correspondance besoins et propositions.

Les fonctions techniques d'un système de surveillance/diagnostic correspondent aux **tâches primitives** d'interprétation, de prédiction, de décision et d'identification. Il est difficile d'attribuer des critères d'appréciation à ces fonctions élémentaires, c'est pourquoi il nous semble préférable d'en rester aux critères d'appréciation qui qualifient les **étapes de détection et de localisation** :

- pour l'étape de détection : la robustesse, la sensibilité, la précocité,
- pour l'étape de localisation : l'isolabilité des défauts, qui est fonction de la discrimination et de l'exactitude.

III.7.1.2 Fonctions d'interface homme-machine

L'interface homme-machine est un maillon très important puisqu'elle représente la seule sortie du système d'aide. Elle doit donc faire l'objet d'une attention toute particulière, d'autant plus que :

- si l'aide doit être utilisée parallèlement à l'interface proposée par le système de contrôle-commande (c'est-à-dire s'insérer dans l'environnement de la salle de contrôle), la nouvelle interface doit compléter l'interface existante et ne pas lui être redondante,
- l'acceptation psychologique et cognitive de l'aide en est fortement dépendante. Il est nécessaire de penser l'interface en fonction des modes de raisonnement et de représentation des opérateurs.

Dans l'idéal, les fonctions que doit pouvoir fournir une interface homme-machine sont :

- la présentation de vues de synthèse (synoptique de l'installation sur lequel figurent les états de marche ou des positions d'actionneurs),
- la présentation de vues spécifiques (décrivant les résultats de traitement des fonctionnalités de diagnostic, d'adaptation et d'anticipation),
- la présentation de l'historique des événements passés sur un horizon temporel donné,
- la possibilité de fournir plusieurs représentations du processus de fabrication, selon différents niveaux d'abstraction (se référer à l'annexe 1 qui décrit les niveaux d'abstraction tels qu'envisagés par Rasmussen),
- la représentation des modes causal (les liens de cause-à-effet entre les variables mesurées), logique (les plans d'actions relatifs à une situation donnée) et horloge (les contraintes de délai de production).

III.7.2 Facteurs déterminants pour le concepteur

Le concepteur décide de répondre à un appel d'offre en fonction des perspectives d'évolution du marché et surtout de ses capacités à garantir la réussite du projet. De nombreux critères interviennent dans sa décision [VALAN 93]. Nous insisterons plus particulièrement sur les critères généraux suivants :

- la **réutilisation** indique le niveau de généralité de la solution élaborée (le concept de tâche générique abordé dans le chapitre II est un des aspects permettant d'aller vers cette généralité, la distinction entre base de faits et règles d'inférence dans les systèmes experts est un autre moyen d'aller vers la réutilisation),
- l'**adaptabilité** en cours d'étude,
- les **possibilités de validation**,
- l'**expérience** acquise en conception d'aides,
- les **outils logiciels existants**,
- les **capacités d'évolution**,
- le **niveau de risque acceptable**.

Le concepteur est généralement spécialiste de certaines techniques qu'il maîtrise bien. La conception est encore trop spécifique à chaque projet pour qu'il soit possible de classer les techniques et outils existants selon les critères évoqués précédemment (par exemple, le **niveau de risque acceptable**, qui définit la part d'inconnu tolérable dans la réalisation du système, est encore mal maîtrisée car tout projet comporte une forte composante de risque, ne serait-ce qu'en raison des spécificités de chaque processus industriel. Nous noterons, cependant l'effort mené par certains en matière de recueil d'expérience pour essayer de faciliter le transfert de compétences acquises sur un projet vers un autre ; deux exemples permettent de se rendre compte de l'intérêt porté à cet aspect, le projet ESPRIT 820, et la démarche DRE.

Le projet **Esprit 820** vise à constituer une base de connaissance faite de l'expérience de projets d'aide au diagnostic de processus, retranscrite sous forme de projets d'application génériques et devant servir comme base méthodologique de conception de systèmes à base de connaissances [LEITC 92].

La démarche **DRE** (pour **D**esign **R**equirements **E**mbedding) se veut une approche d'explicitation des décisions de conception, et se veut une aide permettant à l'utilisateur de comprendre les implications des modifications de conception souhaitées [VANW 95]. Il s'agit d'un cadre de recueil de l'historique de la conception d'un système qui intègre explicitement les aspects discussion, négociation, et les compromis qui interviennent dans un projet.

L'expérience acquise au contact de projets d'aide permet de bénéficier du vécu dans la technique, ce qui permettrait d'en réduire les délais de réalisation, d'améliorer la qualité en corrigeant les erreurs, et de mieux répondre aux besoins. Le recueil des connaissances de conception est donc essentiel pour bénéficier pleinement d'un retour d'expérience, surtout quand ces expériences sont peu nombreuses.

III.7.4 Facteurs déterminants pour les utilisateurs

Il semble bien admis que les systèmes conçus en direction des opérateurs doivent l'être avec leur participation active tout le long du projet. Pour l'aide au diagnostic, cette implication a plusieurs avantages : elle privilégie la pertinence du système vis-à-vis des préoccupations des opérateurs, elle doit permettre de faciliter l'introduction du système en salle de conduite, et enfin elle doit garantir que l'aide répond effectivement à des critères d'acceptabilité psychologique.

III.8 LES PHASES SUIVANTES

III.8.1 Phase 4 : Etude de faisabilité technique

L'étude de faisabilité technique des solutions proposées est une étape importante dans la sélection des outils les mieux adaptés par rapport aux caractéristiques du processus. Elle consiste à évaluer la possibilité technique de réalisation d'une aide. Cette étude de faisabilité a plus particulièrement été envisagée dans le cadre de l'aide au diagnostic : il s'agit, pour le concepteur, de déterminer ce qu'il est possible de faire, compte-tenu des caractéristiques de l'instrumentation.

Les caractéristiques de l'instrumentation de l'installation définissent la limite de diagnosticabilité du système. Cette information est importante à connaître car elle permet au concepteur d'avoir une idée assez précise de ce qu'il est possible de surveiller et ce qui ne peut l'être (en termes de paramètres mesurés). Cassar et al. propose une méthodologie permettant, par une analyse structurelle de l'installation, de déterminer quelles sont les mesures sur lesquelles pourra s'appuyer un diagnostic ; elle autorise également l'étude de la distinguabilité et de la sensibilité des pannes les unes par rapports aux autres. Cette méthodologie est actuellement implémentée dans l'outil D3 [CASSA 92].

III.8.2 Phase 5 : Développement

Un cycle de développement est en réalité une **stratégie de construction** d'un système, qu'il soit logiciel ou autre. On considère généralement que du choix de cette stratégie dépend la qualité du produit obtenu à l'arrivée. Qu'en est-il en réalité ? Quel cycle de développement est le plus adapté pour concevoir une aide ? (les figures correspondant aux cycles évoqués sont inspirées de [DUBRI 95]).

Un **cycle de développement en cascade** part du principe que chaque étape doit être validée avant de passer à l'étape suivante (figure III.4). Il est toutefois possible de revenir à l'étape précédente afin de s'assurer que les résultats de l'étape courante correspondent bien à ce qui était prévu dans l'étape précédente. Ce qui le caractérise, c'est sa rigidité car il impose une démarche séquentielle. Suivre ce plan de développement suppose avoir bien cadré son projet.

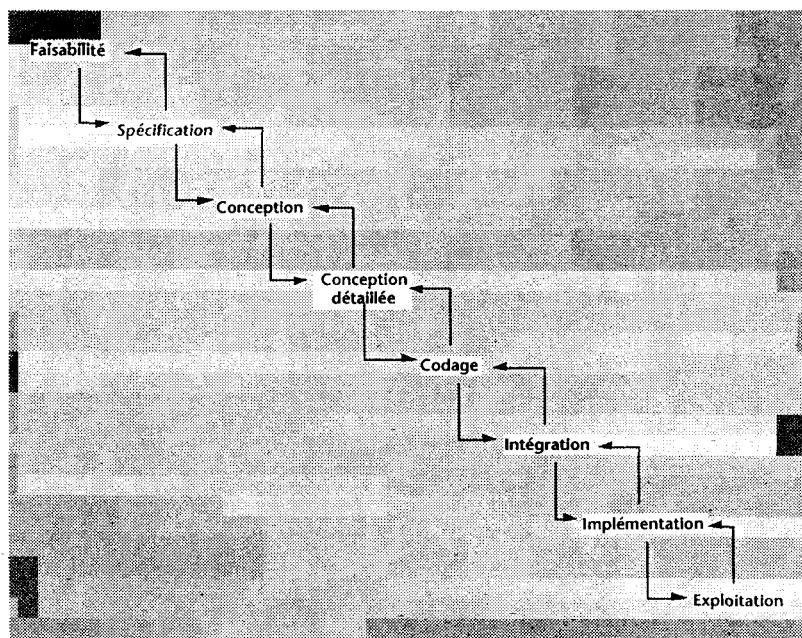


Figure III.4 : Cycle de développement en cascade.

Un **cycle de développement en V** reste fondamentalement une succession d'étapes comme le cycle en cascade, même s'il comporte des étapes qui sont hors cycle de développement (figure III.5). Il est classiquement utilisé en génie logiciel.

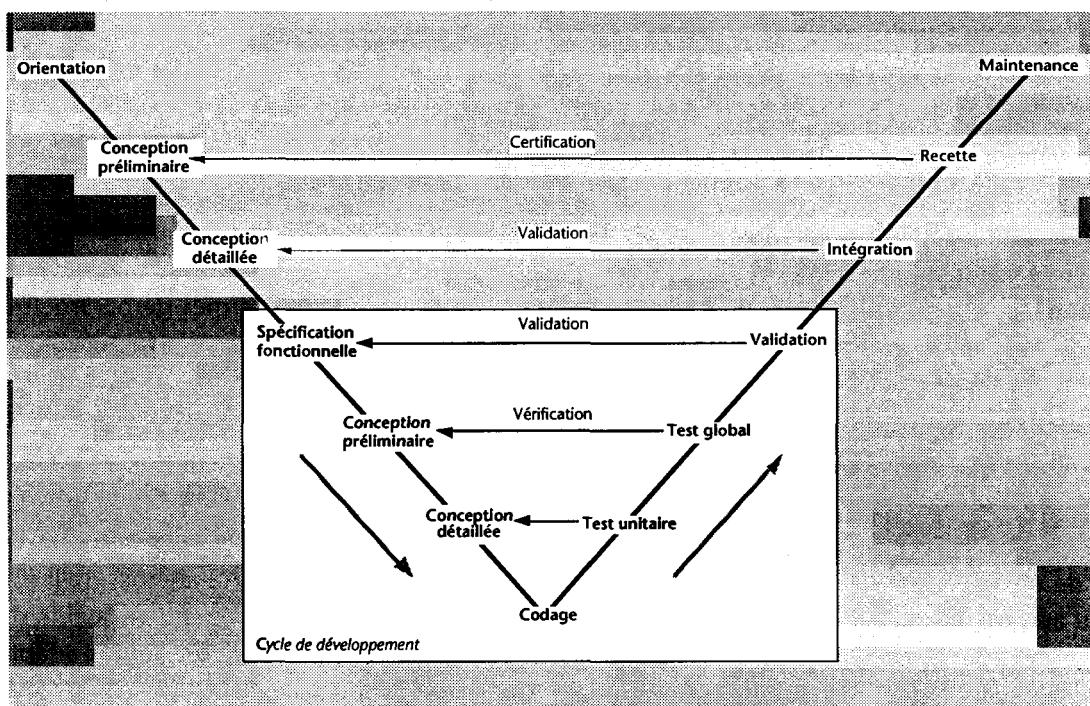


Figure III.5 : Cycle de développement (inscrit dans le cycle de vie).

Le **cycle de développement en spirale** permet un retour sur les étapes initiales (figure III.6). A partir des objectifs, pas nécessairement parfaitement définis, ce cycle autorise une construction progressive du système, et impose de vérifier, à chaque cycle, que les objectifs sont respectés, et que les alternatives ont été passées en revue. Cela permet d'affiner au fur et à mesure du développement.

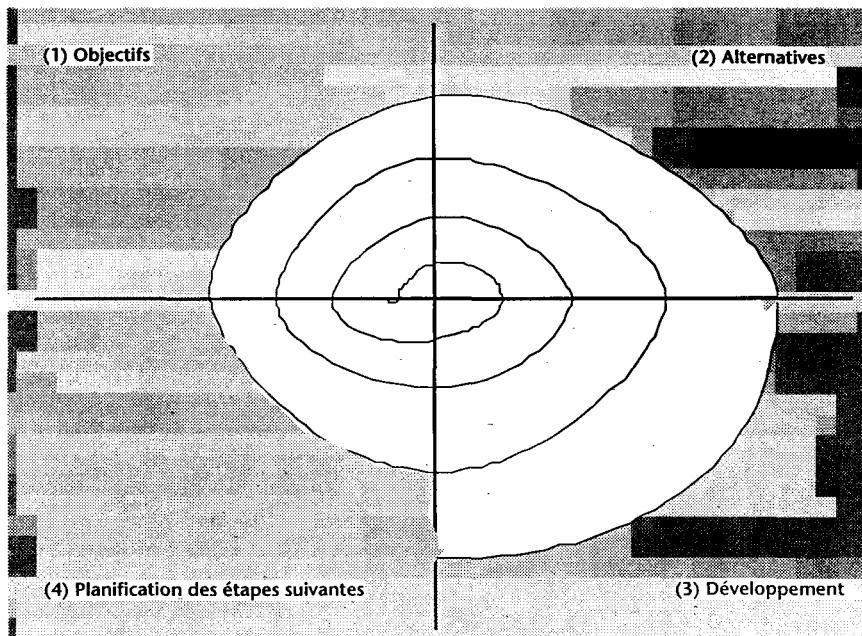


Figure III.6 : Cycle de développement en spirale.

C'est typiquement le type de cycle qui convient pour des projets imparfairement cadrés, où une part d'inconnu intervient ; il est d'ailleurs utilisé pour la conception des systèmes à base de connaissances, car il laisse une certaine latitude d'ajustement au fur et à mesure que l'on progresse dans la construction du système. En effet, la spécification du projet est particulière à un projet d'aide, mais l'aspect développement l'est également : " les systèmes ouverts qui sont en interaction avec l'utilisateur engendrent des niveaux de complexité tels qu'il est difficile de se convaincre que le problème a été bien posé et que l'aide apportée est valable " [NOTTE 95]. Ermine invoque le fait que ces systèmes d'aide, qui manipulent des connaissances sont trop complexes pour pouvoir être spécifiés complètement avant leur réalisation [ERMINE 93] ; Levine et al. considèrent que le processus de développement classiquement employé est trop rigide et lourd à mettre en œuvre : "le principal inconvénient de ces méthodes classiques est que tout le développement repose sur les concepteurs qui effectuent un travail abstrait à partir de l'analyse de la situation existante, le résultat de ce travail peut être très bon si le problème de départ est relativement peu complexe, bien structuré et peu dépendant des individus. Lorsqu'au contraire la situation est fluctuante [par exemple les besoins sont mal définis, ou encore les besoins évoluent dans le temps, ce qui est typique des systèmes d'aide], le besoin d'interactivité est grand, on peut alors légitimement douter de la valeur du système qui finalement sortira des mains des concepteurs" [LEVINE 89].

III.9 CONCLUSION

Une des difficultés actuelles en conception est la justification des aides en salle de conduite, au delà de l'expression des motivations de l'activité de gestion financière qui s'avère insuffisante pour cerner le bien-fondé d'un tel projet. Des moyens d'identification plus rigoureux des objectifs sont nécessaires, afin de s'assurer que les besoins exprimés par les différents acteurs entrent bien dans le champ des aides à la supervision. Il nous semble que la réussite de ce type de projet passe avant tout par une phase d'analyse des objectifs pertinents, même s'il faut, pour y parvenir, mettre en œuvre plusieurs méthodes de recouplement :

- le recensement des motivations du personnel de gestion financière, qui fixe les limites du projet en termes de délais, de coûts, de retour sur investissement, etc.
- l'approche par les tâches, qui privilégie la conception d'une aide centrée sur un type de tâche donné (quelles sont les tâches qui posent le plus de difficultés au personnel de production),
- l'approche par les attentes, qui met l'accent sur l'orientation souhaitée par le personnel de gestion technique ; quelle dimension de l'activité des opérateurs faut-il assister : la dimension opératoire (focaliser sur l'exécution des procédures), la dimension cognitive (proposer une aide à la résolution de problèmes) ou la dimension collective (orienter l'aide vers une meilleure coopération des opérateurs) ?
- l'approche par les problèmes, qui est basée sur l'analyse des dysfonctionnements du système de production, afin de mettre en évidence la contribution de certains types d'erreurs humaines dans l'occurrence d'incidents,
- l'approche par les besoins, qui privilégie l'expression des souhaits d'améliorations par l'ensemble des acteurs de l'entreprise,
- l'approche par les fonctionnalités, qui permet d'interroger le personnel de gestion technique sur le type d'aide qu'il souhaiterait voir réalisé.

Etant donné qu'une aide doit s'insérer dans un contexte organisationnel complexe, il est nécessaire que l'ensemble des acteurs participent à la définition du projet. La spécification des objectifs est ainsi effectuée en adoptant différents angles d'analyse, ce qui permet de garantir une certaine cohérence dans les choix de conception, et surtout la pertinence du projet, même si l'on manque encore de moyens objectifs d'évaluation.

La conception d'un système d'aide demande certes des investissements importants, mais il faut plutôt raisonner en termes de valeur ajoutée pour l'entreprise : retour sur investissement pour la gestion financière, gain en disponibilité et productivité pour la gestion technique, amélioration notable des conditions de travail pour les opérateurs chargés de la production, ainsi que l'amélioration du travail de maintenance (par la détection précoce des dysfonctionnements, par exemple).

Il faut considérer le prototypage ou développement incrémental comme une manière d'ajuster les caractéristiques du système pendant la réalisation, une fois les objectifs bien définis, plutôt que comme une méthodologie de conception à part entière. Il nous semble, en effet, difficile de maîtriser les coûts de réalisation si trop de modifications sont apportées à chaque cycle développement -> évaluation, qui présente des similarités avec une démarche du type essai -> erreur.

Le tableau III.3 présente une vue générale des concepts évoqués dans les précédents chapitres ainsi que les approches de spécification des objectifs pouvant être évoquées. Ce tableau résume l'ensemble des types de tâches, d'erreurs humaines, d'améliorations et de fonctionnalités d'aide. Il est

donc le cadre d'interrogation que nous nous définissons auprès des exploitants puisqu'il résume ces approches et surtout met en évidence les passerelles entre les différentes approches d'identification.

Le tableau III. 4 présente les différents critères permettant de qualifier les fonctionnalités d'aide. Les points d'interrogation indiquent que nous manquons d'informations pour les caractériser de façon satisfaisante.

Tableau III.3 : Tableau récapitulatif des approches de spécification.

Approche par les attentes				
Approche par les problèmes				
Approche par les besoins				
Approche par les fonctionnalités				
Dimensions de l'activité	Niveaux de perception de l'intervention humaine	Typologie et origine des erreurs	Améliorations pouvant être envisagées	Aides informatisées
Collective	L'opérateur <i>participe à un objectif commun</i>	<p>Erreurs de coordination</p> <p>Intervention en local sans avertir la salle de commande. Oublis et délais de transmission d'informations. Facteurs psychologiques ou organisationnels. Impossibilité de joindre les personnes à contacter.</p> <p>Erreurs de planification</p>	<p>Renforcer le réseau conversationnel Répartir les tâches entre les agents Améliorer la résolution collective de problème Négocier les conflits</p> <p>Fournir un résumé des événements du dernier poste pour la nouvelle équipe postée</p>	<p>Aide au travail collectif Coopération homme-homme Meilleure répartition des tâches entre opérateurs</p> <p>Coopération homme-machine Répartition dynamique de tâches entre l'homme et les automatismes</p>
Cognitive	L'opérateur <i>anticipe</i>	<p>Mode horloge : mauvaise connaissance des contraintes et des zones de flexibilité (butées temporelles). Mauvaise connaissance des effets des actions. Mauvaise évaluation de l'état temporel du système. Erreurs dans la sélection de but, de cible ou de tâche. Décisions non prises en temps voulu.</p> <p>Erreurs d'intégration</p>	<p>Faciliter la réalisation des plans d'action définis par l'opérateur et ensuite en proposer une optimisation Améliorer la connaissance des opérateurs des contraintes fixes et des zones de flexibilité Fournir des prédictions concernant les effets et conséquences des événements et actions (anticipation des effets de plans d'action)</p> <p>Aider à la prédition des états futurs</p>	<p>Aide à l'anticipation Proposition de plans d'action optimaux</p>
		<p>Mauvaise adéquation entre actions de l'équipe et contraintes temporelles. Non possibilité de suivre le processus selon un mode causal, donc d'agir juste à temps.</p> <p>Erreurs d'évaluation</p>	<p>Créer des supports qui permettent le suivi dynamique du système supervisé et pas seulement du procédé Conseiller l'opérateur de sorte à faire coïncider mode causal (liens temporels entre événements du processus physique) et mode logique (actions de l'équipe)</p>	<p>Aide à l'adaptation Conseil à l'opérateur (proposition de plans d'action)</p>
	L'opérateur <i>ajuste les paramètres de fonctionnement</i>	<p>Erreur de filtrage : informations non prises en compte (fixation sur des stéréotypes ou des détails considérés pertinents, raccourcis familiers). Erreurs dues à une carence ergonomique. Incomplétude des systèmes d'information, mauvais regroupement, signaux erronés.</p> <p>Erreurs de mode : interprétation erronée d'événements. Interactions entre systèmes non anticipées.</p> <p>Traitements des informations d'entrée (occurrence et observabilité des événements) : information non reçue, mauvaise interprétation, imprécision.</p> <p>Mémoire : oubli d'actes isolés, alternatives erronées. Erreurs dues à une mauvaise évaluation du risque. Alarmes outrepassées.</p>	<p>Améliorer la confiance accordée aux informations capteurs Alerter l'opérateur d'une dérive, un changement avant que les alarmes ne se déclenchent Sensibiliser les opérateurs à la notion de risque Favoriser un apprentissage spécifique au traitement des situations nouvelles</p> <p>Fournir une information débarrassée des données non pertinentes Améliorer la perception, la représentation de l'état temporel du système</p> <p>Fournir la possibilité de naviguer à travers plusieurs représentations temporelles du système (phénomènes causaux, actions pouvant être effectuées, délais de production)</p> <p>Présenter des vues de synthèse</p>	<p>Aide au diagnostic Surveillance/diagnostic</p> <p>Aide à la représentation mentale Interface Homme - Machine</p>
Opératoire	L'opérateur <i>exécute des tâches</i>	<p>Erreurs d'exécution</p> <p>Actions mal adaptées ou mal dosées. Non respect d'une procédure ou d'un règlement. Erreur de procédure, erreur dans l'exécution d'une tâche Manque de procédures spécifiques d'urgence. Utilisation de méthodes proscribes.</p>	<p>Faciliter l'exécution des commandes Éliminer les comportements non sûrs Guider l'application des modes opératoires</p>	<p>Aide à l'application des tâches Aide à la sélection, à l'exécution et à la validation</p>

Tableau III.4 : Critères qualité des fonctionnalités d'aide à l'opérateur.

Type d'aide	Critère qualité		Technique	Opérationnelle	Commerciale
<i>Aide au travail collectif</i>			?	?	
<i>Aide à l'anticipation</i>			?	Pertinence	Maintenabilité
<i>Aide à l'adaptation</i>			?	Rapidité	Evolutivité
<i>Aide au diagnostic</i>	Exactitude Discriminabilité Fiabilité	Robustesse Précision Sensibilité		Validité Exactitude Paramétrabilité	Réutilisation
<i>Aide à la représentation mentale</i>	Portabilité Extensibilité Personnalisation	Interactivité	Ergonomie Navigation Non redondance	Expressivité Focalisation Complétude	Modularité
<i>Aide à l'exécution de procédures</i>			?	?	

Références bibliographiques

- [CASSA 92] **J. P. Cassar, M. Staroswiecki, P. Declerck,**
Structural decomposition of large scale systems for the design of failure
detection and identification procedures,
System Science XI, Wroclaw, Poland, September 22-25, 1992.
- [COUTA 88] **J. Coutaz,**
De l'ergonome à l'informaticien : pour une méthode de conception et de
réalisation des systèmes interactifs,
*Les apports de l'ergonomie et de l'informatique à la conception des systèmes
interactifs, ERGOIA'88, Biarritz, pp. 201-221, 4-6 Octobre 1988.*
- [DUBRI 95] **M. Dubrigeux-Cocquebert,**
MODESTI : vers une méthodologie interactive de développement de systèmes à
base de connaissances,
Thèse de Doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis,
1995.
- [ERMIN 93] **J. L. Ermite,**
Génie logiciel et génie cognitif pour les systèmes à base de Connaissances,
Vol. 1, *Aspects méthodologiques*, (eds) *Technique et Documentation Lavoisier*,
1993.
- [FADIER 90] **E. Fadier,**
Fiabilité humaine : méthodes d'analyse et domaines d'application,
*Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, ouvrage collectif
sous la direction de J. Leplat et G. de Terssac, éditions OCTARES Entreprises*, pp.
47-80, 1990.
- [KOLSKI 93] **C. Kolski,**
Ingénierie des interfaces homme - machine, conception et évaluation,
Traité des Nouvelles Technologies, série *Automatique*, eds HERMES, 1993.
- [LEVINE 89] **P. Lévine et J.-C. Pomerol,**
Systèmes d'aide à la décision et systèmes experts,
Traité des Nouvelles Technologies série *Décision assistée par ordinateur*, Hermès,
Paris, 1989.
- [LEITC 92] **R. Leitch and M. Gallanti,**
Task classification for knowledge-based systems in industrial automation,
IEEE trans. Syst., Man and Cyber., vol. 22, N° 1, January/February 1992.
- [MILL 92] **R. C. Mill,**
Human Factors in Process Operations,
Institution of Chemical Engineers, Robert C. Mill Editor, 1992.

-
- [NEBOIT 90] **M. Neboit, H. Guillermain et E. Fadier,**
De l'analyse du système à l'analyse de l'interaction opérateur-tâche : proposition méthodologique,
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, éditions OCTARES Entreprise, pp. 241-265, 1990.
- [NOTTE 95] **D. Notte,**
Pour une conception pluridisciplinaire des systèmes coopératifs homme machine : mythes et réalités,
Journées d'Etude S3 (Sûreté, Surveillance, Supervision), Supervision et coopération homme-machine, Ed. LAIL USTL, Paris, les 12-13 janvier 1995.
- [REASON 93] **J. Reason,**
L'erreur humaine,
Traduit de l'anglais par J-M. Hoc, Le travail Humain, PUF, 1993.
- [VALAN 93] **J. Valancogne,**
Problématique de l'ingénierie des systèmes complexes,
Nouvelles Avancées en Automatique et en Productique, Congrès AFCET, pp. 77-88, Versailles, 8-10 Juin 1993.
- [VANW 95] **J. Vanwelkenhuysen,**
Using DRE to augment generic conceptual design,
IEEE Expert Intelligent Systems and their Applications, vol. 10, N°1, pp. 50-56, February 1995.
- [VILLEM 88] **A. Villemeur,**
Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Fiabilité - Facteurs humains - Informatisation,
Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Éditions Eyrolles, 1988.

CHAPITRE IV :

Acquisition des connaissances pour l'aide à la supervision

L'aspect recueil des connaissances évoqué précédemment, est développé ici.

Nous déclinons une classification des connaissances nécessaires à chacun des types d'aide recensés ainsi que les méthodes d'analyse et de recueil les plus couramment employées.

Nous décrivons également les principales caractéristiques de la méthode SAGACE, développée au CEA, ainsi qu'un exemple d'application au travers de la modélisation du Prototype Evolutif de Vitrification. Nous décrivons ensuite un cadre d'utilisation de SAGACE comme méthode de recueil pour l'aide au diagnostic. L'accent sera mis sur les connaissances à acquérir en vue de la mise en œuvre du système de diagnostic de défauts DIAPASON.

IV.1	Introduction	136
IV.2	Catégorisations des connaissances	137
IV.3	Une classification	142
IV.4	la méthode SAGACE	155
IV.5	Description d'une unité de production industrielle	163
IV.6	SAGACE comme méthode de recueil	168
IV.7	SAGACE comme référentiel pour le diagnostic	171
IV.8	Conclusion	179
Références bibliographiques		180

IV.1 INTRODUCTION

Ce chapitre forme un tout avec les chapitres précédents : nous avons dégagé les principaux éléments qui composent le facteur humain en supervision de processus de fabrication, à travers une typologie d'activités opératoire, cognitive et collective ; nous avons ensuite défini les contours d'une typologie d'erreurs, qui nous a permis de décliner une typologie d'aides. Nous avons ensuite tracé les contours d'une méthodologie de conception, en insistant plus particulièrement sur la nécessaire préparation du projet. L'aspect acquisition des connaissances intervient, une fois les objectifs généraux définis, c'est-à-dire dès que la phase de développement est lancée.

Quelle que soit l'aide que l'on envisage de concevoir, un travail conséquent devra être mené pour rassembler les connaissances disponibles qui concernent le processus de fabrication. En effet, les systèmes informatisés d'aide à l'opérateur manipulent indifféremment des données numériques et des symboles, c'est-à-dire des connaissances. Notre objectif sera donc de dégager les éléments d'une méthodologie d'acquisition des connaissances, adaptée à la conception d'aides à la supervision. La difficulté est de déterminer celles susceptibles d'être utilisées, ainsi que les méthodes qui peuvent en faciliter le recueil.

Ce chapitre propose de caractériser les connaissances nécessaires pour chacun des types d'aide, ainsi que les méthodes de recueil et de formalisation proposées dans divers champs disciplinaires. Ce chapitre décrit également l'utilisation de la méthode SAGACE de modélisation des systèmes complexes. SAGACE est considérée sous l'angle de ses potentialités de recueil et de formalisation des connaissances du processus modélisé. La revue des principales fonctionnalités de cette méthode est illustrée par des exemples tirés de la modélisation du PEV. Ses apports, en termes de référentiel de connaissances pour l'aide à la supervision, sont évalués par rapport aux connaissances utilisées en surveillance/diagnostic, en particulier celles qu'utilisent les modules du système de diagnostic DIAPASON.

IV.2 CATEGORISATIONS DES CONNAISSANCES

La première question que l'on se pose, en abordant le domaine du recueil de connaissances, est la suivante : **qu'est-ce-que la connaissance ?** Cette question, somme toute naïve n'a, jusqu'ici, pas trouvé de réponse satisfaisante. Elle est sans doute une des causes du "goulet d'étranglement" si souvent évoqué par les ingénieurs de la connaissance, ou cogniticiens (knowledge engineer [JOHAN 91]). En effet, comment être sûr d'extraire convenablement cette connaissance quand celle-ci prend des formes multiples et est étroitement liée aux mécanismes de raisonnement humain ? Notre propos n'est pas de considérer la connaissance du point de vue psychologique ou bien du point de vue de l'intelligence artificielle (IA), mais il nous semble que dans ces disciplines, le problème de la caractérisation de la nature des connaissances se pose d'une manière particulièrement cruciale : la première discipline cherche à découvrir les mécanismes cognitifs qui donnent corps à la connaissance, pour la seconde on cherche à en concevoir des supports artificiels.

Nous essaierons cependant d'en avoir une idée au travers de ce que nous en dit Pitrat : "J'appelle connaissances les faits qui ne servent pas à décrire la situation et qui n'ont pas été établis par le système [expert] pour donner des propriétés de cette situation ; les connaissances servent à élaborer des faits nouveaux ou à déterminer les actions qu'il faut entreprendre" (...) "la différence entre fait et connaissance réside dans la mémorisation que nous en faisons et dans son utilisation : si cette utilisation est active, comme avec une règle, nous avons tendance à parler de connaissance, alors que si elle est passive, nous parlons de faits" [PITRA 90]. Toutefois, Pitrat nous ramène rapidement à la réalité (...) il n'y a pas de différence essentielle entre fait et connaissance ; simplement dans chaque situation un sous-ensemble des faits a une certaine permanence qui lui vaut un traitement spécial et de s'appeler 'connaissance' ".

Nous retiendrons que la connaissance traduit, en quelque sorte, le résultat de l'appropriation cognitive de faits qui nous sont utiles pour raisonner (résoudre un problème), pour agir sur le monde et pour construire d'autres faits. Nous emploierons le terme connaissance comme terme générique désignant l'ensemble des faits, des informations qui se rapportent à une problématique donnée et qui présentent la propriété d'être mobilisables en vue de la résolution d'un problème. Nous englobons ainsi l'ensemble des supports de connaissances, depuis les documents techniques qui décrivent le processus de fabrication, jusqu'à l'opérateur dont les cogniticiens cherchent à extraire l'expertise.

Puisque la connaissance recouvre un "univers de faits", leur regroupement selon des catégories de connaissances est une démarche naturelle. Pour tenter d'en cerner la diversité, nous les avons distinguées arbitrairement selon deux catégories principales : selon qu'elles visent l'homme (point de vue des sciences cognitives) ou le processus de fabrication (point de vue des sciences de l'ingénieur).

IV.2.1. Connaissances sur l'homme

Du point de vue de l'homme, les connaissances employées sont en étroite relation de dépendance avec le type de situation [HOC 87]. Trois types de situations et donc trois types de connaissances peuvent être rencontrées [HOC 91] :

- les connaissances qui se rapportent à une situation de transformation se scindent en recherche à l'intérieur d'un espace d'états, pour une situation de transformation statique, et recherche à travers les évolutions d'un processus continu, pour une situation de transformation dynamique ; ces situations se caractérisent par des évolutions non prévues qui imposent des contraintes temporelles fortes à l'opérateur qui doit réagir pour les contrebalancer,

- les connaissances qui se rapportent à des situations de diagnostic et de décision, (dans le chapitre II, nous avons vu que l'essence d'un système de diagnostic réside dans le type de connaissances qu'il manipule : **structure, comportement, description fonctionnelle**, ou encore l'association entre **symptômes de dysfonctionnement et causes potentielles**),
- les connaissances se rapportant à des situations de conception, qui indiquent que la résolution de problème s'aide de l'élaboration de plans afin d'atteindre un but donné.

Ces trois types de situations se rencontrent souvent dans les activités humaines. Prenons l'exemple de l'ingénieur procédé qui conçoit une installation : il est soumis à des situations de transformation statique (la conception d'une installation est un processus à long délai de réponse, vis-à-vis d'autres situations qui requièrent une réponse immédiate à un problème donné. L'évaluation du travail fourni est d'ailleurs effectuée sur la base d'états d'avancement), de décision (il doit effectuer des choix de matériel, il doit décider de la meilleure disposition des appareils dans l'espace, etc.) et bien évidemment de conception (la conception d'une installation procède par étapes successives ; le plan de l'installation constitue la réponse de l'ingénieur, il n'existe pas, a priori, mais il est le résultat de tout un cheminement intellectuel). Dans le cas de l'opérateur qui supervise un processus industriel : il est soumis à des situations de transformation dynamiques qui l'obligent à s'adapter aux évolutions du processus (on lui demande de s'adapter à ces évolutions, d'anticiper les évolutions non optimales, et de réagir dans les délais les plus brefs), à des situations de diagnostic et de décision (l'opérateur doit diagnostiquer les défauts et décider d'actions de correction, tout en étant soumis à des contraintes temporelles fortes), et de conception (si une situation n'a pas été expérimentée par l'opérateur, celui-ci va être placé dans des conditions de résolution de problème impliquant une recherche parmi l'ensemble des situations répertoriées, la recherche des situations analogues, etc., toujours sous contrainte temporelle).

Bien qu'à chaque type de situation correspond une ou plusieurs représentations spécifiques, les diverses catégorisations convergent vers les trois catégories suivantes :

- 1. les connaissances générales sur le domaine, elles ont un caractère déclaratif, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas directement transformables en actions mais servent à résoudre un problème (le comportement basé sur les connaissances, ou KB selon Rasmussen),
- 2. les connaissances issues de l'expérience, ce sont des savoir-faire issus d'un processus d'apprentissage [LE MOI 92] ; elles prennent la forme de règles, de normes, de procédures, d'heuristiques (le comportement basé sur les règles, ou RB selon Rasmussen),
- 3. les connaissances expertes sont le fruit de la transformation de règles issues de l'expérience, en savoirs [LE MOI 92] : "il n'est de savoir que dans l'action, il n'est d'action que dans le savoir". Selon Le Moigne, nos savoirs sont des "métaconnaissances"¹, c'est-à-dire des connaissances qui permettent d'en construire de nouvelles et qui sont immédiatement utilisables ; par ailleurs, "l'expert n'est pas celui qui démontre la convergence d'un bon algorithme. Mais celui qui, par ruse raisonnée, dispose de larges collections d'heuristiques plausibles" [LE MOI 90] (le comportement basé sur les automatismes ou SB selon Rasmussen).

La figure IV.1 propose une illustration de la manière dont sont imbriqués savoirs et savoir-faire.

¹ Cette terminologie a initialement été introduite par [PITRA 90].

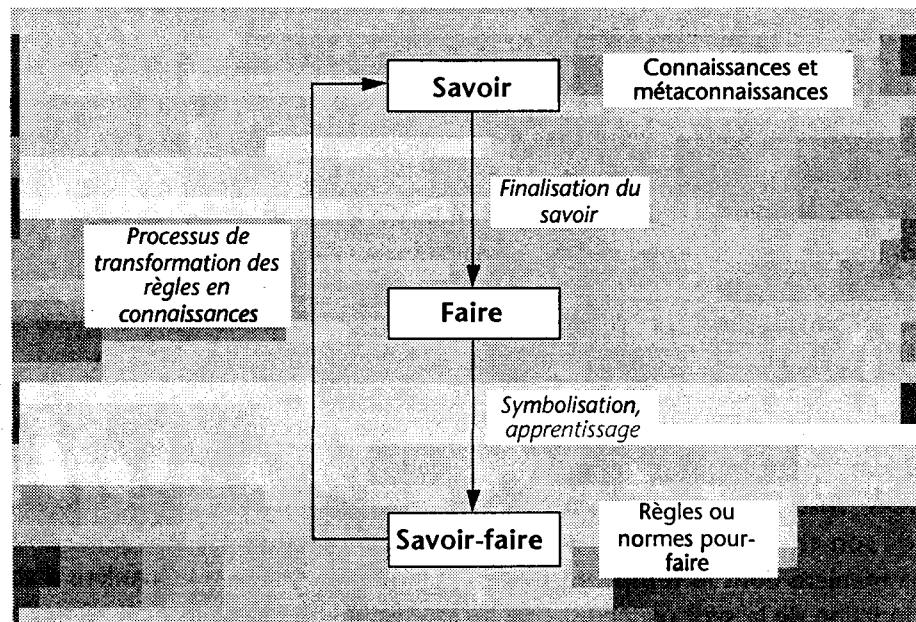


Figure IV.1 : Savoir-faire et savoir, expérience et expertise.

Rien n'interdit de supposer que ces trois types de connaissances puissent être mobilisés dans chacune des situations typiques introduites par Hoc. Ce n'est qu'une hypothèse mais qui est fortement corroborée par le fait qu'en situation de conception, on distingue **plan procédural** et **plan déclaratif** [HOC 87]. De là, peut-on faire l'hypothèse de plans experts ? Qu'en est-il pour les autres situations ? Une étude sur le sujet pourrait laisser entrevoir d'intéressantes perspectives, mais nous en resterons là, pour ce qui est de notre problématique.

Une catégorisation classique en IA est celle qui distingue **connaissances profondes** (deep knowledge) et **connaissances de surface** (shallow knowledge). Les connaissances profondes présentent la caractéristique de n'être pas orientées problème à résoudre, mais sont utilisées comme connaissances générales sur un domaine particulier. Ce sont, par exemple, les approches utilisant des connaissances sur la structure, les comportements et le fonctionnement du processus. Les connaissances de surface prennent la forme d'associations, par exemple entre symptômes et causes physiques ; ce sont des connaissances finalisées. Nous rangerons donc les connaissances issues de l'expérience et expertes dans ce groupe.

Les connaissances de l'expert, c'est-à-dire les trois catégories de connaissances qui viennent d'être évoquées (à ne pas confondre avec les connaissances expertes), sont l'objet de nombreux travaux en IA. Ces travaux se réfèrent à des catégorisations proposées dans d'autres disciplines, auxquelles l'IA a donné un caractère plus opérationnel [AUSSE 89]. Les différentes catégorisations sont citées ici à titre indicatif :

- du point de vue informatique, les connaissances sont classées selon des **niveaux de structuration** (éléments de base, assertions, relations, théorèmes, algorithmes de résolution, stratégies et heuristiques, métacognitions),
- d'un point de vue logique, l'intérêt est mis sur un **degré de certitude** d'une connaissance donnée (connaissances de définition, évolutives, incertaines, vagues, typiques),
- d'un point de vue linguistique, les connaissances sont classées en fonction de **niveaux d'abstraction** (connaissances du niveau domaine, inférence, tâche, et stratégie),
- d'un point de vue psychologique, les connaissances sont classées selon leur **forme** (forme déclarative, procédurale, spatiale, visuelle, etc.), ou encore selon leur **degré de confidentialité** (connaissances publique, partagée, privée).

IV.2.2. Connaissances sur le processus de fabrication

Une catégorisation des connaissances se rapportant au processus de fabrication et qui vient immédiatement à l'esprit est celle qui distingue les connaissances selon les disciplines impliquées, notamment : le génie des procédés, l'automatique, l'informatique, la mécanique, etc. Chaque discipline a ses propres représentations du même système, c'est-à-dire le processus de fabrication ; la différence réside principalement dans les théories privilégiées.

La catégorisation des connaissances sur les systèmes, en général, distingue deux courants de pensée : le courant "analytique", largement majoritaire, et le courant systémique [LE MOI 90].

Dans le courant "analytique", on retrouve la grande majorité des théories utilisées en modélisation de systèmes. Walliser a recensé l'ensemble des paradigmes de modélisation qui ont fondé les principales théories scientifiques [WALLI 77] : la représentation d'un système est fonction de la manière dont est isolé le système de son environnement, de la manière dont est décomposé le système en ses sous-systèmes, et de la manière dont le temps est pris en compte ; par ailleurs, la manière d'aborder la modélisation est fonction de la syntaxe choisie qui caractérise un niveau de formalisation du modèle (distinction entre modèle qualitatif et modèle quantitatif), de la sémantique d'un modèle (l'auteur considère notamment la coupure entre le sujet qui modélise et le système modélisé : si l'on compare les démarches de la physique classique et de la mécanique quantique, pour l'une, le système est déterminé par un comportement régi par des lois universelles, pour l'autre le système observé et modélisé n'est pas isolable du sujet qui observe le système en vertu du principe d'incertitude d'Heisenberg), et du caractère pragmatique qu'on a bien voulu lui conférer (part de subjectivité que le modélisateur introduit).

Dans le courant "systémique", qui se fixe pour objectif de modéliser les systèmes en conservant leurs caractéristiques complexes, Le Moigne propose une catégorisation des connaissances en neuf niveaux d'organisation d'un système [LE MOI 90] :

- 1. le phénomène est identifiable, isolable de son milieu (les connaissances concernent ce qu'est physiquement le système tel que nous le percevons),
- 2. le phénomène identifié est perçu par ce qu'il fait ou est présumé faire (le système physique transforme des flux d'énergie (E), de matière (M) ou d'information (I) et retourne des flux E, M, I vers l'environnement) ; à ce niveau est associée une finalité,
- 3. le phénomène est doté d'une certaine stabilité (on s'intéresse à des propriétés de régulation des activités),
- 4. la régulation opère grâce à une circulation interne d'informations, "le phénomène s'informe sur son propre comportement",
- 5. le système est capable de décider de son comportement (il se compose d'un niveau opérant et d'un niveau décisionnel, dont les interactions conduisent à former une boucle de régulation) ; le système évalue son comportement vis-à-vis de sa finalité,
- 6. ce système est capable de mémoriser : il est donc articulé en trois sous-systèmes, les systèmes Opérant, d'Information/mémorisation et de Décision formant le "modèle canonique O.I.D" et qui le rendent apte à reconnaître des formes mémorisées et de décider d'actions en accord avec la forme reconnue,
- 7. le système est capable de coordonner ses décisions d'action. Ici le système est capable de planifier ses décisions d'action,
- 8. le système est capable d'élaborer de nouvelles actions, le système de décision est alors constitué d'un système de coordination et d'un "système d'imagination". Il est possible d'associer à un tel système la capacité de créer et simuler des actions nouvelles, c'est-à-dire qu'il est capable d'adaptation,

- 9. le système est **capable de refinalisation**, caractéristique des systèmes intelligents ; le système est autonome et se fixe ses propres objectifs.

Cette catégorisation en neuf niveaux de perception d'un système est celle qui a été adoptée dans la méthode SAGACE, que nous envisagerons après avoir établi une classification des connaissances et des méthodes d'acquisition utilisées dans le courant "analytique" (selon l'expression de Le Moigne), par comparaison au courant "systémique".

IV.3 UNE CLASSIFICATION

L'analyse et la formalisation des connaissances disponibles sur un système est une étape importante dans un projet d'aide à l'opérateur. Un référentiel technique regroupe et fait le point des connaissances disponibles (le processus de fabrication et connaissances sur l'homme) pour le projet.

Ce référentiel doit contenir l'ensemble des connaissances disponibles, c'est-à-dire les connaissances relatives à l'installation, l'instrumentation, etc. Il ne doit pas seulement être constitué des connaissances formalisées sous forme de livres de procédé, de sécurité, de modes opératoires, mais également des connaissances acquises par expérience, ainsi que des connaissances expertes des opérateurs. Nous retrouvons ici les trois catégories de connaissances de l'expert : les **connaissances générales, les savoir-faire et les savoirs**. Cette catégorisation est équivalente à la catégorisation envisagée en psychologie, qui distingue les connaissances publiques, partagées et privées.

Les **connaissances publiques** sont contenues dans les **livres procédé** et sont disponibles immédiatement ; elles sont à **caractère déclaratif**. Les **connaissances partagées** sont communes à un certain nombre d'individus travaillant dans le même domaine, c'est une mise en commun de savoir-faire. Les **connaissances privées** portent sur l'expérience personnelle des experts, ce sont leurs **savoirs** ; elles ne sont pas directement accessibles.

C'est cette catégorisation que nous proposons pour décrire et classer les connaissances auxquelles le projet d'aide devra faire appel. Nous avons, par ailleurs, choisi de la croiser avec la typologie des dimensions de l'activité humaine (donc des aides informatisées) que nous avons considérée comme hypothèse de travail. Ce croisement implique un découpage plus fin des types de connaissances, en fonction du niveau de confidentialité et du type d'activité.

Notre objectif n'est pas l'exhaustivité mais le guidage du modélisateur vers des méthodes d'acquisition adaptées à ses besoins. La méthode par entretiens, très prisée en psychologie cognitive, est en fait une méthode largement utilisée dans d'autres disciplines, et elle a donc un caractère universel. Nous illustrerons notre propos à travers l'exemple du PEV.

IV.3.1. Connaissances publiques

Les documents techniques sont une première source de connaissances disponibles. Elles sont dites générales car elles ne sont pas associées à une méthode de résolution particulière, elles expriment plutôt des faits en dehors de tout contexte d'utilisation particulier. Une de leurs caractéristiques principales est la stabilité.

IV.3.1.1 Dimension collective

Les connaissances relevant de cette dimension ont trait aux aspects organisationnels : quels sont les moyens humains mis en œuvre pour assurer la supervision du processus ? Comment se répartissent les rôles ? Quels sont les moyens matériels mis en œuvre pour que chacun remplisse sa mission ? Comment sont organisées les équipes de conduite ?

Dimensions	Aides en ligne à la supervision	Connaissances publiques	Méthodes
Collective	<u>Aide au travail collectif</u>	Moyens humains Moyens de communication Organisation du travail au sein de l'équipe de conduite Définition des rôles et des tâches Organisation entre équipes de conduite et équipe de maintenance	Méthodes de description des acteurs et répartition des rôles

Tableau IV.1 : Dimension collective / connaissances publiques / méthodes.

Le PEV fonctionne ponctuellement (les essais s'étendent généralement sur une semaine) ; en dehors de ces campagnes, les équipes de conduite sont chargées de piloter d'autres installations. Trois équipes composées de 3 agents (un chef de quart, un adjoint et un opérateur) se relaient en 3*8 pour superviser le PEV. Le chef de quart supervise les opérateurs et la production ; il est chargé de veiller à la bonne marche de l'ensemble du processus de fabrication ; il doit noter, sur le cahier de quart, les événements marquants (cela permettra à l'équipe suivante d'avoir un historique complet des événements sur le poste précédent). Un opérateur est chargé du suivi de fonctionnement sur le SNCC. Le troisième opérateur est chargé d'effectuer les rondes ; il a pour rôle de vérifier les paramètres de fonctionnement qui ne sont pas transmis en salle, d'effectuer des opérations manuelles de pose du conteneur, d'effectuer les prises d'échantillons requises.

IV.3.1.2 Dimension cognitive

Le premier niveau cognitif correspond aux aides au diagnostic et aide à la représentation mentale (cf. chapitre II), dont les solutions sont la surveillance/diagnostic et l'IHM. Les connaissances à recueillir ont trait aux informations de conception de l'installation : mission du système de production, objectifs et contraintes fonctionnelles, processus de transformation envisagé (comportement souhaité, traduction des fonctions en choix techniques, critères de performance du fonctionnement, flux de matière, d'énergie et d'information entrant en jeu dans le processus), organisation matérielle envisagée pour assurer la mission (propriétés fonctionnelles des appareils, description des variables caractérisant les états fonctionnels des composants, liens entre appareils, topologie, etc.), fonctions génériques (dynamique des phénomènes mis en jeu, fonctions standard utilisées, du type transformations chimiques, électriques et mécaniques).

En psychologie cognitive, Rasmussen classe ces connaissances selon leur degré d'abstraction [RASMU 79]. En partant du niveau le plus abstrait, on distingue : les "objectifs" du processus de fabrication, les "fonctions abstraites", les "fonctions génériques", le niveau "structure-fonction", puis le niveau "anatomie". Rasmussen considère qu'en situation de résolution de problème, l'opérateur ou l'ingénieur navigue à travers ces connaissances de façon montante (en abstraction) quand, un défaut est détecté, l'opérateur cherche à en déterminer l'importance en remontant les niveaux pour déterminer quelles sont les fonctions atteintes. Il emploie une approche descendante pour définir les moyens d'action pour en contrebalancer les effets. Les caractéristiques principales de ces niveaux d'abstraction sont résumées dans le tableau IV.2.

Niveau d'abstraction	Description du niveau	Exemples de connaissances
Objectifs	Mission assignée, performances recherchées	Spécification des objectifs, des services et des contraintes
Fonctions abstraites	Procédé de transformation	Comportement souhaité, choix des techniques et critères de performance du système
Fonctions génératrices	Organisation fonctionnelle	Modèle numérique décrivant les propriétés du processus, en utilisant les principes premiers (les ontologies)
Structure-fonction	Organisation matérielle	Interdépendances fonctionnelles entre appareils
Anatomie	Isolation des appareils selon des critères physiques	Schémas d'installation, plan de circulation des fluides

Tableau IV.2 : Les niveaux d'abstraction de Rasmussen. (résumé).

Le second niveau cognitif correspond à l'aide à l'adaptation. Dans le chapitre II, nous avions évoqué l'hypothèse d'un plan schématique devant permettre à l'opérateur de se situer par rapport à son objectif de manière analogue au plan de route en conduite automobile. Nous avions également émis l'hypothèse que ce plan était construit à partir d'une mise en relation des configurations de marche du processus. Bien entendu, il n'existe pas de méthode recensant ce type de connaissances. Elles sont contenues dans les documents techniques, et doivent être recueillies par le biais d'entretiens avec les ingénieurs de production et les équipes de supervision. (On s'intéresse ici au plan déclaratif de Hoc).

Le troisième niveau cognitif concerne l'aide à l'anticipation. De même que pour le niveau adaptation, nous avions fait l'hypothèse de chemins privilégiés et fournis par le système d'aide, en fonction de critères tels que la distance à parcourir, le délai supplémentaire, etc. Les connaissances correspondantes concernent les stratégies d'exploitation, au sein desquelles les mesures visant l'exploitation de l'installation sont représentées.

Ces connaissances sont d'abord utilisées pour concevoir l'IHM ainsi que l'aide au diagnostic.

Les méthodes employées pour formaliser ces connaissances sont essentiellement basées sur l'analyse du système en fonctionnement normal (par exemple SADT, FAST, APTE). Les connaissances de mauvais fonctionnement sont issues de l'expérience soit de cas similaires sur d'autres installations soit sur l'installation elle-même. Donc les méthodes d'analyse en fonctionnement anormal sont rangées parmi les méthodes d'acquisition des connaissances partagées.

Le tableau IV.3 en décrit une classification. Les points d'interrogation indiquent que nous ne connaissons pas de méthode d'acquisition des connaissances pour les niveaux concernés.

Dimensions	Aides en ligne à la supervision	Connaissances publiques	Méthodes
Cognitive	<i>Aide à l'anticipation</i>	Stratégies d'exploitation Contextes d'exploitation Conditions de changement d'objectif de production: mise en sécurité, en secours, en repli	?
	<i>Aide à l'adaptation</i>	Modes de fonctionnement Domaines de fonctionnement prescrit, spécifié Configurations nominales, de repli, de sécurité Scénarii de récupération prescrits	?
	<i>Aide au diagnostic</i>	Mission : spécification fonctionnelle des objectifs et des contraintes, services à remplir et interactions fonctionnelles Processus de transformation : comportement souhaité, choix des techniques, critères de performance du système Organisation fonctionnelle : objectif général et sous-objectifs, flux d'entrée/sortie. Organisation matérielle : organisation des appareils principaux, propriétés fonctionnelles et appareils auxiliaires Anatomie du système : identification des objets selon des critères qualitatifs Interfaces de conduite : informations transmises, synoptiques disponibles Instrumentation : actionneurs (position, mode de fonctionnement), caractéristiques des mesures (plage de variation, étendue de mesure, précision, biais minimum détectable)	Méthodes d'analyse de systèmes en fonctionnement normal : SADT, FAST, D.En, APTE
	<i>Aide à la représentation mentale</i>		

Tableau IV.3 : Dimension cognitive / connaissances publiques / méthodes.

IV.3.1.3 Dimension opératoire

Les connaissances de la dimension opératoire correspondent aux aspects exécution des tâches, elles ont donc un caractère fortement procédural.

Dans le cas du PEV, le procédé de fabrication du verre est semi-continu : la vitrification consiste en des cycles d'alimentation puis de coulée, qui requièrent, de la part des opérateurs, de modifier la configuration de marche du processus (passage d'une configuration d'alimentation seule, à une configuration d'alimentation avec coulée). Une procédure décrit l'ordonnancement des étapes correspondantes.

Les connaissances du niveau opératoire concernent la répartition des tâches humaines et des tâches automatisées, le positionnement des actionneurs et des commandes ainsi que les interventions en local (tableau IV.4). Les méthodes de description sont par exemple la méthode MAD proposée par Scapin et Golbreich [SCAPI 89], et la méthode d'analyse et de modélisation utilisant le formalisme de description SADT et les réseaux de Pétri [ABED 90]. SADT est utilisée comme description fonctionnelle du système homme-machine ; il s'agit d'identifier les tâches relevant de la responsabilité de l'homme, et celles relevant de la machine (le système de contrôle-commande), et celles relevant des deux à la fois ; ainsi est construit un modèle selon une hiérarchie de niveaux de détail, chaque niveau décrivant les éléments de tâche et leurs interactions (selon Abed, le modélisateur décompose les "tâches composées" autant de fois que nécessaire pour parvenir, au niveau de détail le plus fin, à des "tâches terminales"). Les réseaux de Pétri sont utilisés au niveau des "tâches terminales" ; ils décrivent les séquences d'opérations élémentaires que l'opérateur doit

effectuer, et les conditions de passage d'une place à l'autre. Chaque tâche terminale est décrite sous ce formalisme de l'automatique.

Dimensions	Aides en ligne à la supervision	Connaissances publiques	Méthodes
Opératoire	<u>Aide à l'application des procédures</u>	<p>Tâches humaines prescrites : but et exigences ; tâches courantes, périodiques (rapports horaires, rondes, prises d'échantillons), exceptionnelles (reprise en manuel, réglage de paramètres de fonctionnement en local), etc.</p> <p>Ordonnancement des tâches dans le temps</p> <p>Commandes, moyens d'action sur le processus</p> <p>Procédures d'urgence</p>	<p>OFM [MITCH 86]</p> <p>Méthode MAD : modélisation des interactions homme-ordinateur [SCAPI 89]</p> <p>Méthode de description des tâches opérateur mêlant les méthodes SADT et les réseaux de Pétri [Abed 90]</p>

Tableau IV.4 : Dimension opératoire / connaissances publiques / méthodes.

IV.3.2. Connaissances partagées

Nous appelons connaissances partagées les connaissances relevant de l'expérience des opérationnels, et qui sont communes à un groupe d'individus ayant les mêmes préoccupations (les ingénieurs de production, les équipes de supervision ou les équipes de maintenance). Ce sont des connaissances qui portent sur l'installation (fréquence de pannes de certains appareils), sur les capteurs et actionneurs (précision réelle), mais également sur les opérateurs (erreurs et besoins informationnels). Comme dans les connaissances publiques, nous employons le découpage en dimension collective, cognitive puis opératoire.

IV.3.2.1 Dimension collective

Les connaissances relatives aux aspects collectifs sont la répartition effective des tâches et les échanges informationnels entre opérateurs (tableau IV.5). L'attention porte sur la manière dont les opérateurs ont appris à travailler ensemble, sur la manière dont leurs activités respectives forment un tout cohérent vis-à-vis de leurs objectifs (organisation réelle du travail au sein de l'équipe).

Dans le cas du PEV, les opérateurs font des rotations entre tâches de surveillance sur le SNCC et tâches en local, de sorte qu'ils ont une vision d'ensemble du processus de vitrification, et cela permet d'éviter le travail routinier. Il faut noter que ces rotations ne se font pas sur la durée d'un poste.

Les entretiens mise à part, nous ne connaissons pas de méthode spécifique de recueil.

Dimensions	Aides en ligne à la supervision	Connaissances partagées	Méthodes
Collective	<u>Aide au travail collectif</u>	<p>Modes de communication les plus employés au sein de l'équipe</p> <p>Coordination entre opérateurs</p> <p>Répartition des tâches</p>	?

Tableau IV. 5 : Dimension collective / connaissances partagées.

IV.3.2.2 Dimension cognitive

Descriptif

Les connaissances du premier niveau cognitif (aide au diagnostic et aide à la représentation mentale) sont liées aux comportements du processus en présence de perturbations et de dysfonctionnements, ainsi que des solutions retenues pour y remédier (tableau IV.6). Ces connaissances ont principalement trait aux représentations que se forgent les opérateurs quant aux interactions entre variables importantes, c'est-à-dire à la dynamique du système, aux conditions optimales de fonctionnement, etc.

Dans le cas du PEV, la solution contenue dans le bas de la colonne de dépoussiérage est maintenue à environ 100 °C ; si cette solution entre en ébullition, elle peut provoquer un reflux vers le calcinateur. Cette perturbation est diagnostiquée grâce aux enregistreurs, qui gardent une trace graphique de l'évolution des paramètres de calcination. C'est davantage la forme de l'évolution de ces paramètres que leur valeur instantanée qui permet aux opérateurs d'identifier l'origine de ce comportement.

Deux types de connaissances peuvent être recueillis : les connaissances qui expriment les interactions complexes entre appareils, qui n'étaient pas forcément perceptibles lors de la conception de l'installation, et les connaissances qui relèvent des dysfonctionnements.

Les méthodes

La méthode des **graphes de fluence** décrit les liens de causalité entre variables du processus. Son formalisme est très proche d'un graphe causal tel qu'employé dans DIAPASON (se reporter au chapitre II) à ceci près que le modèle de fluence comporte une description explicite des moyens d'action (les actionneurs) et des moyens d'information (les variables mesurées) dont disposent les opérateurs. La démarche d'élaboration d'un graphe de fluence distingue deux étapes :

- 1. l'élaboration d'une matrice d'incidence entre les variables importantes pour la supervision du processus de fabrication, et recensement des influences entre variables,
- 2. la description graphique des relations d'influence entre variables (débit d'entrée, débit de sortie, puissance de chauffe fournie au réacteur chimique), des capteurs et actionneurs (température surveillée, vanne commandant le refroidissement), ainsi que de l'objectif assigné à l'opérateur (maintien de la température dans la zone acceptable).

L'application de cette méthode repose sur une très bonne connaissance du système physique, car une analyse par graphes de fluence laisse une place importante à la subjectivité du modélisateur : quelles règles formelles permettent de mettre en évidence les chemins de causalité ? Comment valider la représentation ? Leyval a montré que la causalité est dépendante des objectifs de modélisation [LEYVA 91] : "le graphe causal apparaît (...) comme un moyen convivial pour modéliser causalement un procédé, selon l'observation physique des phénomènes ou l'interprétation choisie". De nombreux travaux ont été centrés sur les moyens de retrouver la causalité dans un système, et plus particulièrement De Kleer [DE KLEE 84] et Iwasaki et Simon [IWASA 86] : Iwaski et Simon proposent une approche formelle de modélisation causale qui, à partir des équations du système, propose d'organiser les paramètres selon l'ordre dans lequel ils sont déduits en simulation, c'est-à-dire l'ordre dans lequel les paramètres du modèle sont calculés ; De Kleer et Brown proposent, quant à eux, de modéliser la causalité en considérant la structure du système (les flux, les conduits et les appareils), ainsi que les confluences (traduction qualitative des équations différentielles classiques), qui régissent le comportement du système. La méthode des graphes de fluence est donc à employer avec précaution.

Les méthodes couramment employées pour recenser les dysfonctionnements sont les méthodes AMDE et les arbres de défaillances. L'AMDE permet de recenser les défaillances pouvant survenir sur chacun des appareils de l'installation, et d'en expliciter les causes. C'est une méthode inductive car elle propose d'aller du local vers le global : il s'agit d'analyser les comportements dysfonctionnels sur chacun des appareils puis d'en analyser les causes (l'appareil subit la perturbation provenant des appareils amont) et les conséquences potentielles, c'est-à-dire les effets induits sur les appareils aval, ainsi que sur l'ensemble du système. La méthode des arbres de défaillances met l'accent sur les enchaînements d'événements dysfonctionnels et leurs combinaisons qui conduisent à des événements redoutés. La méthode permet de structurer ces événements sous forme d'arborescences avec, au sommet, l'événement redouté, et à la base les événements initiaux. C'est une méthode déductive car elle prône une approche descendante de l'évolution redoutée vers les événements élémentaires nécessaires - mais non suffisants s'ils surviennent seuls - à l'apparition de l'événement redouté.

En règle générale, les résultats de ces analyses sont disponibles avec, certes, des degrés de formalisation variés. Sur l'installation PEV, les études fiabilistes prennent principalement en compte les événements susceptibles d'influer sur la qualité du verre.

Les connaissances typiques du niveau **adaptation** sont les modifications significatives apportées par les opérateurs dans le séquencement des tâches. Cette modification peut être envisagée de deux manières :

- modification par rapport à une **prescription** : l'enchaînement des tâches peut être adapté par l'opérateur s'il l'estime nécessaire et si l'enchaînement des tâches n'est pas défini de manière rigide (si l'enchaînement des étapes est contrôlé par le SNCC, par exemple en phase de démarrage, les opérateurs sont contraints de suivre un ordre déterminé d'étapes et de les valider au fur et à mesure de leur réalisation ; en marche nominale, les opérateurs organisent leurs activités de surveillance sans ordre particulier),
- modification par rapport au **contexte** : l'opérateur peut être amené à modifier le plan prévu sur apparition d'événements (l'arrêt de la rotation du calcinateur implique sa mise en position de sécurité, c'est-à-dire l'arrêt de toutes les alimentations et le passage automatique sur moteur auxiliaire).

Les connaissances du niveau **anticipation** concernent principalement les stratégies de récupération, les alternatives privilégiées en fonction du contexte d'exploitation. La méthode des entretiens, ou encore des questionnaires, semble ici la seule méthode utilisable.

Dimensions	Aides en ligne à la supervision	Connaissances partagées	Méthodes
Cognitive	<i>Aide à l'anticipation</i>	Stratégies de repli et de récupération Stratégies de mise en sécurité	?
	<i>Aide à l'adaptation</i>	Implications des défauts et défaillances diagnostiqués sur les fonctions d'intérêt (production, sûreté de fonctionnement) Particularités de certaines phases transitoires Délais de réaction aux dysfonctionnements Mesures à prendre en cas de dysfonctionnement Contextes de conduite	?
	<i>Aide au diagnostic</i>	Comportement normal : description des variables et de leurs interactions	Graphes de fluence Diagramme-blocs
	<i>Aide à la représentation mentale</i>	Comportement du système sur apparition de défaut : variables sensibles, zones de fonctionnement des variables de contrôle (zone normale, hors tolérance, interdite), mesures de mise en sécurité sur apparition de défaut, analyse cause/conséquences pour affiner l'analyse.	Méthodes d'analyse de systèmes en fonctionnement dégradé : AMDE, HAZOP, Arbres d'événements, Arbre de défaillances, diagrammes causes/conséquences, Graphes de Markov [VILLEM 88] [FADIER 90]

Tableau IV.6 : Dimension cognitive / connaissances partagées / méthodes.

IV.3.2.3 Dimension opératoire

Les connaissances du niveau opératoire correspondent à la manière dont les opérateurs mettent en application les procédures prescrites² (informations utilisées, séquencement des étapes, méthodes de travail), les besoins informationnels tout le long de l'exécution d'une procédure, ainsi que les erreurs commises dans la sélection et l'exécution (tableau IV.7).

Les connaissances relatives aux erreurs de sélection et d'exécution sont recueillies via des méthodes fiabilistes, au sens ici de probabilités d'apparition d'une erreur dans la réalisation d'une tâche manuelle. Les méthodes THERP et SHERPA sont parmi les méthodes les plus employées [VILLEM 88].

La méthode THERP (Technique for Human Error Rate Prediction), déroule un processus de recueil et d'analyse en cinq étapes :

- **recenser les défaillances du système** (méthodes d'analyse de sûreté orientées erreurs humaines, méthodes du type AMDE et Arbre de Défaillances),
 - **décrire et analyser les tâches réalisées par les opérateurs** (décomposition des tâches en actions élémentaires),
 - **évaluer les probabilités d'insuccès des tâches**
- a- l'enchaînement chronologique des différentes actions élémentaires est établi par

² Nous avons vu, dans le chapitre I, que les tâches fixées par les concepteurs sont systématiquement traduites sous forme opérationnelle par les opérateurs.

- construction d'un arbre de probabilités, les actions sont présentées dans l'ordre de leur apparition dans la réalisation de la tâche,
- b- les probabilités d'échec ou de réussite sont évaluées en faisant appel à des banques de données générales répertoriant les probabilités d'échec³,
 - estimation de l'effet des erreurs humaines sur le système à partir de banques de données chiffrées,
 - proposition d'améliorations en vue d'optimiser leur fiabilité (amélioration ergonomiques, introduction de redondances).

La méthode SHERPA (Systematic Human Error Rate Prediction Analysis) se décline de la manière suivante :

- identifier les tâches opérateurs,
- analyser ces tâches par description des buts et sous-buts, des procédures et des actions élémentaires, de manière à relier à chaque sous-but les actions correspondantes, et d'associer les informations nécessaires à leur réalisation et les entités impliquées (outils, interfaces),
- classer les erreurs selon le type de comportement de comportements SB, RB, et KB (cf. Rasmussen),
- évaluer les probabilités d'apparition des erreurs, sur la base de jugement d'experts du système sur lequel l'analyse fiabiliste est menée,
- proposer des solutions (aménagement ergonomique des postes et interfaces aménagement des procédures, proposition de formations).

L'analyse de l'activité des opérateurs (commandes et actions, comportement gestuel et visuel, etc.) permet d'analyser les écarts existant entre les tâches prescrites et la manière dont les tâches sont réellement effectuées.

D'un point de vue psychologique, de Keyser propose de mettre en évidence les carences informationnelles en utilisant une grille d'évaluation à appliquer pour chacune des tâches opérateur ; elle comprend les objectifs et sous-objectifs, moyens d'action, supports techniques de l'information, les informations dont les opérateurs ont, théoriquement, besoin pour réaliser correctement leur tâche, ainsi que les informations effectivement disponibles (repris par [KOLSKI 93]). Cette méthode permet de mettre en évidence les carences informationnelles que les opérateurs doivent compenser par d'autres moyens ; de Keyser distingue, dans sa grille d'analyse, les stratégies palliatives mises en œuvre par l'opérateur si ces informations sont critiques pour sa tâche en cours (à titre d'exemple : le recours à la communication verbale). Cette approche utilise notamment l'observation des opérateurs en situation de travail et les échanges informationnels entre opérateurs.

La méthode des graphes de fluence est également employée pour décrire les paramètres sur lesquels l'opérateur agit pour contrebalancer une dérive, ainsi que la chaîne causale des variables influencées par la correction. La méthode permet-elle de recenser l'ensemble des chemins causaux et des moyens d'action ? L'expérience du Prototype Evolutif de Vitrification nous incite à penser qu'il n'existe pas une façon unique de régler un débit, comme c'est le cas pour l'alimentation en fritte de verre, mais une variété (finie) de méthodes, propres à chaque opérateur. Encore une fois, cette méthode doit être employée avec précaution.

³ Les valeurs ont été établies de manière empirique pour chacune des actions élémentaires.

Dimensions	Aides en ligne à la supervision	Connaissances partagées	Méthodes
Opératoire	<u>Aide à l'application des procédures</u>	Réglages effectués par l'opérateur Lacunes de l'interface homme-machine Erreurs commises, fréquence et gravité Ecart entre tâche prescrite et tâche réelle Méthodes de travail	Graphes de fluence [FADIER 90] Méthode de De Keyser de mise en évidence des carences informationnelles Méthodes d'analyse de la fiabilité humaine : THERP, SHERPA, etc. [VILLEM 88] Analyse du système homme-tâche : variations volontairement introduites par les opérateurs lors de la réalisation des tâches [Poyet 90]

Tableau IV.7 : Dimension opératoire / connaissances partagées / méthodes.

IV.3.3. Connaissances privées

L'objectif de ce paragraphe est de recenser les connaissances relevant d'une expertise. C'est le domaine spécifique de la psychologie cognitive, qui exploite les méthodes mises au point en psychanalyse pour effectuer un recueil des savoirs. Elles concernent la dimension cognitive de l'activité humaine.

Ces connaissances sont difficiles à recueillir et à formaliser puisque ce sont, avant tout, des représentations internes aux opérateurs, que l'on peut assimiler à des connaissances compilées, des raccourcis cognitifs qui permettent de raisonner rapidement sur l'état du système physique. Ces raisonnements sont difficilement verbalisables car essentiellement intuitifs, et ils exigent l'intervention de cogniticiens pour extraire et structurer cette connaissance.

Les concepts employés en acquisition des connaissances sont les suivants : objets, relation, situation typique, inférence, stratégie, procédure (habituelle et inhabituelle), coefficient de certitude, hypothèse, heuristique, cas limite, analogie, règle, concepts déterminants, classes, relations entre classes.

Les méthodes de recueil se basent sur le discours, les gestes effectués en situation, les questionnaires, etc. Elles se distinguent par [AUSSE 89] :

- l'origine des données observables : les données sont obtenues de façon spontanée en situation de travail ou bien de façon provoquée quand les informations sont recueillies hors du contexte de travail,
- la caractérisation de la situation : on s'intéresse plus particulièrement aux interactions entre le système ou l'environnement de travail et la tâche à exécuter par le sujet ; il est important de savoir si le recueil de connaissances s'est effectué en situation habituelle (en salle de conduite pendant le travail posté) ou bien en situation transformée (en salle de réunion),
- les modes d'accès aux connaissances : les modes d'accès aux connaissances distinguent deux grandes catégories de méthodes :
 - a. les méthodes directes permettent de recueillir auprès de l'expert ce qu'il sait exprimer, par exemple de manière verbale,
 - b. les méthodes indirectes qui permettent au cogniticien de déceler des indicateurs qu'il sait interpréter.

Les méthodes directes proposent une démarche d'extraction et une manière de structurer les connaissances délivrées par "l'expert". Elles regroupent principalement :

- les entretiens : l'entretien est la méthode de recueil la plus commune. On distingue

classiquement l'entretien non directif et l'entretien directif ; l'entretien non directif est employé en début de recueil et permet de se familiariser avec les concepts employés par l'expert ; l'entretien directif est envisagé pour approfondir des points particuliers. Le but est de produire des verbalisations sur les objets (les concepts du domaine), les relations, les règles, les faits et les heuristiques⁴ manipulés par l'expert.

- **l'analyse de protocoles** : Le cogniticien observe et enregistre les comportements de l'expert en situation de travail, de façon à saisir et étudier tout ce qu'il se dit au cours du traitement d'un problème. Les connaissances recueillies concernent les objets manipulés, les relations entre objets, et les procédures courantes. Cette méthode s'attache donc à recueillir les connaissances du type procédures.
- **le traitement de problèmes sous contrainte** : Il existe de nombreuses variantes de l'analyse de protocoles, par exemple le traitement de problème sous contrainte. Il s'agit ici de mettre l'expert dans des situations où il est contraint par le temps et par l'accessibilité des informations (technique de l'information à la demande, ou encore énoncé avec informations manquantes). Ces méthodes permettent d'accéder aux objets, aux hypothèses, aux heuristiques, aux inférences⁵, aux cas limites et analogies envisagées par l'expert lors de la résolution, ainsi qu'aux procédures inhabituelles. Cette méthode est donc orientée mise en évidence des stratégies de résolution de problème.
- **le dessin de courbes fermées** : Cette méthode permet de verbaliser la représentation spatiale des objets par l'expert. L'expert entoure les objets qui vont ensemble sur une représentation spatiale. Cela revient à effectuer une classification des objets conceptuellement proches sur un schéma.
- **l'analyse du mouvement des yeux** : L'analyse des mouvements des yeux est considérée comme un indicateur des processus cognitifs. Elle permet de mettre en évidence des indices des processus mentaux, grâce à la trace spontanée, directe et mesurable des déplacements de l'attention du sujet en action. Une analyse des mouvements des yeux peut distinguer deux types de processus inférés : les séquences de prise d'information, et les séquences de traitement. Enfin, elle est bien adaptée à la mise en évidence des procédures de raisonnement dans la résolution de problème dans lesquels il y a obligatoirement une composante spatiale. Elle est plus particulièrement utilisée dans le cas où l'expertise contient une forte composante visuelle, ou plus généralement pour extraire les connaissances difficiles à exprimer.

Les méthodes indirectes sont plus orientées vers les modes de raisonnement de l'expert, les liens privilégiés entre concepts, les stratégies de raisonnement, etc. C'est pourquoi il faut les considérer davantage comme des méthodes complémentaires aux méthodes directes. Ce sont notamment :

- **les grille-répertoires** : La méthode des grille-répertoires permet de mettre en évidence les liens entre objets, en demandant à l'expert de sélectionner un ensemble de 10 à 20 objets ou éléments homogènes et représentatifs de l'expertise puis à demander, pour chacun des triplets possibles d'objets, de citer une caractéristique qui en distingue un des deux autres et de citer la caractéristique opposée. Une note allant de 1 à 5 est attribuée à chacun des trois objets. C'est donc une matrice de distances qui est construite. Cette méthode est bien adaptée aux problèmes de classification, par exemple de diagnostic, mais se révèle peu adaptée pour extraire les connaissances causales, procédurales ou stratégiques.
- **les tests de mémorisation** : Les tests de mémorisation ont pour but de mettre en évidence

⁴ Heuristique : une heuristique a pour rôle d'aider à trouver une solution. C'est une façon typiquement humaine de procéder, c'est-à-dire de façon pas toujours formalisée et sans justification parfaite [GENTH 89].

⁵ Inférence : opération qui consiste à passer d'une expression vraie à une autre expression vraie [GENTH 89].

l'organisation des connaissances en mémoire chez l'expert et de tester sa mémorisation d'une liste d'objets typiques du domaine afin d'en déterminer les régularités.

Le tableau IV.8 propose un descriptif des connaissances expertes à acquérir pour chaque niveau d'aide cognitive.

Dimensions	Aides en ligne à la supervision	Connaissances privées	Méthodes
Cognitive	<i>Aide à l'anticipation</i>	Stratégies	Analyse du mouvement des yeux
	<i>Aide à l'adaptation</i>	Procédures inhabituelles Situations typiques Cas limites Procédures courantes Plans Expertise des situations anormales Relations de cause à effet entre variables pertinentes	Traitement de problèmes sous contrainte Analyse de protocoles Questionnaires
	<i>Aide au diagnostic</i>	Hypothèses Coefficients de certitude Relations entre objets (relations causales entre variables, relations de similitude entre objets) Objets (éléments appartenant au domaine d'étude) Concepts déterminants Stratégies de prise d'information Analogies Similitudes entre objets	Analyse du flot inférentiel Classification Test de mémorisation Dessins de courbes fermées Analyse du flot inférentiel Grille-réertoires Echelonnage multidimensionnel Regroupement hiérarchique de Johnson Questionnaires
	<i>Aide à la représentation mentale</i>		

Tableau IV.8 : Connaissances expertes / méthodes d'acquisition.

Le problème d'exhaustivité se pose de manière forte puisqu'aucune méthode ne permet d'assurer la complétude des connaissances recueillies [AUSSEN 89].

Ces méthodes de recueil proposent une large palette de moyens d'extraction des connaissances expertes. Elles présentent quelques invariants d'une méthode à l'autre (elles utilisent toutes en l'occurrence les notions d'objets et de relations), et elles possèdent des zones de recouvrement qu'il est intéressant de considérer si l'on souhaite recueillir un type particulier de connaissances.

La figure IV.2 propose une vision des principaux concepts ainsi que les méthodes qui permettent de les recueillir.

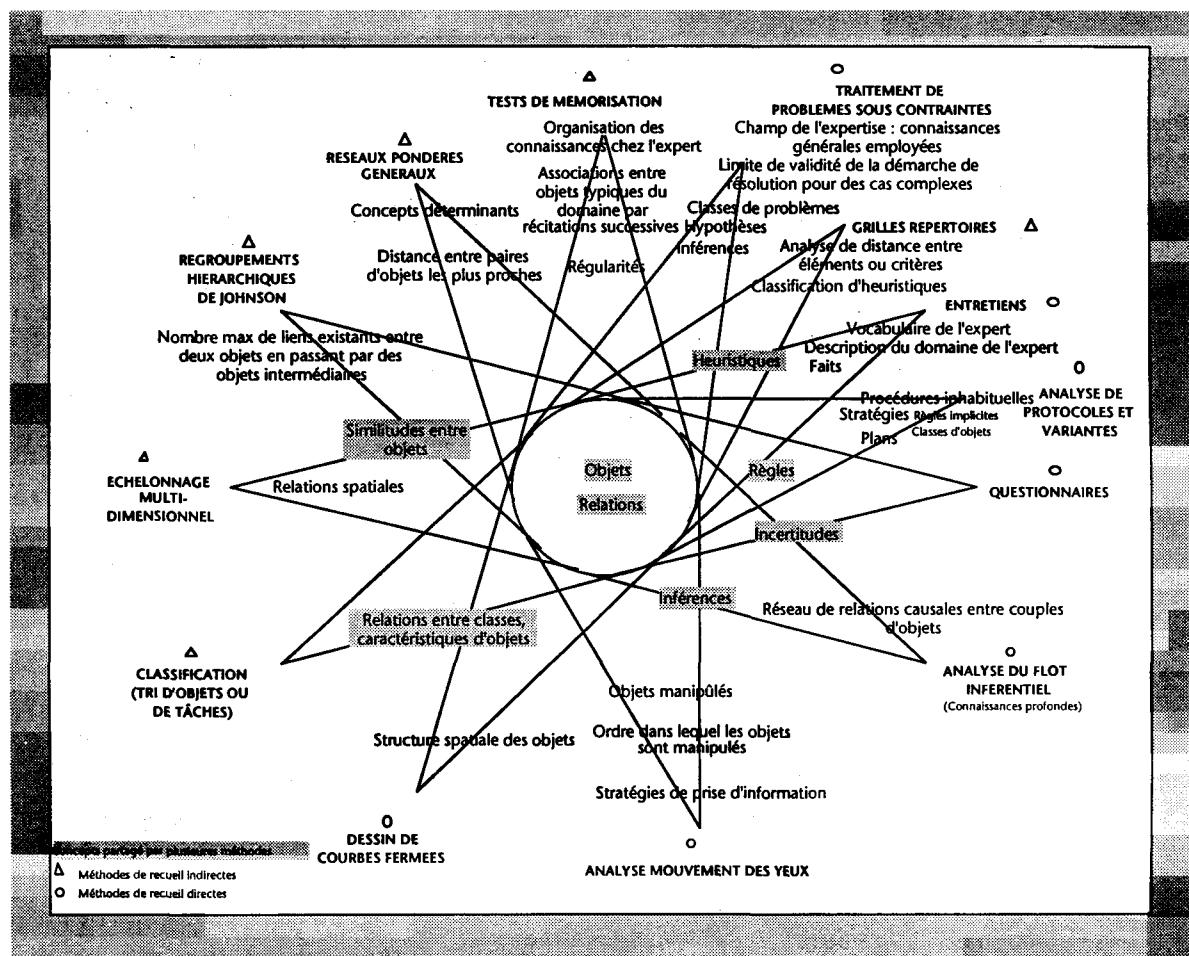


Figure IV.2 : Les méthodes de recueil d'expertise et leurs zones de recouvrement.

IV.4 LA MÉTHODE SAGACE

La méthode SAGACE se positionne dans le courant systémique comme une méthode de description d'un système qui fait largement appel aux concepts de modélisation systémique proposés par Le Moigne [LE MOI 90].

C'est une méthode générale de modélisation des systèmes, pouvant être appliquée à l'étude des systèmes technologiques, en tous les cas à l'ensemble des systèmes finalisés [PENAL 94]. Elle utilise les neuf niveaux de description d'un système tels que proposés par Le Moigne, et met en œuvre un ensemble de concepts et un vocabulaire spécifiques à ce type de modélisation. Elle ne se substitue pas aux méthodes, dites "analytiques", qui ont été présentées dans les paragraphes précédents, elle vise plutôt à fournir un cadre méthodologique de description ainsi qu'un support graphique de représentation, qui permet de répertorier les connaissances mises en évidence avec les méthodes classiques d'analyse.

L'outil logiciel qui supporte la méthode permet de répertorier les connaissances selon trois catégories de modèles : l'éditeur de **systémogrammes** permet de décrire l'organisation du système, l'éditeur de **graphes** permet de répertorier les connaissances de fonctionnement, l'éditeur de **taxinomies** recueille les connaissances qui se rapportent au domaine.

Avant d'aborder la description proprement dite de la méthode, les concepts fondamentaux de la modélisation systémique sont évoqués.

IV.4.1. Les concepts fondamentaux de la modélisation systémique

"L'approche systémique cherche d'abord à définir un langage unitaire de représentation des systèmes aussi bien naturels qu'artificiels (...) elle cherche aussi à définir une démarche rationnelle d'analyse et de conception de systèmes aussi bien physiques que sociaux en se fondant sur l'existence de principes communs de modélisation" [WALL 77].

Elle cherche avant tout à représenter un système sans en dénaturer la complexité. Le Moigne considère que trois hypothèses fondent la modélisation systémique [LE MOI 92] :

- **hypothèse phénoménologique** : "nous ne percevons que des opérations, c'est-à-dire des actes",
- **hypothèse téléologique** : "dès lors que l'observateur convient qu'il n'accède qu'à son expérience de l'action, il doit reconnaître son propre projet d'accès à cette expérience" ; Le Moigne souligne ici le rôle de l'intentionnalité dans la modélisation systémique,
- **hypothèse de la procéduralité de la rationalité** : "la modélisation systémique (...) ne se caractérise pas que par son résultat, un modèle⁶ fini, mais aussi par sa procédure : elle est à la fois action de modéliser et modélisation de l'action".

L'approche systémique se voulant un courant de pensée radicalement différent du courant de pensée classique, il est nécessaire qu'elle se démarque des méthodes de modélisation spécifiques des différents domaines et qu'elle utilise son propre vocabulaire, "ses propres axiomes de modélisation"

⁶Un modèle est pris ici au sens de schéma, c'est-à-dire une description mentale (intériorisée) ou figurée (diagrammes, équations) qui, pour un champ de questions, est prise comme représentation abstraite d'une classe de phénomènes, plus ou moins habilement dégagé de leur contexte par un observateur pour servir de support à l'investigation et/ou la communication [AFCET 78].

[LE MOI 92].

IV.4.2. Les systémogrammes

L'organisation du système est appréhendée au travers de ses trois propriétés essentielles : la **fonction** (les transformations mises en jeu pour atteindre les performances), le **fonctionnement** (les activités mises en œuvre pour assurer la stabilité du système) et l'**évolution** (adaptation structurelle pour maintenir la cohésion du système en réponse à une situation dysfonctionnelle).

La **vision fonctionnelle** permet de représenter le comportement attendu du système au travers des transformations de matière, des séquences de fonctionnement et de déroulement de la campagne. La **vision organique** s'intéresse aux ressources opérationnelles mises en œuvre telles que les machines, les appareils de contrôle commande et les moyens auxiliaires permettant des changements de configuration (les circuits de secours, par exemple). La **vision opérationnelle** met en évidence les processus décisionnels lors de la conduite en situation normale (le pilotage), la conduite en fonctionnement perturbé (l'adaptation), et la conduite selon des stratégies déterminées qui permet d'adapter le comportement global du système face à des situations redoutées (l'anticipation).

IV.4.2.1 La matrice de projection

Cette approche décrit donc une **matrice de neuf points de vue** issue du croisement entre propriétés et visions d'un système (figure IV.3) :

- **Vision fonctionnelle**

- * **mission** : ce point de vue prend en compte les services assurés par le système en vue d'assurer les performances, et les choix technologiques effectués. Il peut s'agir d'une description du procédé de transformation (ce point de vue relève de l'analyse fonctionnelle tel qu'employé dans des méthodes comme FAST),
- * **programme** : ce point de vue décrit ce que fait le processus de fabrication dans le temps ; cela se traduit par un séquencement d'activités (par exemple opérations de mise en régime, opérations effectuées en régime permanent, opérations de mise à l'arrêt),
- * **scénario** : ce point de vue décrit ce que fait le processus de fabrication "sur une large échelle de temps", et se concrétise par un enchaînement de modes de comportement (un mode de comportement est défini comme une période du cycle de vie correspondant à un état considéré stable, le processus ne peut donc être que dans un mode à la fois). Un scénario est défini en fonction du contexte d'exploitation (par exemple contexte nominal, dégradé et d'urgence),

- **Vision organique**

- * **réseau opérant** : ce point de vue décrit les appareils mis en œuvre pour réaliser la mission (on décrit ici plus particulièrement l'organisation des appareils qui sont le siège des transformations),
- * **organisation logistique** : ce point de vue décrit l'architecture en charge de la stabilité du processus (automates et système de contrôle-commande),
- * **coordination** : ce point de vue décrit la capacité d'action du système sur lui-même afin de maintenir son intégrité structurelle ; cela se traduit par un enchaînement des configurations matérielles en fonction du contexte d'exploitation (par exemple contexte nominal, dégradé, d'urgence),

- **Vision opérationnelle**

- * **pilotage** : ce point de vue décrit les décisions à prendre pour ajuster les performances du système (ce sont les opérations de réglage des paramètres de fonctionnement),

- * **adaptation** : ce point de vue décrit les décisions visant à adapter le fonctionnement de l'installation en fonction de perturbations (ce sont les activités induites par le changement de consignes de production, par exemple),
- * **anticipation** : ce point de vue décrit les changements de contextes stratégiques ; ce sont les tâches de supervision dévolues aux opérateurs.

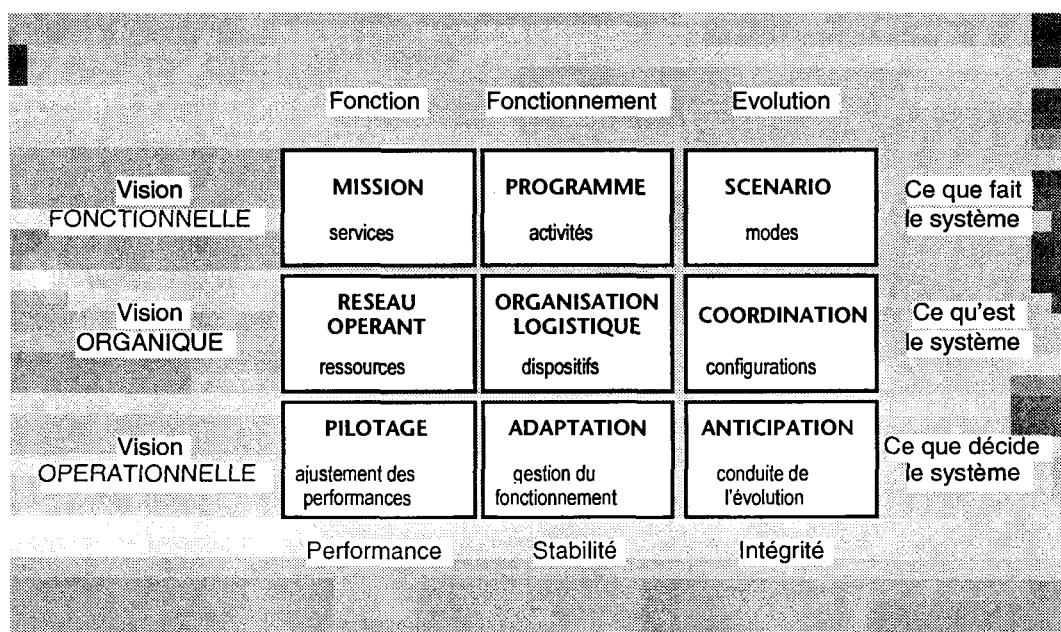


Figure IV.3 : La matrice SAGACE et les neuf points de vue de description.

IV.4.2.2 Le vocabulaire de la méthode

Cette méthode permet de projeter, sur chacun des neuf points de vue du systémographe (c'est-à-dire l'éditeur de systémogrammes de l'outil SAGACE, implanté sur station SUN), un modèle du système à l'aide des outils du vocabulaire de modélisation, à savoir les **processeurs** (représentés par des boîtes), les **flux** (représentés par des flèches et symbolisant le transfert de matière, d'énergie ou d'information) et les **observateurs** (représentés par des ellipses et symbolisant les moyens de rendre compte de la mission du processeur). Les **processeurs** sont le siège de la transformation, et sont caractérisés par une **mission** (le rôle dans la transformation) et un **processus** (les opérations unitaires réalisées).

Les **observateurs** permettent de rendre compte de l'état de fonctionnement d'un appareil : pour un opérateur de conduite, la transformation est déterminée s'il peut prédire les caractéristiques d'un élément à la sortie, connaissant ses caractéristiques à l'entrée. Un observateur traduit donc la capacité d'appréhender une caractéristique de flux, à l'aide d'un dispositif physique (capteur), informatique (calcul) ou au moyen d'un processus mental (estimation visuelle ou auditive).

Le formalisme adopté permet de décrire le système sous forme d'un réseau de processeurs de flux (flux horizontaux de matière, d'énergie ou d'information) et de contraintes, de consignes et de commandes provenant de l'environnement (flux verticaux entrants dans un processeur). En retour, ils fournissent les informations nécessaires à leur pilotage (flux verticaux sortants de commande et d'informations de représentation).

La figure IV.4 présente le schéma de base de description pour l'ensemble des neuf points de vue de la matrice ; ils utilisent tous le même langage basé sur les processeurs, les flux et les observateurs. Les

outils de représentation graphique des processeurs et des flux s'inspirent des outils de représentation de la méthode SADT [MARCA 87]. L'apport de SAGACE est une sémantique plus riche, par exemple les observateurs et les flux typés (Matière, Energie, Information), qui permettent son utilisation en génie des procédés.

En effet, les flux de **transaction** sont caractérisés par un couple (Objet, [Support]) où l'objet désigne l'élément qui subit le traitement et où le support indique la matrice ou le conditionnement qui permet de véhiculer l'objet. Ainsi un flux d'uranium en solution acide sera décrit symboliquement sous la forme : M (U, H⁺) ; un chauffage à la vapeur sera considéré comme un flux d'énergie véhiculé par de la vapeur : E (Chaleur, Vapeur) ; M(sucre, Eau) indique un flux de sucre en solution aqueuse ; M(Verre, Fritte) indique un flux de verre véhiculé sous forme de fritte.

Les **conditions d'activation** sont représentées par des flux d'informations particuliers, notés IC, et sous-typées selon le point d'application de la condition. Une condition portant sur la **Réalisation** ou le **Réglage** du processus sera notée ICR. Une condition portant sur le **Pilotage** de la mission sera notée ICP. Une condition portant sur la **Structure** ou la **Sélection de moyens opérationnels** sera notée ICS.

Les **indications** rendant compte du comportement du processeur sont représentées également par des flux d'informations particuliers, notés IR, et sous-typées selon le renseignement fourni : IRC pour les **informations de configuration du système**, IRF en ce qui concerne le fonctionnement (bon déroulement du processus), et IRP pour rendre compte des performances (réussite de la mission).

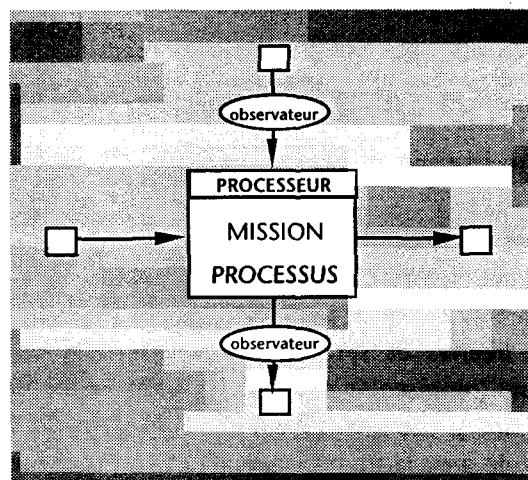


Figure IV.4 : Schéma de base de description selon la méthode SAGACE.

IV.4.2.3 Relations entre points de vue : la notion de phase

La complexité ne réside pas seulement dans les différents points de vue avec lesquels il est possible d'aborder un système, mais aussi et surtout dans les relations que ces points de vue échangent entre eux ; ce sont d'ailleurs ces dépendances qui structurent l'ensemble.

La notion de phase de fonctionnement est liée à la notion de scénario pour la vision fonctionnelle, de situation en vision organique et de stratégie en vision opérationnelle, elle est assimilable à des règles de comportement globales.

En fait, le domaine de fonctionnement d'un système est défini comme une combinaison de scénarii, de situations et de stratégies, puisque un changement de scénario (passage d'un scénario de routine à un scénario de crise) nécessite un changement de situation (passage à une configuration de secours) et détermine une stratégie de conduite adaptée (passage à un contexte de crise). Cette

combinaison de règles constitue ce qui, dans la méthode SAGACE, est appelé la norme du système, qui décrit l'ensemble des comportements pertinents d'un système.

Deux types de relations sont possibles : les relations qui unissent les trois visions d'une même propriété, par exemple les visions fonctionnelle, organique et opérationnelle de la propriété "Fonction", et les relations qui unissent trois points de vue d'une même vision, par exemple les réseau opérant, réseau logistique et réseau auxiliaire de la vision organique.

IV.4.2.3.1 Points de vue d'une même propriété

Les trois visions d'une même propriété définissent des relations de mise en œuvre (figure IV.5). En effet, la description du niveau fonctionnel et des contraintes de conception induit des choix techniques à effectuer pour satisfaire ces contraintes. Ces choix se traduisent au niveau organique par des appareils particuliers ; les objectifs de production définissent la latitude d'action des opérateurs de conduite, ainsi que les consignes d'exploitation qu'ils doivent appliquer (elles apparaissent à cet effet sous forme de commandes dans la représentation).

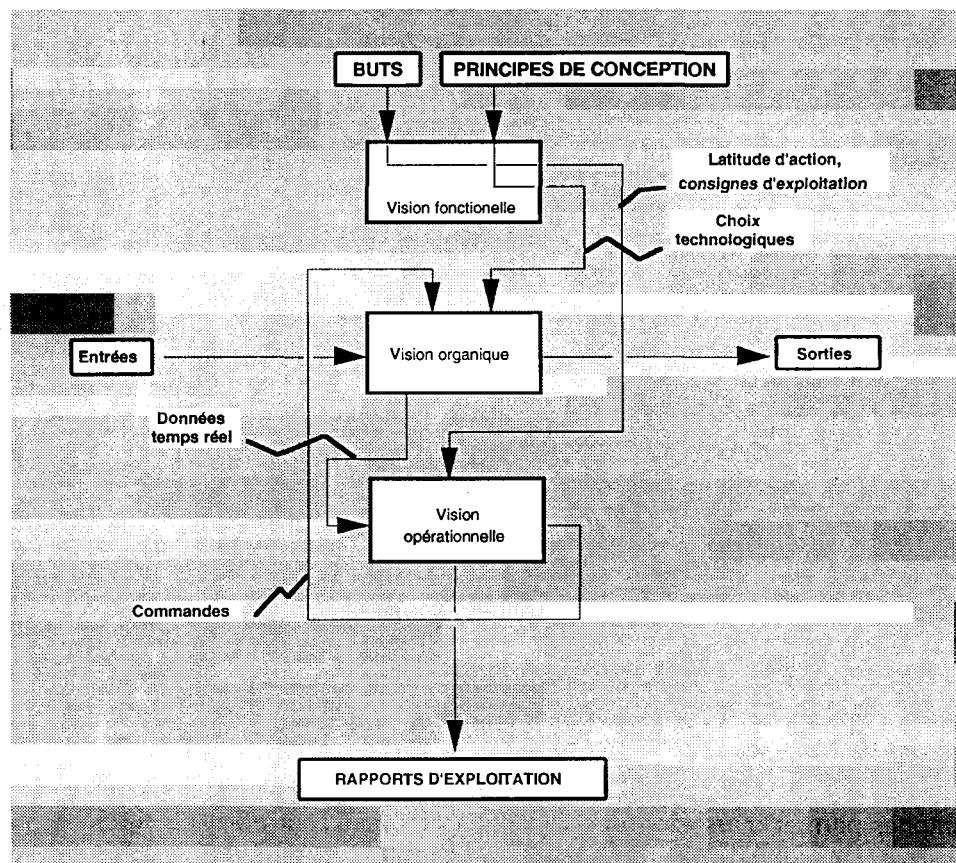


Figure IV.5 : Relations entre points de vue d'une propriété.

Les relations entre points de vue d'une même vision exploitent la notion de **phase du système**, qui est définie par toute période dans le cycle de vie du système pendant laquelle celui-ci maintient constant un processus identifié.

IV.4.2.3.2 Points de vue d'une même vision

Cette notion de phase est utilisée pour donner un éclairage particulier aux points de vue d'une même vision. Cet éclairage peut correspondre à la notion de scénario de fonctionnement, de situation

structurelle ou bien de stratégie :

- un **scénario** est une logique de fonctionnement se traduisant par un agencement de modes de comportement pertinents vis-à-vis de la mission,
- une **situation** est définie comme une logique de changement de configuration,
- une **stratégie** est considérée comme une logique de décision exprimée par un agencement de contextes décisionnels, sachant qu'un contexte est un ensemble de tâches qui visent à conserver certaines caractéristiques du système, i.e. son intégrité.

En vision fonctionnelle, la notion de phase est utilisée pour spécifier quelles sont les fonctions, les activités et les modes de fonctionnement qui sont valides pour un scénario donné ; en vision organique, elle permet de préciser quels sont les appareils, les organes logistiques et les organes de secours activables pour une situation donnée ; de même, il est possible de filtrer les trois points de vue de la vision opérationnelle en indiquant quelles tâches sont activables pour une stratégie donnée (figure IV.6).

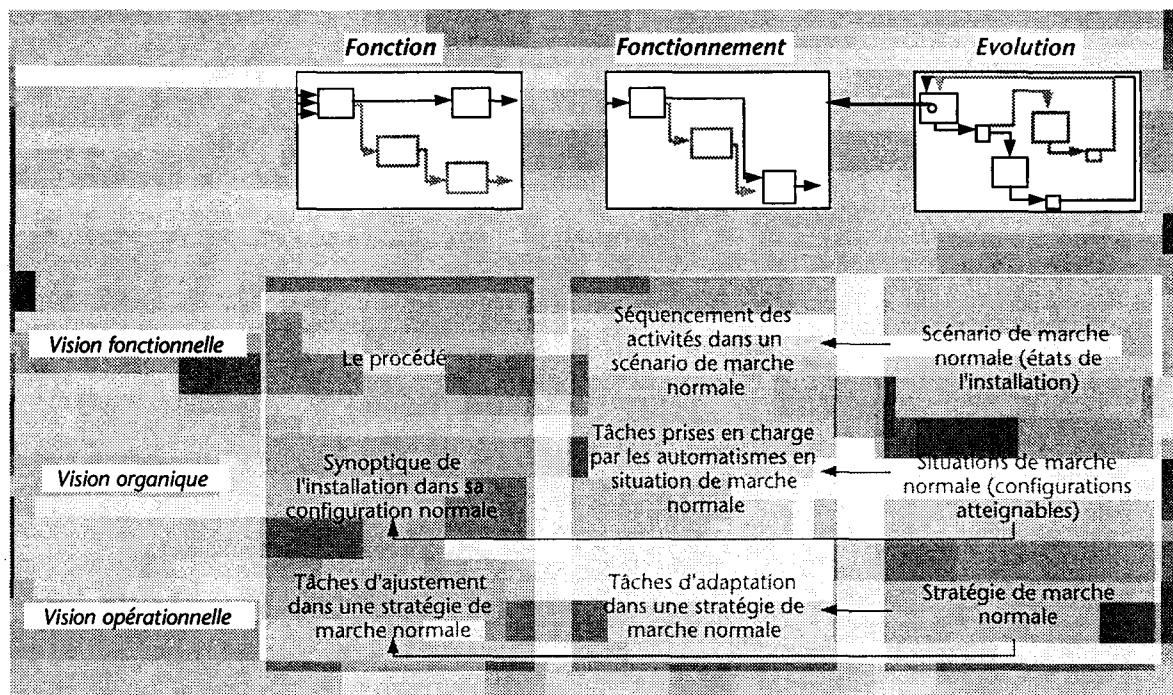


Figure IV.6 : Relations entre points de vue de même vision.

IV.4.3. Les Graphes

L'éditeur de graphes permet d'associer un quelconque graphe à tout objet du systémogramme. Il permet de mettre en relation des caractéristiques d'objets, initialement définies dans le systémogramme ou bien dans l'éditeur de taxinomies. Il peut mettre en relation un processeur et des flux d'entrée et de sortie, comme il peut mettre en relation des caractéristiques d'un objet les unes avec les autres. Ces caractéristiques d'objets peuvent prendre la forme de défauts et de défaillances. L'exemple de la figure IV.7 montre un graphe issu d'une analyse de modes de défaillances d'un appareil du procédé. Les causes possibles sont liées à des défauts de flux d'entrée et dont les effets se propagent sur les flux 3 et 4.

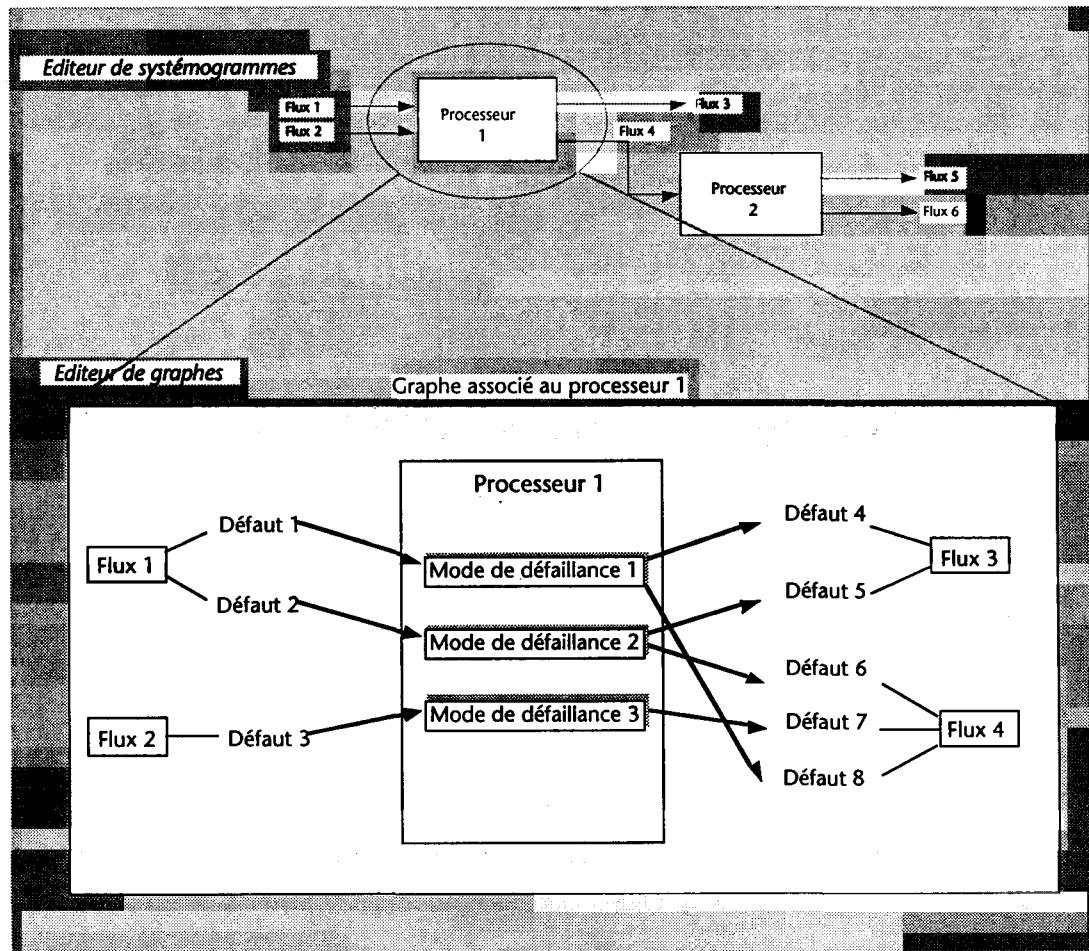


Figure IV.7 : Structure d'un graphe, exemple d'un graphe défaut-défaillance.

Ces graphes font référence aux objets du systémogramme à partir desquels ils sont conçus ; ils sont donc spécifiques à un processeur donné.

Tout type de graphe peut être envisagé, en effet, l'éditeur de graphes SAGACE est conçu de sorte à laisser à l'utilisateur le soin de définir le type de relation à établir - relation causale ou bien sémantique. Pour ce qui concerne les relations causales, qui sont particulièrement intéressantes en supervision de processus, il est possible de décrire des graphes reliant des défauts et leur(s) cause(s) potentielle (s) et donc d'exprimer des liens qui associent des dysfonctionnements d'appareils à des défauts de flux, ou bien des relations d'influence causale entre variables.

IV.4.4. Les taxinomies

Une taxinomie est une classification hiérarchisée basée sur le regroupement d'attributs caractéristiques des objets à classer. Le but de cette classification est d'intégrer les connaissances des spécialistes du domaine.

Elle décrit des liens du type "est-un" ou "est-un-type-de" et s'applique indistinctement aux processeurs, aux flux ou bien aux observateurs. Par exemple, dans le domaine du génie chimique, une taxinomie permet de distinguer différents types de réacteurs : réacteur agité, réacteur tubulaire, cuve agitée, colonne, etc., et selon le nombre et les caractéristiques des flux qui les traversent.

Les taxinomies offrent la possibilité de formaliser des connaissances générales du domaine de

modélisation et s'adressent davantage au spécialiste qui peut classer de manière hiérarchisée les objets qu'il manipule. Elles sont utilisées pour faire hériter à un processeur, dans l'éditeur de systémogrammes, les caractéristiques d'un processeur générique défini dans la taxinomie.

La figure IV.8 propose un exemple de hiérarchie d'extracteurs employés dans l'industrie chimique.

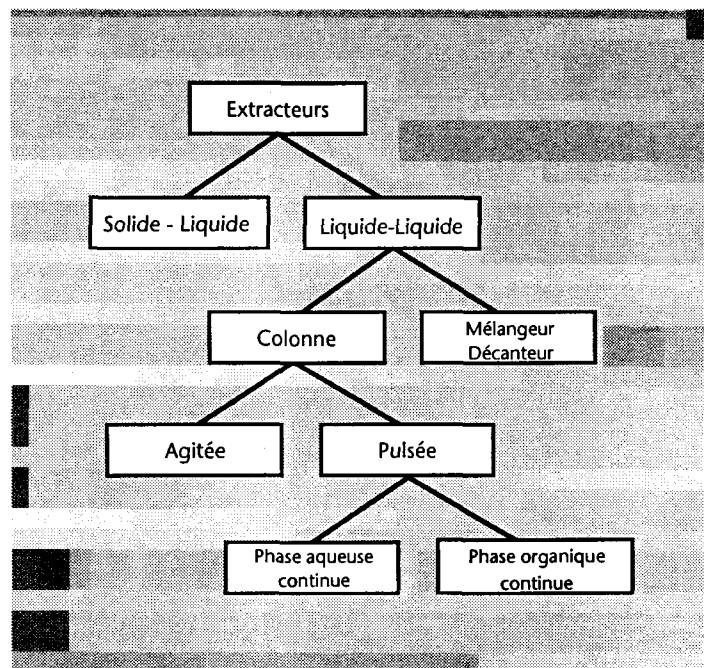


Figure IV.8 : Taxinomie d'appareils d'extraction.

Nous avons exploré la possibilité d'utiliser SAGACE pour modéliser une installation industrielle particulière, le Prototype Evolutif de Vitrification.

IV.5 DESCRIPTION D'UNE UNITÉ DE PRODUCTION INDUSTRIELLE

Nous considérons ici la manière dont SAGACE a été utilisée pour décrire un processus industriel : le Prototype Evolutif de Vitrification (PEV).

Le champ que cette méthode se propose de couvrir est très vaste, mais elle privilégie la pertinence plutôt que l'exhaustivité des informations répertoriées. C'est pourquoi la formalisation est essentiellement graphique, et met l'accent sur la mise en relation d'objets conceptuels.

Nous proposons ici de considérer quelques exemples de systémogrammes.

IV.5.1. L'installation à modéliser

Le prototype de vitrification de déchets haute activité PEV est un procédé en deux étapes qui comprend la calcination de la solution de produits de fission simulés (Pf) et l'incorporation de ces produits de fission dans une matrice de verre en fusion. Ces deux opérations sont réalisées à l'aide d'un calcinateur rotatif alimenté en continu par la solution à traiter et qui effectue l'évaporation, le séchage et la calcination partielle du résidu sec, ainsi que d'un four de fusion qui fond le mélange calciné et verre primaire pour produire le verre de formule choisie ; celui-ci est coulé à intervalles réguliers dans un conteneur métallique, qui lui-même sera stocké dans les meilleures conditions de sûreté pour des déchets réels de haute activité. Un appareillage de traitement des gaz issus de la calcination et de la vitrification est associé à cet équipement (figure IV.9).

L'annexe II rassemble les connaissances que nous avons recueillies principalement par entretiens et analyse documentaire. Les neuf points de vue permettent de classer les connaissances recueillies.

La représentation SAGACE de ce processus fait apparaître les points suivants : le modèle fonctionnel met en évidence les contraintes et les choix technologiques qui ont guidé la conception ; le modèle organique traduit le schéma de flux ; le modèle décisionnel permet de représenter les tâches de l'opérateur d'exploitation.

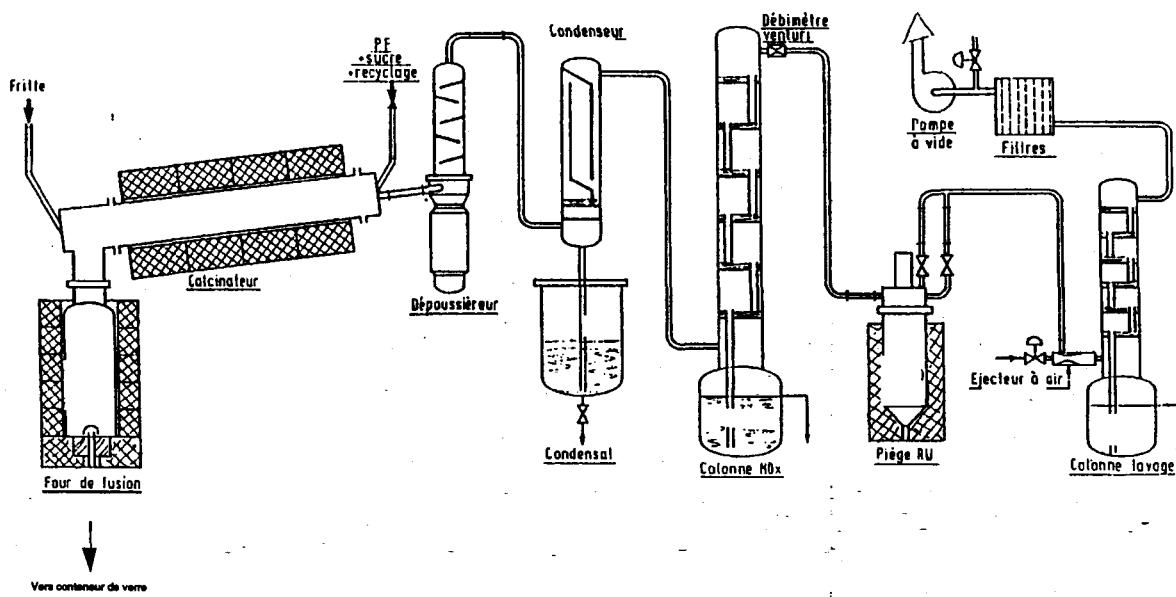


Figure IV.9 : Schéma du prototype évolutif de vitrification.

IV.5.2. Systémographie

L'étape initiale de la modélisation nous permet de préciser le cadre dans lequel intervient l'installation PEV (figure IV.10) : il s'agit d'expliquer les raisons qui ont conduit les exploitants à envisager une telle installation. Le PEV intervient dans le cadre d'actions de recherche et développement avec pour objectif d'aider à la détermination d'une formule de verre adaptée à une solution de produits de fission donnée. Cette activité est mise en œuvre au moyens d'essais technologiques, qui fournissent une base de données d'exploitation qu'il faudra ensuite interpréter, ainsi que des échantillons de verre pour analyse chimique. Les résultats attendus sont par exemple la validation des choix de procédé.

Le prototype de vitrification peut être représenté dans chacun des neuf points de vue du systémographe. Nous proposons des exemples de description relatives aux visions fonctionnelle, organique et opérationnelle.

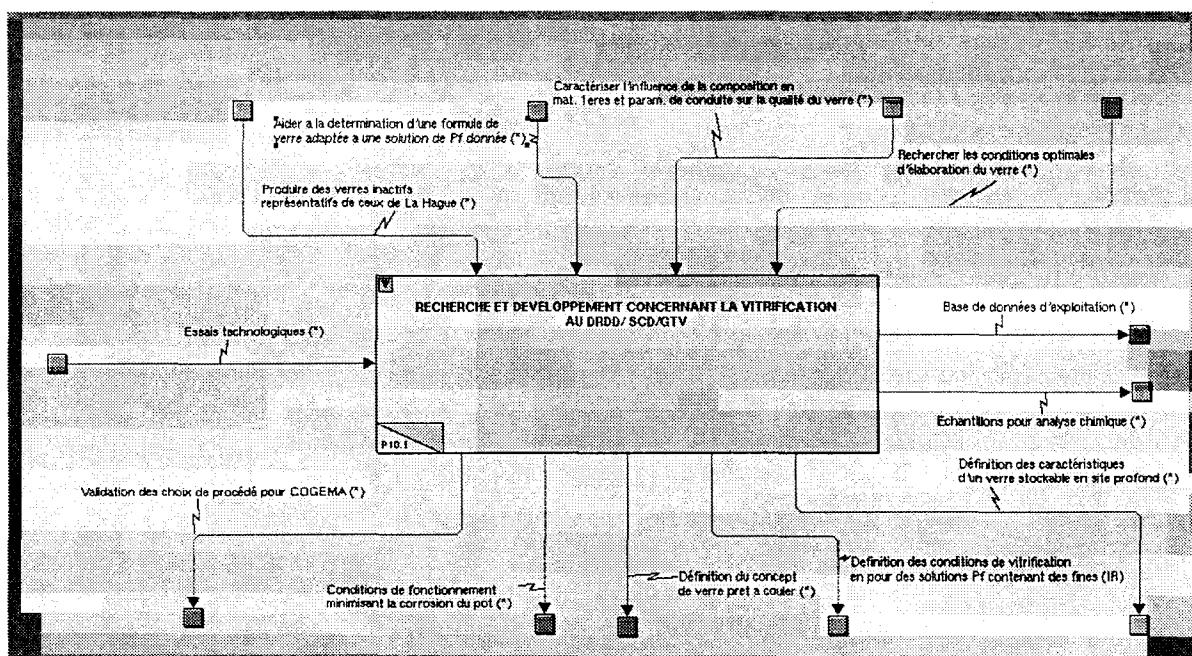


Figure IV.10 : Les objectifs associés au PEV.

IV.5.2.1 Vision fonctionnelle

Le point de vue "Mission" permet de décrire les services définis par les exploitants et que doit fournir le processus. Dans le cadre de la gestion des déchets nucléaires à vie longue, quatre services principaux sont attendus : enfermer les sources de radiation dans une matrice solide, conditionner le produit, épurer et évacuer les sous-produits (gaz et solutions aqueuses). L'accent est principalement mis sur le confinement du processus pour des raisons de sécurité (voir figure IV.11).

Cette description présente de manière purement fonctionnelle les activités qui doivent être réalisées, en se gardant de décrire la manière dont ces activités sont mises en œuvre, puisqu'elles figurent spécifiquement dans le point de vue organique.

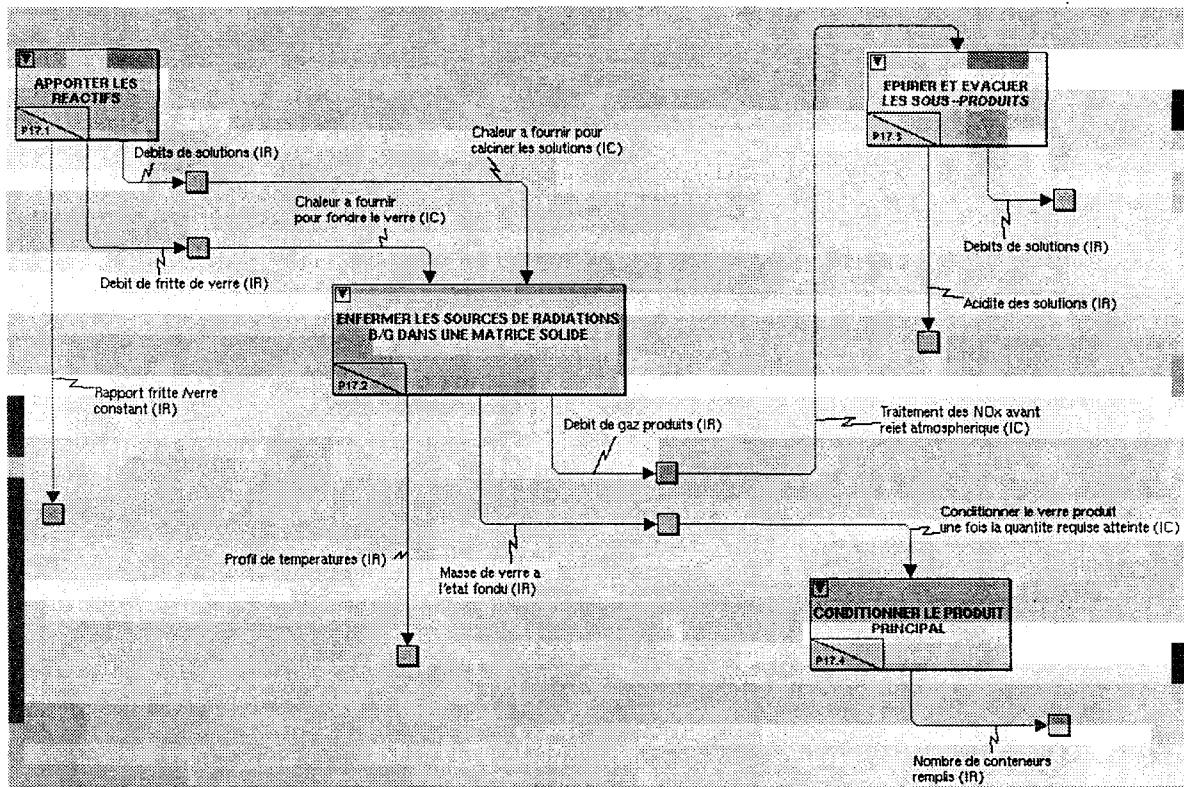


Figure IV.11 : Les fonctions à envisager pour conditionner les déchets haute activité.

IV.5.2.2 Vision organique

Le "Réseau opérant" décrit les appareils procédé mis en œuvre pour assurer les services spécifiés dans le point de vue "Mission".

L'exemple de la figure IV.12 montre le processus d'alimentation en fritte de verre. Il décrit le cheminement de la fritte de verre depuis la trémie n°2 jusqu'au sas d'introduction. La trémie n°1 et le tapis de chargement ne servent que de manière ponctuelle pour alimenter la trémie n°2, chaque fois que sa masse atteint un seuil minimal fixé (boucle d'action décrite par l'intermédiaire de l'observateur "masse" sur la trémie 2, et de la commande de marche du tapis de chargement). Le vibreur, placé en aval de la trémie n°2, sert à doser la quantité de fritte versée ; il est commandé par un automate en temps d'activation. La fritte versée parvient à un godet puis au sas d'introduction, qui est constitué d'une série de vannes et soupapes, devant assurer le confinement du processus.

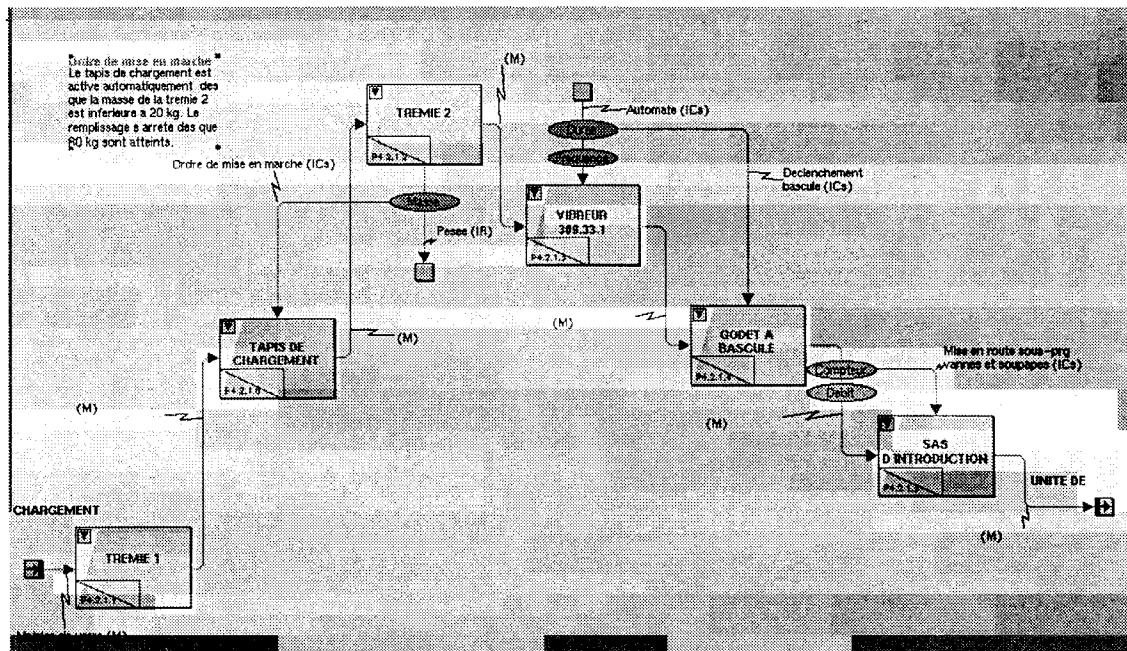


Figure IV.12 : Alimentation en frite de verre.

IV.5.2.3 Vision opérationnelle

L'“Anticipation” décrit les stratégies mises en œuvre pour exploiter l’installation. Une stratégie se décompose en contextes ainsi que des décisions de passage d'un contexte à l'autre. L'exemple de la figure IV.13 montre l'exemple d'une stratégie de déroulement normal de la campagne d'essais qui prend en compte les contextes de démarrage, de production (régime établi) et enfin d'arrêt. Les transitions entre contextes sont symbolisées par les flux : condition de sortie du contexte de démarrage (les conditions nominales sont atteintes), contrepartie attendue (démarrer l'essai). La “boîte” placée entre condition et contrepartie symbolise les processus décisionnels impliqués.

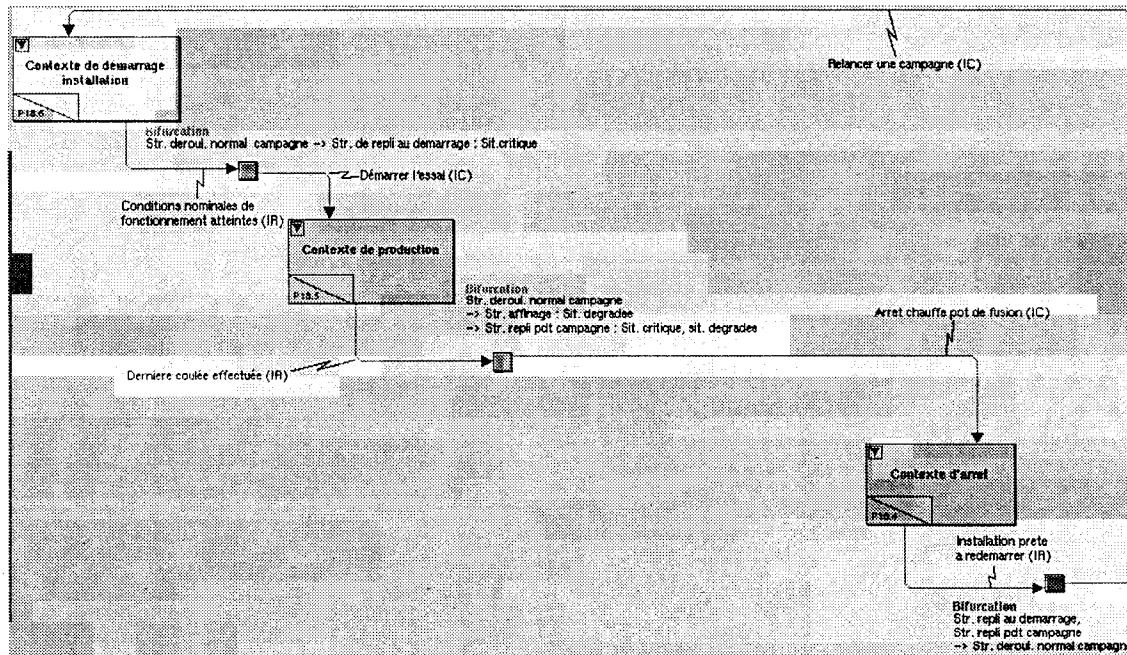


Figure IV.13 : Stratégie de fonctionnement normal.

IV.5.3. Réalisation de graphes

Pour chacun des processeurs du point de vue "réseau opérant" est associé un graphe décrivant les modes de défaillance du processeur ainsi que les défauts pouvant en être la cause, ainsi que les défauts pouvant en résulter. La causalité des défauts et défaillance est décrite, dans SAGACE, de manière locale à chaque processeur.

Ces graphes sont issus de l'interprétation d'une analyse des modes de défaillance réalisée de manière classique, c'est-à-dire à partir des tableaux d'AMDE [VILLEM 88]. Ils permettent de fournir une description plus lisible des tableaux d'AMDE, car centrée sur la description graphique des liens de causalité, qui peut se révéler une alternative intéressante pour rendre plus lisible un tableau AMDE. Il faut donc considérer AMDE et graphe comme deux descriptions complémentaires. Le graphe peut également intégrer les résultats d'une analyse du type MCPR (méthode des combinaisons des pannes résumées), qui distinguent des modes de défaillances externes des modes de défaillances internes : un mode de défaillance externe résulte de la propagation d'une défaillance sur un appareil en amont ; un mode de défaillance interne résulte d'un dysfonctionnement propre à l'appareil lui-même (rupture mécanique, fuite, etc.).

La figure IV.14 propose un exemple de diagramme défaut-défaillance issu de la modélisation du PEV (le calcinateur). Sont distingués les modes de défaillance ayant pour cause les défauts apparaissant sur les flux d'entrée (appelés modes de défaillance externes), et les modes de défaillance ayant pour cause un dysfonctionnement de l'appareil lui-même (modes de défaillance internes).

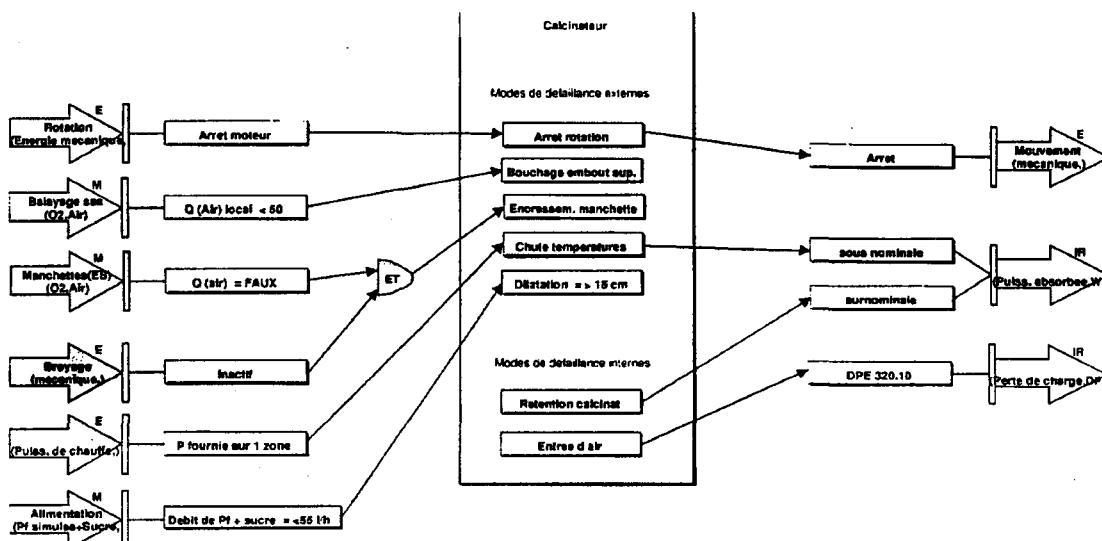


Figure IV.14 : Graphe défaut-défaillance de l'éditeur SAGACE.

Par exemple, une entrée d'air au niveau du calcinateur entraîne une perturbation de la perte de charge au niveau de la colonne de dépoussiérage. Un mode de défaillance externe est par exemple le moteur de rotation qui n'entraîne plus le tube de calcination, ce qui entraîne l'arrêt des galets.

IV.6 SAGACE COMME MÉTHODE DE RECUEIL

L'objet de ce paragraphe est de replacer SAGACE et ses apports en tant que méthode de modélisation des systèmes par rapport aux connaissances pouvant être employées dans le cadre d'un projet d'aide à l'opérateur, ce qui constituera une base de comparaison avec les méthodes couramment employées. Il faut garder en mémoire que cette méthode ne se substitue pas aux méthodes classiques d'analyse, mais qu'elle doit plutôt être vue comme une méthode de description globale, et fédératrice au sens où elle permet de rassembler des connaissances qui étaient abordées jusqu'ici par de nombreuses méthodes. Elle sert donc à cadrer l'investigation à mener sur le système. C'est un des enseignements que nous avons tiré de la modélisation du PEV.

Dans le paragraphe IV.2, nous avions proposé un découpage des connaissances en connaissances publiques, connaissances partagées et connaissances privées. C'est ce découpage que nous utilisons pour décrire la manière dont la méthode SAGACE peut être utilisée pour formaliser les connaissances considérées utiles à la conception d'une aide à l'opérateur.

IV.6.1. Connaissances publiques

Les connaissances publiques sont prises en compte au niveau du systémographe (la matrice des neuf points de vue). Elles sont donc formalisées sous forme de réseaux de processeurs et de flux sur l'ensemble des neuf points de vue.

Les connaissances du niveau opératoire concernent les tâches à réaliser et les diverses interventions programmées que les opérateurs devront effectuer sur l'installation, et relatives aux modes de fonctionnement de l'installation. Ces connaissances peuvent être décrites dans les points de vue "Pilotage" pour les tâches humaines, ainsi que l'"organisation logistique" pour les tâches automatisées. Le point de vue "programme" peut permettre d'indiquer à quel moment ces tâches sont sollicitées.

Dans le premier niveau cognitif, qui correspond à l'aide à la représentation mentale et au diagnostic, il est nécessaire de décrire les aspects fonctionnels et structurels de l'installation à travers l'organisation fonctionnelle dans le point de vue "Mission" (les services, les contraintes techniques, les contraintes de performances, etc.), et l'organisation matérielle dans le point de vue "Réseau opérant" (les appareils importants, les mesures les plus significatives du fonctionnement du processus de fabrication, les caractéristiques de l'instrumentation). Par ailleurs, un système de diagnostic fonctionne généralement dans un domaine bien défini ; décrire dans quel contexte celui-ci va intervenir demande de recenser les modes de comportement, les "scénario", ainsi que les configurations de marche, c'est-à-dire le point de vue "coordination".

Nous avons décrit les connaissances du second niveau cognitif dans le point de vue "coordination", qui traite des configurations de marche de l'installation ; les mesures qu'il convient de prendre sont fonction des domaines de fonctionnement et figurent dans le point de vue "Adaptation" ; le point de vue "Scénario" décrit les enchaînements de modes de fonctionnement dans un domaine de fonctionnement donné. Puisque l'aide à l'adaptation utilise le précédent niveau cognitif, il exploite également les connaissances de ce niveau (points de vue "mission" et réseau opérant").

Les stratégies d'exploitation figurent dans le point de vue "Anticipation". Elles sont décrites comme des enchaînements de contextes d'exploitation, fonctions d'événements attendus ou incidentels.

La description de la répartition des rôles entre opérateurs n'appartient pas spécifiquement à un point

de vue de la matrice SAGACE. Elle relève plus de connaissances de fonctionnement.

IV.6.2. Connaissances partagées

Les connaissances de fonctionnement concernent les connaissances acquises par les exploitants au cours de la production. Elles sont spécifiquement représentées sous forme de graphes dans une démarche SAGACE.

Les connaissances liées à l'exécution de procédures de conduite correspondent aux méthodes de travail employées par les opérateurs, aux erreurs qu'ils peuvent commettre. SAGACE peut intervenir pour représenter les informations mises en évidence par des méthodes particulières (analyse fiabiliste, ou analyse mixte ergonomie/fiabilité, ou encore analyse psychologique de l'activité de l'opérateur), mais n'intervient pas comme méthode d'acquisition.

Dans le premier niveau cognitif, les connaissances acquises pendant le fonctionnement de l'installation concernent les comportements non prévus en conception. Ce type de connaissance peut être représenté dans les graphes du réseau opérant, du type : graphe de défaut-défaillance, graphe défaut-défaut, etc. Ces graphes sont issus d'une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), SAGACE répertoriant ces connaissances sous forme graphique.

Pour le second niveau, les connaissances acquises peuvent être les délais approximatifs entre le moment où un événement est détecté et le moment où cet événement provoque la dégradation des performances et/ou remet en cause la sécurité. Diverses mesures peuvent avoir été prises pour résoudre ces problèmes. Elles figurent dans ce cas au niveau du point de vue "anticipation" (dans la modélisation du PEV, nous n'avons pas abordé cet aspect).

Dans l'hypothèse où un système ne peut coopérer que s'il est en mesure de fournir des "chemins" privilégiés à l'opérateur (solution qui nous semble la plus raisonnable à l'heure actuelle, cf. chapitre II), il faudrait alors tenir compte, dans la description de ces connaissances, des chemins privilégiés par les experts ou bien par les concepteurs du processus de fabrication en donnant, par exemple, des poids à chacune des options pouvant être envisagées par les opérateurs en fonction du contexte.

Les connaissances qui peuvent être collectées à ce niveau correspondent à l'organisation du travail collectif : répartition des rôles et coordination entre opérateurs. Elles peuvent être mises sous forme de diagrammes décrivant l'intervention des acteurs dans chacune des activités valides pour un mode de fonctionnement donné. Ces connaissances sont donc liées aux systémogrammes des trois points de vue de la vision opérationnelle.

IV.6.3. Connaissances privées

Les connaissances expertes concernent plus particulièrement les savoir-faire acquis par les opérateurs ou les experts du procédé. Si la méthode SAGACE peut constituer un cadre dans lequel il semble, a priori, possible de répertorier les connaissances expertes (sous forme de graphes, par exemple), elle ne propose pas de démarche particulière permettant d'investiguer ce champ de connaissances. Elle est, en effet, destinée à modéliser les caractéristiques "de surface" des opérateurs, alors que le recueil de l'expertise s'attache spécifiquement aux mécanismes de raisonnement, qui relèvent du domaine de la psychologie cognitive.

Il semble que si le recueil de l'expertise s'impose, la méthode SAGACE peut utilement intervenir en tant que méthode de cadrage de l'environnement de l'expert, avant de démarrer l'acquisition proprement dite.

IV.6.4. Conclusion

Les potentialités de la méthode SAGACE ne sont pas encore totalement mises à jour, tant au niveau des systémogrammes pour lesquels tous les points de vue ne sont pas encore figés, qu'au niveau des graphes, pour lesquels seuls les graphes correspondant aux aides au diagnostic sont bien maîtrisés.

Cependant, le contenu des diverses représentations est bien perçu (se reporter en annexe II, qui détaille chacun des points de vue en utilisant les données concernant le PEV), c'est pourquoi il semble d'ores et déjà possible de répartir les représentations en fonction des connaissances mises en œuvre pour réaliser les différentes aides à la supervision. Le tableau IV.9 décrit donc la manière dont peuvent être répartis les points de vue du systémographe ainsi que les graphes dans la typologie des aides en ligne.

Dimensions	Aides en ligne à la supervision	Connaissances publiques	Connaissances partagées	Connaissances privées
Collective	<u>Aide au travail collectif</u>	•	Graphes vision opérationnelle (logigrammes) : répartition des activités entre acteurs et flux de communication. Valable pour l'ensemble des trois visions opérationnelles	•
Cognitive	<u>Aide à l'anticipation</u>	 Anticipation	Graphe de décision de changement de stratégie	•
	<u>Aide à l'adaptation</u>	 Adaptation	Graphe de décision de changement de mode de marche	•
	<u>Aide au diagnostic</u> <u>Aide à la représentation mentale</u>	Mission  Scénario Coordination Réseau opérant	Graphe défaut / défaillance Graphe de causalité entre variables du procédé	•
Opérateur	<u>Aide à l'application des tâches</u>	Programme  Pilotage Organisation logistique	Graphe de défaillance humaine Graphe de tâches Graphe de distribution des tâches humaines et tâches automatisées	•

Tableau IV.9 : Champ de modélisation de la méthode SAGACE pour les processus industriels.

IV.7 SAGACE COMME RÉFÉRENTIEL POUR LE DIAGNOSTIC

Au delà de la description d'un processus industriel, en particulier des aspects fonctionnel et structurel qui permettent d'avoir une description synthétique du processus étudié, il nous faut définir la manière dont SAGACE peut servir à recueillir les informations utiles pour concevoir un système de diagnostic.

Dans le chapitre II, nous avions évoqué l'intérêt d'un graphe de causalité dans le cadre du raisonnement de diagnostic, et comme moyen d'expliquer l'évolution observée. Nous décrivons plus particulièrement les moyens de construire une structure de graphe causal (graphe ne comportant que les variables importantes et les relations orientées de cause-à-effet) de manière à disposer rapidement d'un réseau de causalité entre variables importantes du processus de fabrication. L'analyse structurelle et fonctionnelle du processus peut permettre d'obtenir une structure causale comme étape initiale de construction d'un graphe de causalité.

IV.7.1. Les connaissances mises en œuvre dans DIAPASON

Les modules PROTEE (simulation), et MINOS (détection et diagnostic de défauts) du système DIAPASON emploient un graphe de causalité qui lie les variables du procédé les unes aux autres. Ce graphe est utilisé comme structure de modèle dont les liens - ou les arcs - sont évalués en analysant les comportements du processus industriel (le simulateur PROTEE utilise des notions d'Automatique du type temps de réponse, gain et retard pur). Le module METHYS est un système expert qui fonctionne sur la base d'une description des défaillances et des pannes d'appareils.

Le graphe de causalité revêt une importance particulière puisqu'il est employé comme représentation conceptuelle des influences dynamiques entre grandeurs surveillées du processus. C'est autour de cette représentation qu'un modèle de simulation est construit : un arc symbolise une relation d'influence entre deux variables mesurées ou estimées, qui peut être évaluée au moyen de méthodes d'identification classiques en automatique. Le graphe de causalité fournit à MINOS, par ailleurs, les moyens d'expliquer un défaut par parcours inverse des relations d'influence entre grandeurs surveillées.

Différentes approches ont été proposées pour construire la structure d'un graphe causal ; les travaux les plus célèbres sont ceux de De Kleer et Brown, ainsi que ceux d'Iwasaki et Simon [DE KLEE 84] [IWASA 86]. Ces deux approches proposent de retrouver la causalité contenue implicitement dans le jeu d'équations décrivant les comportements d'un processus.

Les principaux reproches qui peuvent leur être fait sont les suivant :

- leur mise en œuvre dépend de manière trop étroite des équations disponibles pour pouvoir être exploitables à l'échelle industrielle : le système doit être décrit par un jeu d'équations complet qui, s'il n'est pas déjà disponible, impliquera une mobilisation conséquente en temps et en hommes, ne serait-ce qu'en raison de la taille de l'installation à modéliser,
- la manière dont les équations sont écrites influe pour beaucoup sur le résultat obtenu : $T_c = T_0$ est formellement équivalent à $T_0 = T_c$ mais les approches d'Iwasaki et De Kleer supposent une écriture sous forme de système d'équations ordonnées qui oblige quelque peu à organiser son problème pour en déduire une chaîne causale ; ici la forme $T_c = T_0$ n'est donc pas bonne (se reporter à l'annexe III pour plus de détails).

Un modèle causal est une interprétation du comportement d'un système, et les possibilités d'interprétations sont multiples ; la figure IV.15 donne deux interprétations possibles de la causalité sur l'exemple d'une cuve dont sont mesurés les débits d'entrée et de sortie liquide ainsi que le niveau

[LEYVA 91].

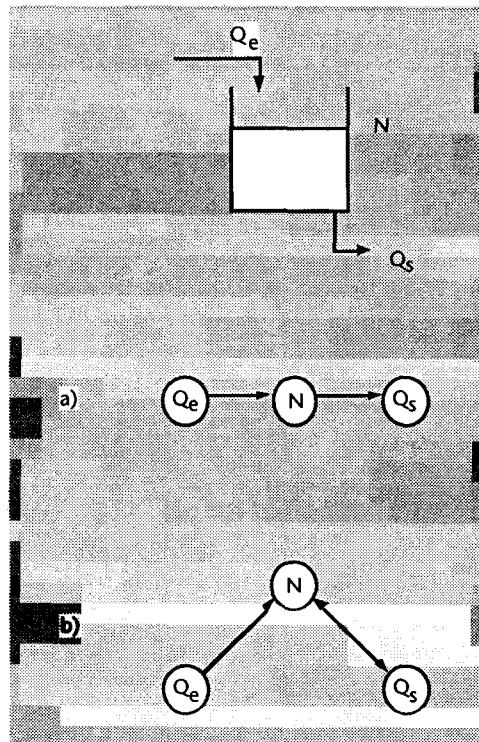


Figure IV.15 : Interprétations de la causalité.

La causalité exprime, en définitive, la manière dont l'observateur se représente les phénomènes sous-jacents, c'est un modèle de comportement qui satisfait à la fois aux modes de raisonnement de l'observateur et aux lois élémentaires de la physique.

Leyval a émis l'hypothèse qu'une approche basée sur l'analyse fonctionnelle du processus pouvait permettre de déduire une structure de graphe causal pour les systèmes industriels. C'est cette voie que nous avons choisie d'emprunter.

IV.7.2. Construction d'une structure de graphe causal

La démarche qui est proposée ici diffère de celles d'Iwasaki et de De Kleer dans la mesure où elle ne requiert pas la connaissance préliminaire d'un modèle de comportement ou de connaissance du système étudié. Elle se veut une manière de rechercher la causalité au travers d'une analyse fonctionnelle du système physique ; elle se rapproche ainsi de la conception de la causalité selon De Kleer, puisqu'elle laisse une place importante à l'interprétation, ce qui rend nécessaire l'emploi d'une démarche d'analyse la plus rigoureuse possible. En la matière, il n'existe pas de méthode spécifique. Aussi nous envisagerons l'étude des perturbations et leur propagation à travers le processus. L'approche SAGACE peut alors fournir un cadre systématique de description de ces relations de causalité. Il reste à déterminer les règles qui en guideront la construction.

L'analyse dysfonctionnelle d'un processus industriel permet d'expliquer des relations de cause à effet entre appareils. Ce type de relation est matérialisé à travers les flux de matière et d'énergie. de manière intuitive, il existe un rapport entre les relations causales en situation normale et des relations causales en situation dégradée, en prenant le soin de préciser que l'on ne s'intéresse ici qu'aux dysfonctionnements qui suivent les chemins de flux du processus. L'hypothèse sous-jacente est que le modèle de comportement anormal porte, en soi, le modèle de comportement normal. Selon Weld,

ce postulat n'est vrai que dans le domaine de fonctionnement auquel peut être associé un comportement monotone, en l'occurrence pour nous la zone de fonctionnement nominal plus ou moins un epsilon [WELD 90]. C'est l'hypothèse que nous admettrons dorénavant.

Quand nous parlons de dysfonctionnement ou de défaut, il faut entendre une perturbation suffisamment importante pour mettre la variable hors de sa zone nominale, mais la structure du processus est inchangée, ce qui signifie que les paramètres de fonctionnement peuvent être perturbés mais que le modèle nominal reste valide.

IV.7.2.1 Une première approche

Une première approche peut consister à décrire le processus sous forme de systémogrammes puis à expliciter, pour chacune des feuilles de l'arborescence, en l'occurrence les appareils, les graphes défaut-défaillance issus de l'interprétation de l'AMDE du processus. C'est à partir de l'analyse des influences entre flux que l'on peut émettre l'hypothèse d'une relation de causalité entre grandeurs portées par les flux respectifs. Il s'agira, ultérieurement, de déterminer si la relation ainsi posée est pertinente ou non, c'est-à-dire si elle intervient de façon notable dans les conditions normales de fonctionnement.

A l'intérieur de la matrice SAGACE, le processus industriel est décrit dans le réseau opérant du systémographe ; ce sera donc le seul point de vue, parmi les neuf, qui sera considéré. L'éditeur de graphes permet d'établir des liens entre caractéristiques de flux ; il est donc susceptible de répertorier les liens de causalité entre flux. On s'intéressera principalement à mettre en évidence les relations de causalité entre grandeurs surveillées dont les influences suivent les chemins de flux physiques.

Les étapes de la démarche sont décrites en figure IV.16.

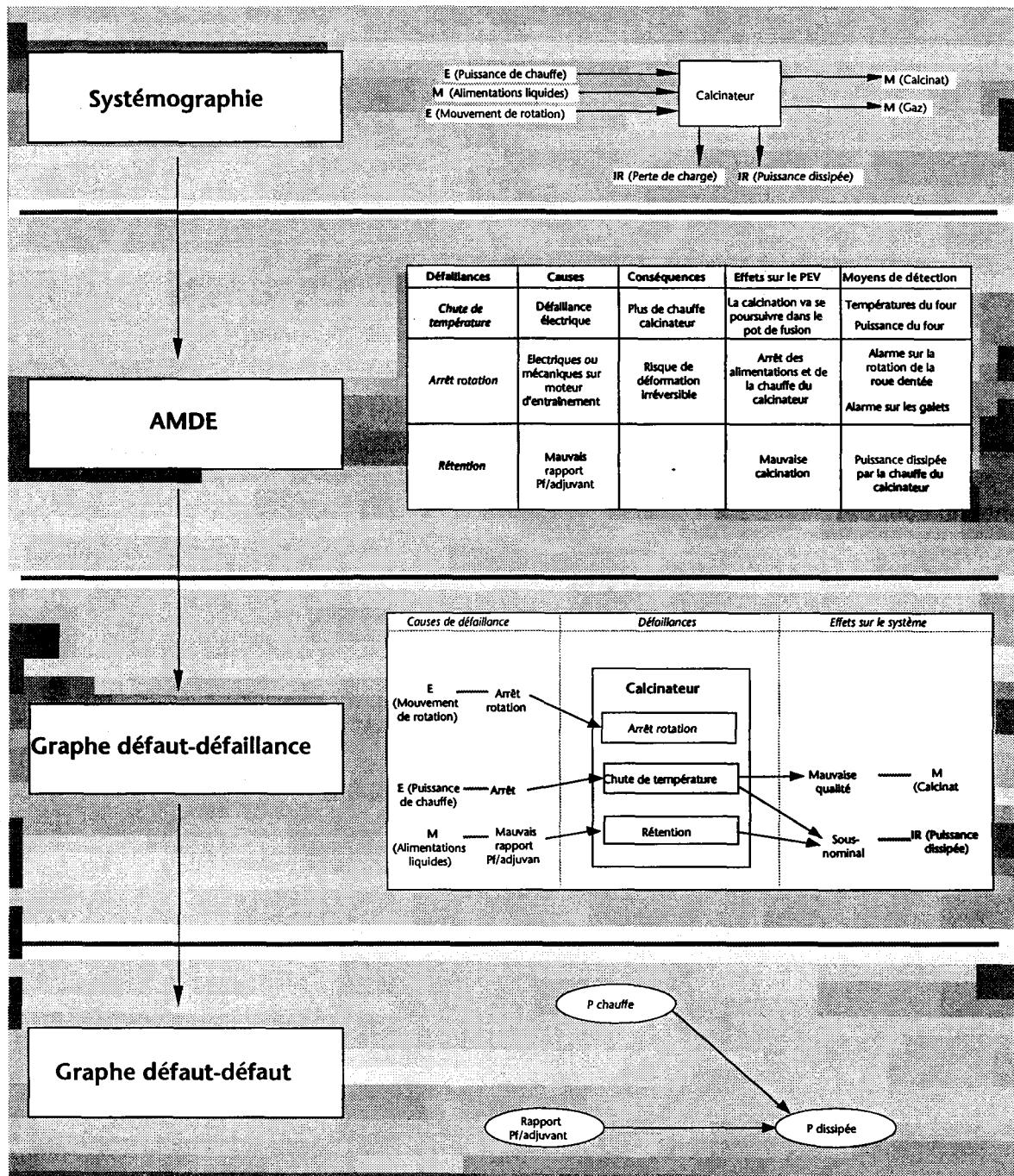


Figure IV.16 : Obtention d'une structure de graphe causal à partir d'une AMDE via SAGACE.

Les résultats de l'analyse AMDE peuvent servir à formuler les règles de diagnostic pour le module METHYS, comme le montre l'exemple de la figure IV.17.

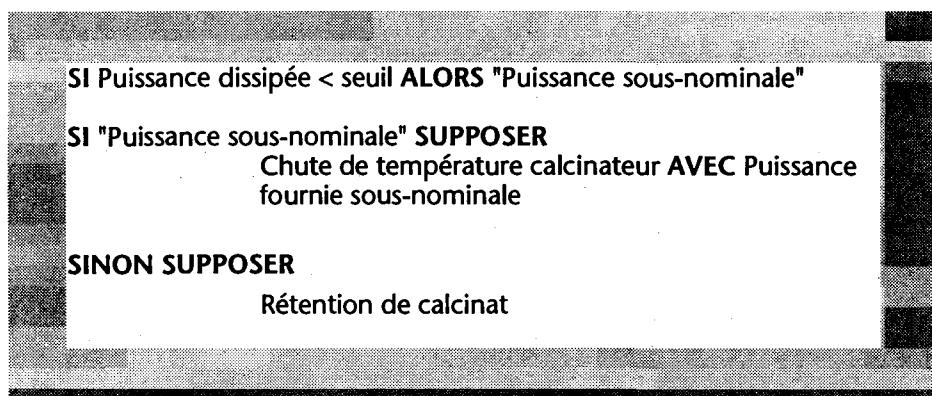


Figure IV.17 : Exemple de règle METHYS associée au calcinateur.

IV.7.2.2 Une approche utilisant la méthode d'analyse de Finch et Kramer

Une seconde approche, basée sur l'analyse dysfonctionnelle de groupes d'appareils participant à une fonction du processus, est envisagée.

Analyse de dépendances

Finch et Kramer emploient la modélisation des dépendances conditionnelles comme stratégie de diagnostic fondée sur un modèle logique de propagation de dysfonctionnements [FINCH 88]. Le parcours de ce graphe permet de prédire les effets possibles d'un dysfonctionnement sur un nœud, ou de remonter à la source d'un défaut observé : à chaque nœud du graphe est associée une fonction qui remplit un objectif donné, et qui peut être évaluée par au moins une variable mesurée. Le diagnostic vise alors à déterminer la fonction (le nœud) effectivement en défaut.

De manière générale, une fonction est assurée par un ensemble d'appareillages qui poursuivent chacun un objectif particulier (ces objectifs peuvent ne pas être évalués individuellement, mais plutôt collectivement au travers d'une variable globale). Le cas où un même nœud comporterait plusieurs variables n'est pas souhaitable, puisqu'il n'y aurait pas de relation explicite liant ces variables entre elles ; cela constituerait en fait une limite pour le diagnostic, puisqu'il faudrait alors passer en revue plusieurs hypothèses de pannes, introduire la notion de probabilité d'occurrence, ou bien faire appel à une autre technique de diagnostic local.

La figure IV.18 montre le graphe tel que déduit par analyse des dépendances (L_r, T₁, S₁₁, etc. représentent les variables mesurées). La méthode d'obtention est décrite en annexe IV.

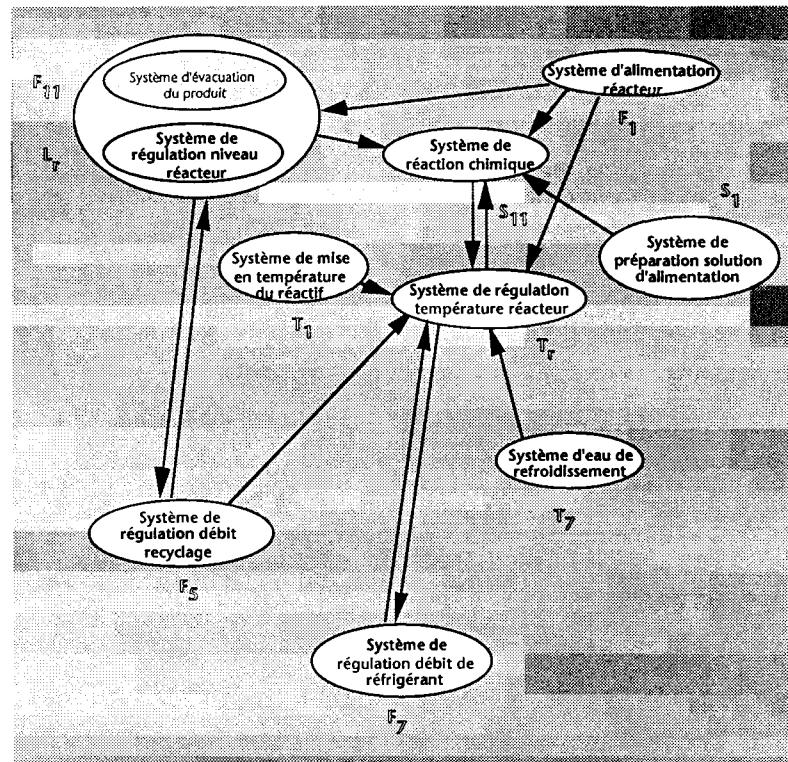


Figure IV.18 : Le réseau de dépendances entre groupes fonctionnels d'appareils.

Comparaison Graphe de causalité et réseau de dépendance

Le graphe de causalité de ce même réacteur est décrit en figure IV.19, qui est issu de travaux antérieurs [FINCH 87]. Les variables cerclées sont celles qui sont mesurées.

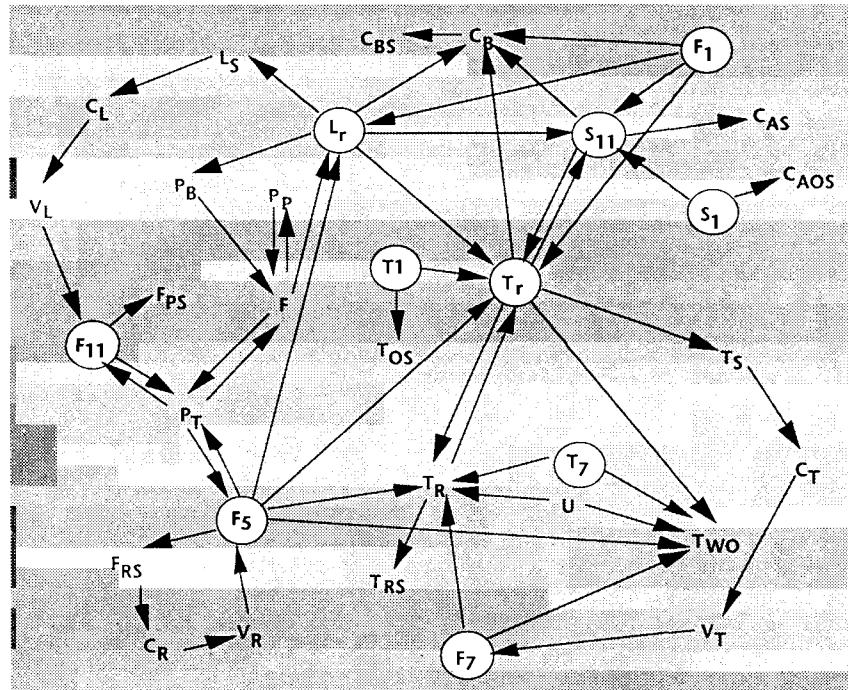


Figure IV.19 : Le graphe de causalité du réacteur.

Pour pouvoir comparer ces deux représentations, nous avons supprimé les variables non mesurées. En

vertu du fait qu'un tel graphe constitue une interprétation du comportement d'une installation, il est parfaitement légitime de faire abstraction d'un certain nombre de nœuds à condition que les relations entre nœuds restants soient préservées. La procédure de réduction du graphe de causalité est décrite en annexe V.

Le résultat de cette réduction est le suivant (figure IV.20)

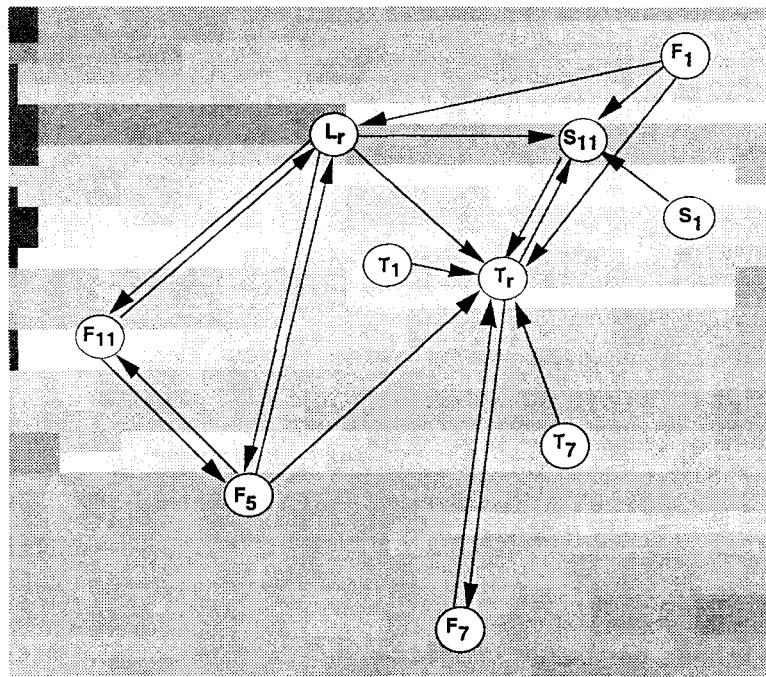


Figure IV.20 : Graphe causal obtenu après réduction.

L'analyse comparée du graphe causal (figure IV.19) et du modèle de dépendances (figure IV.18) permet de vérifier que la structure des deux réseaux est sensiblement la même (figure IV.20), à quelques différences près :

- dans le modèle de dépendances, les deux variables L_r et F_{11} sont incluses dans un seul et même système, le système de régulation du niveau du réacteur. Il eut été préférable de les séparer au sein de deux systèmes distincts, cela aurait certainement permis de retrouver les relations de causalité existant entre les variables F_{11} et F_5 ,
- il n'y a pas de relation directe entre le système de régulation de niveau et le système de régulation de température, comme le laissait supposer l'arc reliant L_r à T_r dans le graphe causal. N'ayant aucune information sur la façon dont le graphe causal a été obtenu, on ne peut écarter l'hypothèse d'un arc redondant.

En définitive, bien que ces deux modèles correspondent à des visions a priori distinctes - l'une aborde la modélisation de la propagation de dysfonctionnements, et l'autre la modélisation des influences entre variables du processus -, elles se basent toutes-deux sur l'interprétation des interactions entre entités (d'un côté les systèmes et de l'autre les variables) en termes de causalité.

Généralisation et application de la méthode au PEV

Nous proposons d'étendre l'utilisation de cette démarche aux systèmes de grande taille. Pour ce faire, nous proposons de considérer le processus sous forme d'une hiérarchie de niveau de décomposition. Cet aspect est évoqué en annexe VI. Cette démarche a été employée sur l'ensemble de l'installation PEV (se reporter en annexe VII).

IV.7.3. Conclusion

L'analyse des dépendances se positionne comme une approche d'analyse, certes moins fine qu'une AMDE, mais qui permet d'aboutir plus rapidement à l'établissement des dépendances au sein du processus et, ce faisant, d'en déduire une structure causale entre variables mesurées. L'application de cette approche nécessite une décomposition particulière du processus : l'installation est décomposée selon des critères fonctionnels. Ici, les composants élémentaires de l'analyse sont les groupes d'appareils réalisant chacun une fonction élémentaire, par opposition à l'approche par AMDE qui nécessite de pousser la décomposition jusqu'au niveau des appareils.

Ainsi, la condition principale pour réaliser un modèle fonctionnel de dépendance est le suivant : dans la mesure où un processus quelconque peut se mettre sous la forme de systèmes fonctionnels régulés n'ayant qu'une variable régulée (et une variable manipulée), de systèmes fonctionnels passifs n'ayant qu'une seule sortie mesurée, alors l'application de cette méthode de décomposition fonctionnelle à un système quelconque permet d'aboutir rapidement au modèle de dépendance recherché. Dans le cas contraire, il s'agira, pour le modélisateur, et dans la mesure du possible, de se ramener à une telle décomposition, en choisissant un niveau de décomposition tel que, pour chacun des sous-systèmes isolés, corresponde une seule variable qui caractérise son fonctionnement.

En somme, l'approche proposée par Finch et Kramer permet de définir un cadre d'analyse suffisant pour concevoir la structure d'un graphe causal décrivant les dépendances entre variables principales. Cette approche constitue une analyse préliminaire d'un système qui peut ensuite déboucher sur une analyse de sûreté faisant appel aux outils et méthodes tels que l'analyse des risques, l'AMDE et son extension l'AMDEC, l'analyse des causes insidieuses, les diagrammes de fiabilité, les arbres de défaillance, etc.

Cette approche est compatible avec les concepts de la méthode SAGACE. Un de ses intérêts est de fournir des règles de décomposition du processus. Un autre intérêt est la possibilité d'analyser les dépendances entre groupes d'appareils, par un processus de focalisation : une relation orientée entre deux ensembles d'appareils s'exprime, au niveau de décomposition supérieur, en au moins une relation de dépendance.

IV.8 CONCLUSION

La typologie proposée au chapitre I est, de nouveau, employée pour classer les connaissances et les méthodes de recueil associées. Ceci est une manière de spécifier, dès l'analyse des besoins, les connaissances qui devront être recueillies. Les grilles ainsi définies n'ont pas la prétention d'être exhaustives, elles ont pour fonction de remplacer les méthodes les plus couramment rencontrées dans le contexte des aides à l'opérateur. Elles établissent, par ailleurs, un lien entre les méthodes d'analyse technique et les méthodes de recueil d'expertise.

SAGACE peut être qualifiée de méthode "à large spectre" puisqu'elle propose de modéliser une installation industrielle en neuf points de vue prenant chacun en compte un aspect particulier. L'intérêt d'une telle approche, selon nous, est la possibilité qu'elle offre d'avoir une vue compartimentée d'un système complexe, son fort pouvoir descriptif et structurant.

L'expérience de la modélisation du PEV dans le cadre de la méthode SAGACE nous amène à penser que la représentation d'un système n'est pertinente que par rapport aux objectifs qui ont motivé la modélisation. Il ne s'agit pas de tout représenter d'un système, au contraire, l'approche SAGACE permet : le choix d'une limite de résolution définissant les composants considérés, cela fixe le niveau de détail de l'analyse ; le choix des limites extérieures du système et de son environnement proche.

Par ailleurs, cette méthode ne vise pas à se substituer aux méthodes courantes d'analyse, elle vise plutôt à fournir un cadre à partir duquel peuvent s'articuler les connaissances acquises par le biais de ces méthodes. SAGACE est donc avant tout une méthode de structuration de l'ensemble de la démarche de modélisation des connaissances.

Enfin, la représentation graphique permet une validation plus aisée et conduit à un référentiel commun pour l'ensemble des intervenants du projet (décideurs, exploitants, ingénieurs procédé, opérateurs et équipe de supervision).

En ce qui concerne les connaissances utilisables en conception de systèmes d'aide à l'opérateur, SAGACE prend en compte l'ensemble des connaissances descriptives ainsi que les connaissances de fonctionnement (hormis pour le niveau individuel, qui concerne plus spécifiquement les domaines de l'ergonomie et la psychologie du travail), et pas du tout les connaissances liées à l'expertise.

La méthode nous a offert les moyens de représenter les aspects comportementaux (au sens classique du terme) à l'aide de graphes sémantiques particuliers : les graphes causaux. Pour les besoins de DIAPASON, les connaissances formalisées dans l'outil SAGACE sont essentiellement sous forme de graphes de causalité et de graphes défauts/défaillances. L'intérêt d'une telle approche est la possibilité de modéliser les comportements de manière locale à chaque appareil procédé, ce qui permet de valider localement les relations d'influence.

Références bibliographiques

- [ABED 90] **M. Abed, J.M. Bernard, J.C. Angue,**
Task analysis and modelization by using SADT and PETRI networks,
10th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control,
Liège, Belgium, 11-13 November 1991.
- [AUSSE 89] **N. Aussenac,**
Conception d'une méthodologie et d'un outil d'acquisition de connaissances expertes,
Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1989.
- [DE KLE 84] **J. De Kleer, J. S. Brown,**
A qualitative physics based on confluences
Artificial Intelligence Journal, vol. 24, pp. 7-83, 1984.
- [FADIER 90] **E. Fadier,**
Fiabilité humaine : méthodes d'analyse et domaines d'application,
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, éditions OCTARES Entreprises, pp. 47-80, 1990.
- [FINCH 87] **F.E. Finch, M.A. Kramer,**
A rule-based approach to fault diagnosis unsing the signed directed graph,
AIChE Journal, vol.33, n°7, July 1987.
- [FINCH 88] **F.E. Finch, M.A. Kramer,**
Narrowing diagnostic focus using functional decomposition,
AIChE Journal, vol. 34, n°1, January 1988.
- [GENTH 89] **P. Genton,**
Dictionnaire de l'intelligence artificielle,
Traité des Nouvelles Technologies série Intelligence Artificielle, HERMES, Paris, 1989.
- [HOC 87] **J. M. Hoc,**
Psychologie cognitive de la planification,
Sciences et Technologies de la Connaissance, PUG, 1987.
- [HOC 91] **J.M. Hoc,**
L'ergonomie cognitive : un champ pluri-disciplinaire dans les sciences cognitives,
Les sciences cognitives en débat, Editions du CNRS, Paris, 1991.
- [IWASA 86] **Y. Iwasaki, H.A. Simon,**
Causality in device behavior,
Artificial Intelligence, 29, pp. 3-32, 1986.
- [JOHAN 91] **G. Johannsen, J. L. Alty,**
Knowledge engineering for industrial expert systems,
Automatica, vol. 27, N°1, pp. 97-114, 1991.

- [KOLSKI 93] **C. Kolski**,
Ingénierie des interfaces homme - machine, conception et évaluation,
Traité des Nouvelles Technologies, série Automatique, eds HERMES, 1993.
- [LE MOI 90] **J. L. Le Moigne**,
La modélisation des systèmes complexes,
Afcet Systèmes, eds. Dunod, 1990.
- [LE MOI 92] **J. L. Le Moigne**,
Gestion des actifs intangibles. Sur l'ingénierie de la connaissance
organisationnelle. Symboliser, Mémoriser, Finaliser,
Journée I.I.I.A., Berne, 13 février 1992.
- [LEYVA 91] **L. Leyval**,
Raisonnement causal pour la simulation de procédés industriels continus,
Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 1991.
- [MARCA 87] **D.A. Marca, C. L. McGowan**
SADT. Structured Analysis and Design Technique,
McGraw-Hill, 1987.
- [MITCH 86] **C.M. Mitchell, R.A. Miller**,
A discrete control model of operator function : a methodology for information
display design,
IEEE Transactions on Man and Cybernetics, Vol. SMC 16, pp 343-357, 1986.
- [PITRA 90] **J. Pitrat**,
Métaconnaissance, le futur de l'intelligence artificielle,
Hermès, Paris, 1990.
- [PENAL 94] **J.M. Penalva, E. Page**,
SAGACE. La modélisation des systèmes dont la maîtrise est complexe,
ILCE'94, Montpellier, les 7-11 février 1994.
- [POYET 90] **C. Poyet**,
L'homme, agent de fiabilité dans les systèmes automatisés,
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, editions OCTARES Entreprises, pp. 223 - 240, 1990.
- [RASMU 79] **J. Rasmussen**,
On the structure of knowledge - a morphology of mental models in a man-
machine system context,
RISØ-M-2192, UDC 007.51 :62-5 : 65.015.12, Risø National Laboratory, DK-4000 Rokslide, Denmark, 1979.
- [SCAPI 89] **D. Scapin, C. Pierret-Golbreich**,
MAD : une méthode analytique de description des tâches,
Actes du colloque sur l'ingénierie d'interfaces homme-machine, Sophia-Antipolis, 24-26 Mai 1989.
- [VILLEM 88] **A. Villemeur**,
Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Fiabilité - Facteurs humains -
Informatisation,
Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Editions Eyrolles, 1988.
- [WALL 77] **B. Walliser**,
Systèmes et modèles, introduction critique à l'analyse des systèmes,
Eds. Seuil, Paris, 1977.

[WELD 90]

D. Weld,
Exaggeration,
Artificial Intelligence, n°43, vol. 2, 1990.

CONCLUSION

De nombreux "mythes" sont encore associés aux systèmes informatiques qui exploitent des techniques issues de travaux en intelligence artificielle. L'objectif que nous nous étions fixés visait justement à poser les bases nécessaires pour aborder convenablement un projet d'aide à l'activité humaine de supervision de processus de fabrication.

Un des problèmes les plus saillants auquel nous avons eu à faire face, en conception d'aides à la supervision, encore appelées aides à l'opérateur, n'était pas tant de résoudre des problèmes techniques que de donner du sens à ces aides : comprendre pourquoi la présence de l'opérateur est nécessaire à la bonne marche d'un processus de fabrication, en quoi une aide peut lui être utile et prendre en compte l'environnement complexe dans lequel intervient l'opérateur, apparaissent comme autant de conditions nécessaires à la réussite d'un tel projet. Si les acteurs qui interviennent dans la problématique des aides s'accordent sur l'importance de ces points, il n'en reste pas moins que les solutions proposées sont encore peu satisfaisantes.

Le présent travail constituait donc une première étape vers la définition d'une méthodologie de conception d'aides à l'opérateur. Pour ce faire, nous avons choisi de placer l'homme au centre de notre problématique, et porté notre attention sur les objectifs suivants : disposer d'une représentation des principaux facteurs influant sur la performance de l'opérateur, incidemment sur la performance du processus de fabrication ; disposer d'une description structurée de l'offre en matière de fonctionnalités d'aide à l'opérateur ; orienter et justifier le choix d'une aide ; préparer le développement du système proprement dit.

UN CADRE DE DESCRIPTION DE L'OPÉRATEUR

Une aide à la supervision s'adresse directement à l'opérateur ; il nous paraissait donc important d'effectuer une synthèse des principales caractéristiques humaines participant à la performance globale du processus de fabrication. Cela a permis la mise en évidence de concepts fondamentaux liés à la performance de l'opérateur. Nous avons ainsi choisi d'explorer le champ de l'**erreur humaine** comme moyen de détection et de diagnostic des dysfonctionnements de l'opérateur. En effet, si l'opérateur est un facteur d'adaptation et de fiabilité, il est également un **facteur de risque** : ses performances sont susceptibles d'importantes variations, qui peuvent avoir une incidence néfaste sur le processus de fabrication et dont les conséquences s'évaluent à travers des données économiques telles que des coûts de production, des coûts de maintenance ou, à l'extrême, par des accidents.

De nombreux auteurs ont étudié l'erreur humaine et en ont dressé une liste, une typologie, chacune insistant sur certains aspects de l'activité humaine. Dans une optique méthodologique, une typologie générale capable d'inclure l'ensemble des activités humaines nous paraissait plus indiquée ; c'est pourquoi nous avons construit une nouvelle **typologie d'erreurs** sur la base des travaux de Nicolet, de Keyser et Reason.

Ce faisant, nous nous sommes dotés d'un **modèle de l'opérateur** fondé sur la mise en correspondance des erreurs et des dimensions de l'activité humaine impliquées en supervision.

LES AIDES À L'OPÉRATEUR

De nombreuses disciplines des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines sont impliquées dans un projet d'aide à la supervision. Pour le concepteur, il devient très difficile d'avoir une vision d'ensemble des solutions disponibles en raison de leur variété et de leur diversité. Une classification des aides est très utile pour structurer et organiser le domaine des aides à l'activité humaine. Son obtention constitue donc un jalon important vers la définition d'une démarche méthodologique.

C'est pourquoi nous avons introduit une grille de lecture des solutions existantes en utilisant le modèle de l'opérateur défini précédemment : à chacun des types d'erreurs correspond au moins un type d'aide à l'opérateur. Six types d'aide sont déclinés, parmi lesquels l'aide à l'application des tâches pour la dimension opératoire et l'aide au travail collectif pour la dimension collective. En ce qui concerne la dimension cognitive, quatre types d'aide sont mis en évidence : l'aide à la représentation mentale, l'aide au diagnostic, l'aide à l'adaptation et l'aide à l'anticipation. Ces aides visent, globalement à aider l'opérateur dans la prise de décision.

Avec l'aide à la représentation mentale, qui regroupe les travaux menés dans le domaine des interfaces homme-machine, l'aide au diagnostic représente l'aide la plus investiguée, sans doute parce qu'elle fait très largement appel aux sciences de l'ingénieur (informatique, automatique, génie chimique, etc.). La difficulté est qu'il existe de nombreuses manières d'envisager le diagnostic. Pour aider le concepteur, nous avons proposé de regrouper les approches employées en automatique et les approches employées en intelligence artificielle au sein d'une représentation unique et inspirée des travaux de Leitch, qui décrit un processus de diagnostic comme un processus de traitements informationnels élémentaires, encore appelés tâches primitives, et considérés comme les constituants de base d'un système de diagnostic. Quatre tâches primitives permettent de décrire un tel processus : les tâches d'interprétation, de prédiction, de décision et d'identification. Le travail du concepteur revient alors à choisir, pour chacune des tâches primitives, la technique qu'il convient d'employer, en fonction notamment des connaissances disponibles et des caractéristiques de l'instrumentation.

Notre classification des aides fait apparaître deux autres types d'aide de la dimension cognitive : l'adaptation et l'anticipation. A notre connaissance, ces deux niveaux d'aide n'ont pas donné lieu à des travaux spécifiques au même titre que le diagnostic, mais il est vraisemblable que ces aides sont respectivement associées aux notions de conseil à l'opérateur et d'aide au changement de stratégie de conduite.

UNE DÉMARCHE DE CONCEPTION

La difficulté majeure à laquelle nous avons été confrontés, dans le projet DIAGPEV qui visait la mise en application du système de diagnostic DIAPASON sur l'installation PEV, n'était pas tant l'aspect technique du projet que sa justification auprès de l'ensemble des acteurs de l'entreprise : les apports potentiels d'une aide étaient mal perçus, principalement par manque de critères d'évaluation. Par conséquent, orienter le projet sur la base des motivations du personnel de gestion financière ou sur le choix des fonctionnalités à implanter se sont avérés insuffisants pour cerner le bien-fondé de ce type de projet. Par ailleurs, la nouveauté de ces systèmes d'aide ne permettait pas une analyse fonctionnelle des besoins, en raison du peu de données associant insatisfactions à des solutions techniques relevant d'une aide à la supervision.

Les éléments de réponse proposés ici exploitent le modèle de l'opérateur basé sur les erreurs ainsi que la classification des aides définie précédemment. L'idée avancée est qu'un projet d'aide doit être

envisagé en prenant en compte le système complexe que constitue l'entreprise. Aucune approche ne permet, à elle seule, de définir convenablement les orientations du projet, il convient donc d'aborder la définition des objectifs par une démarche méthodologique qui combine plusieurs approches, de façon à se donner les moyens d'un recouplement entre motivations, attentes, besoins ou problèmes des différents acteurs de l'entreprise :

- en considérant les aspects purement techniques, c'est-à-dire en adoptant le point de vue des **fonctionnalités de l'aide** (approche employée jusqu'ici),
- en considérant les améliorations que souhaitent les opérateurs et le personnel de gestion technique, c'est-à-dire en adoptant une approche par les **besoins** (approche classique de l'**analyse de la valeur**),
- en considérant les erreurs des opérateurs, c'est-à-dire en adoptant le point de vue des **problèmes** (approche fiabiliste),
- en considérant les dimensions de l'activité qui devront être privilégiées, c'est-à-dire en adoptant le point de vue des **attentes**.

L'approche par les attentes permet de tenir compte des choix stratégiques de l'entreprise en ce qui concerne la manière dont le processus de fabrication doit être conduit. Dans le domaine du nucléaire, la stratégie consiste à privilégier la dimension opératoire de l'opérateur ; l'idéal serait qu'à toute situation puisse correspondre une procédure de récupération que l'opérateur n'aurait plus qu'à appliquer. Pour l'exploitant, l'objectif est de limiter le plus possible l'occurrence de situations pouvant faire appel à la dimension cognitive, considérée comme une source importante d'erreurs.

L'ACQUISITION DES CONNAISSANCES

Une caractéristique des aides à l'opérateur est qu'ils manipulent des connaissances. Leur acquisition est donc un préalable au développement proprement dit du système d'aide, mais elle pose d'importants problèmes aux concepteurs, principalement en raison de leur diversité.

Il était donc utile de mettre en regard, pour chacun des types d'aide évoqués précédemment, les connaissances participant à leur mise en œuvre. Une classification des connaissances a donc été proposée, et les méthodes d'analyse couramment employées intégrées dans cette classification. L'objectif était de permettre au concepteur de sélectionner rapidement les méthodes utiles pour le projet.

Par ailleurs, avant de démarrer l'acquisition proprement dite des connaissances, il est important de disposer d'une représentation du système sur lequel le concepteur se propose d'intervenir. L'objectif est de construire une représentation qui permette de :

- délimiter le champ d'étude,
- disposer d'une représentation partagée, d'un **référentiel commun** à l'ensemble des intervenants du projet (décideurs, ingénieurs procédé, opérateurs et concepteur du système d'aide),
- préparer l'acquisition des connaissances.

La méthode SAGACE de modélisation des systèmes complexes a été utilisée dans cette optique et appliquée au Prototype Evolutif de Vitrification de Marcoule. La particularité de cette méthode est qu'elle ne cherche pas à se substituer aux méthodes classiques d'analyse, elle propose plutôt un cadre descriptif à partir duquel peuvent s'articuler les connaissances acquises par le biais de ces méthodes. SAGACE est également intéressante en ce sens qu'elle permet de répertorier et d'organiser les connaissances liées, notamment, aux modes de fonctionnement et aux configurations de marche du processus de fabrication ; cela constitue une avancée importante par rapport aux approches classiques d'analyse. Ainsi, le cadre de modélisation que propose la méthode SAGACE permet

d'entrevoir la possibilité d'exploiter cette connaissance, et pourquoi pas, de proposer aux opérateurs ce type d'information au sein d'une interface de supervision.

PERSPECTIVES

Pour aller dans le sens de la mise en place d'une méthodologie de conception, il sera nécessaire de lever certaines interrogations que nous considérons fondamentales, notamment :

- s'agit-il de changer la façon dont les opérateurs conduisent ?
- s'agit-il d'accroître la confiance des opérateurs envers les systèmes informatisés ?
- s'agit-il de réduire les erreurs humaines ?
- l'introduction d'une aide modifie-t-elle l'organisation du travail au sein de l'équipe de conduite ?

En ce sens, les éléments de réponse contenus dans ce mémoire constituent une base pertinente de réflexion .

Par ailleurs, la démarche méthodologique proposée dans cette thèse était orientée vers la réduction, voire la prévention des risques liés aux dysfonctionnements de l'opérateur, au sein d'un processus de fabrication existant ou en voie d'être construit. A plus longue échéance, il ne s'agira plus seulement d'apporter une aide à l'opérateur (logique de correction) mais d'adapter le processus de fabrication au fonctionnement humain et ce, dès la conception de l'installation (logique "écologique"). Cela suppose une évolution profonde de la manière dont les industriels conçoivent le rôle de l'opérateur de conduite.

ANNEXE I : Modèles de l'opérateur

Une préoccupation de plus en plus importante de l'ergonomie et de la psychologie cognitive est de concevoir des **modèles de compréhension de l'activité humaine**. Cela devrait permettre de modéliser les aspects propres à la représentation et au raisonnement, afin de comprendre les mécanismes ou les causes qui conduisent à la non performance. La distinction entre **modèles de représentation et modèles de raisonnement** est une hypothèse de travail généralement admise ; nous conservons cette distinction pour décliner quelques modèles.

Les références citées sont communes à celles contenues dans le chapitre I, sauf pour certaines qui sont indiquées en note de bas de page.

A.I.1 MODÈLES DE PRÉSENTATION

Les représentations mentales que l'opérateur élabore sont essentiellement orientées vers l'action [OCHAN 71]¹ [GOODST 82] [RASMU 79]. Deux approches sont envisagées : celle de **de Keyser**, en psychologie du travail, qui porte principalement son attention sur les **aspects temporels** de la perception du processus par l'opérateur, et celle de **Rasmussen**, en psychologie cognitive, qui porte son attention sur les représentations qu'il décrit au travers d'une **hiérarchie de modèles**, prenant chacun en compte un des aspects suivants : les évolutions du processus, les jalons et délais de production, la fonction des appareils, leur rôle dans le processus, la position des capteurs et actionneurs.

A.I.1.1 Modèle de De Keyser

Les études menées en psychologie du travail par de Keyser nous fournissent des indices quant à l'activité des opérateurs face à un processus qui évolue dans le temps [DE KEYS 90b]. Selon l'auteur, l'opérateur se fonde sur des aspects temporels pour se bâtir une représentation du comportement global lui permettant d'effectuer un suivi en temps réel du processus.

Quatre modes de perception de la dynamique du processus sont introduits: **intériorisation des phénomènes** selon leur fréquence d'occurrence, **mode logique**, **mode causal**, et **mode de l'horloge**.

Le premier mode de perception implique l'**intériorisation des phénomènes** qui surviennent avec régularité. En effet, l'opérateur est capable d'**appréhender des rythmes**, d'estimer des durées qui

¹ D.A. Ochanine, L'homme dans les systèmes automatisés, *Sciences du Comportement*, Dunod, 1971.

surviennent de façon régulière, ou des schèmes² d'actions qui s'enchaînent dans un ordre identique. L'opérateur fait confiance à cette intériorisation, même s'il doute régulièrement de la fiabilité de l'instrumentation et des machines. Il semble que l'opérateur accorde un grand crédit aux rythmes qu'il a pu déceler. L'intériorisation permet une économie du comportement puisque la prise d'information sur le monde extérieur est réduite, l'anticipation est possible et l'incertitude, source de stress, diminue.

En mode logique, le temps est estimé au travers de la mise en relation d'événements du processus ou d'actions de l'équipe. L'opérateur se fonde ici sur la notion de repère temporel, de détail pertinent qui lui permet de savoir s'il y a passage d'un état de fonctionnement à un autre. Ces repères correspondent aux propriétés des événements qui jalonnent les phases d'exploitation : relations entre événements (ordre et durée des tâches), occurrence (fréquence, régularité) et observabilité, selon qu'ils sont observables directement sur le procédé ou par visualisation sur un écran de contrôle.

"Il semble donc bien que, à condition d'avoir une richesse informationnelle suffisante dans l'environnement et une bonne expérience du système, l'opérateur puisse, à travers ce mécanisme de mise en relation d'événements, non seulement établir des successions ou des durées, mais également saisir des moments très précis du système - non pas au sens de l'horloge, mais très précis par rapport à un ensemble de conditions devant être remplies pour qu'un événement se produise et que, par exemple, une action soit déclenchée" [DE KEYS 87]³.

En mode causal, l'opérateur se fonde sur une mise en relation d'événements physiques basée sur la causalité pour évaluer la dynamique des phénomènes au sein du processus. C'est une façon de percevoir le temps.

En mode horloge, le temps est perçu comme une contrainte extérieure à l'opérateur, extérieure à l'action, qui peut servir tantôt de mesure, tantôt de repère. Elle s'exprime en termes de délais à respecter, de butées temporelles et peut influencer les stratégies de conduite : obligation de tenir les délais, de commencer et de finir à des heures fixes, etc.

Ces butées forment un cadre temporel rigide à l'intérieur duquel l'opérateur doit faire tenir tous les événements du système. L'opérateur doit, en effet, déterminer l'état présent du système du point de vue de l'avancement des phases du processus et du déroulement des actions de l'équipe, estimer ce qu'il reste à accomplir avant la butée temporelle (cela suppose la mémorisation des séquences d'événements et de leur durée habituelle en temps d'horloge). Enfin, il a pour charge de comparer le temps théoriquement nécessaire et le temps restant avant la butée.

A.I.1.2 La hiérarchie d'abstraction de Rasmussen

Afin de s'assurer la maîtrise de la complexité, l'opérateur se représente le système selon différents niveaux d'abstraction [GOODST 82] [RASMU 79, 81, 83, 84] [VICEN 92]. Il est capable de sélectionner la représentation qui convient le mieux pour le problème à résoudre.

²Schème d'action : ensemble structuré des caractères généralisables d'une action, c'est-à-dire ceux qui permettent de répéter la même action ou de l'appliquer à de nouveaux contenus [HOC 87].

³ V. de Keyser, La communication hommes-machines dans les systèmes complexes, *Action FAST, Programmation de la Politique Scientifique*, Bruxelles, 1987.

Rasmussen envisage les modèles de représentation de l'opérateur en introduisant deux **hypothèses fondamentales** :

- (1) l'homme se conçoit le monde environnant au travers de modèles de représentation. Dans le cadre de la conduite de processus, l'opérateur se fonde sur une représentation des aspects fonctionnels et comportementaux de l'installation afin de détecter des écarts par rapport à un état de référence (l'état normal), de leur associer une cause probable et un niveau d'urgence, et d'anticiper l'évolution du système,
- (2) l'homme s'assure la maîtrise des systèmes complexes en naviguant dans une hiérarchie de modèles (abstraction hierarchy) construite au travers de modèles décrivant chacun les objectifs, les fonctions, le procédé ou son comportement, et enfin l'installation et ses composantes physiques.

Le processus peut être perçu selon divers **niveaux d'abstraction**, c'est-à-dire par un modèle décrivant les fonctions générales qu'il est censé assurer (les services) ou bien par un modèle décrivant les éléments techniques qui assurent des fonctions spécifiés. Hoc assimile cette hiérarchie d'abstraction à une hiérarchie de mise en œuvre selon la relation de décomposition d'un tout en ses parties [HOC 87].

Par exemple, la fonction *Chauffer un réacteur chimique* peut être matériellement prise en charge par une résistance électrique, une chaudière à gaz ou par un four à induction, etc. C'est donc une description qui ne fait pas d'hypothèse, a priori, sur les appareils qui assureront la fonction.

Le processus peut également être perçu selon divers **niveaux de raffinement**, c'est-à-dire qu'il peut être perçu en termes de sous-systèmes, d'unités ou d'appareils, selon le grossissement désiré ; cela est vrai quel que soit le niveau d'abstraction.

Pour donner une idée du contenu de ces modèles, Rasmussen propose des exemples de modèles habituellement employés pour décrire un système : ce sont par exemple les schémas d'installation ou les plans de fonctionnement, les modèles décrivant les liens de cause à effet entre les fonctions du système et entre les variables. Il faut noter que ces modèles n'ont qu'un caractère descriptif et qu'ils ne doivent pas être confondus avec des modèles de représentation (les modèles mentaux), qui ont un caractère implicite et sont, par conséquent, non accessibles.

Rasmussen a, par ailleurs, établi une **classification de modèles de description** des aspects fonctionnels et structurels relatifs aux systèmes industriels qui distingue le **niveau anatomie** (physical form), le **niveau structuro-fonctionnel** (physical function), le **niveau des fonctions génériques** (generic function), le **niveau des fonctions abstraites** (abstract function) et enfin le **niveau objectif** (functional purpose) [RASMU 79].

La hiérarchie d'abstraction est décrite en partant des modèles de plus bas niveau pour aboutir aux modèles abstraits.

Le premier type de modèle décrit l'**anatomie du système**, c'est-à-dire la manière dont peut être perçue l'installation. Au premier abord, l'installation est décrite par ses dimensions ou sa forme et, de manière générale par les informations que nous fournissent nos sens (vision, audition, toucher). Une vision plus structurée décrit l'installation selon ses composantes caractéristiques. C'est une description évidemment partielle mais qui est orientée sur les préoccupations de l'observateur. En l'occurrence, l'opérateur de conduite a besoin de connaître l'emplacement et les moyens d'accès aux appareils dans la mesure où il lui sera nécessaire d'effectuer certaines opérations sur l'installation. C'est également une description finalisée qui privilégie la prise en compte de certains appareils au détriment d'autres (vannes, pompes, etc.), considérés comme moins vitaux. Pour l'ingénierie ou la

maintenance, l'installation peut être décrite au travers de cartes, de plans, de schémas, également partiels mais suffisants pour l'objectif visé. Dans le domaine du génie chimique, la description des flux et appareils principaux est privilégiée, sans que soient nécessairement pris en compte les servitudes et les composants redondants.

Un modèle **structuro-fonctionnel** est intermédiaire entre une description purement fonctionnelle et une autre purement structurelle. C'est une vision qui prend en compte les notions de fonction et de composante physique associée. Nous distinguons deux façons complémentaires de décrire ce niveau.

Une première description fait intervenir le couple variables/relations, qui associe à chacune des variables mesurables une évaluation quantitative de l'état du procédé ; pour l'ingénieur, ce niveau correspond à la modélisation du comportement des appareils, c'est-à-dire à des équations, des règles de calcul permettant de qualifier l'état du système par estimation ; pour l'opérateur, cela correspond à des règles qualitatives d'influence entre variables, acquises par expérience.

Le second type de description prend en compte les objets physiques (appareils ou sous-ensembles d'appareils) et leur associe des propriétés du type *fonction assurée, critères qualitatifs d'évaluation* de l'état global ou de l'occurrence d'un événement, et *règles d'interactions* entre objets ou avec l'environnement. C'est une description qualitative du comportement du système qui semble adaptée au raisonnement de l'opérateur de conduite.

Un modèle décrivant les **fonctions génériques** fait abstraction des objets physiques et décrit spécifiquement les grandes fonctions du système, c'est-à-dire une "boucle de régulation", un "circuit de refroidissement", etc. La prise en compte de ces fonctions et de leurs interactions constitue un modèle de comportement basé sur l'expression des propriétés physiques des composants (électriques, chimiques et mécaniques). Comme pour le niveau structuro-fonctionnel, nous distinguons deux descriptions.

La première description met en jeu les variables physiques et des lois de comportement, la seconde décrit les fonctions élémentaires (génériques) et leurs interactions. Un modèle utilisant le premier type de description est issu de l'analyse technique, d'une modélisation numérique. Il représente, pour l'ingénieur, une description des phénomènes physico-chimiques impliqués.

Un modèle utilisant le second type de description est issu d'une analyse fonctionnelle fine, dont un intérêt est de décrire les moyens de rendre compte du niveau de réalisation de chacune des fonctions impliquées. C'est typiquement le point de vue de l'automaticien (une boucle de régulation peut être représentée au moyen de schémas blocs). Pour l'opérateur de conduite, ce modèle décrit les critères de performance fonction par fonction.

Un modèle décrivant les **fonctions abstraites** décrit le fonctionnement souhaité du système sous forme de processus de transformation de matière, d'énergie ou d'information. Il permet, pour l'ingénieur, de décrire les choix techniques sous forme de fonctions dont le système est (ou sera) doté, et de déterminer les critères de performance relatifs à chaque fonction. Pour l'opérateur, ce niveau indique les critères généraux de performance.

Un dernier modèle permet de décrire les **objectifs** du système de production. Il correspond pour l'ingénieur aux caractéristiques du produit attendu, qui se traduisent en termes de spécifications quantitatives et qualitatives de production, ainsi qu'en termes de spécifications de sûreté. L'analyse fonctionnelle de besoins permet de définir et d'organiser les fonctions qu'il faudra intégrer au futur système. Pour l'opérateur, ce niveau peut correspondre à la description des objectifs de production

traduites sous une forme plus opérationnelle : cadence de production, délais, impératifs opératoires (consignes).

Est présentée, dans les tableaux A.I.1 et A.I.2, une interprétation issue de deux articles de Rasmussen : [RASMU 79] et [RASMU 84]. Nous avons fait en sorte de distinguer les connaissances utiles en étude, conception et maintenance (contexte faiblement contraint par le temps) des connaissances utiles en conduite (contexte fortement contraint).

L'opérateur utilise ses modèles d'abstraction pour raisonner sur le processus : il explore de façon ascendante ses niveaux d'abstraction afin de répondre au pourquoi (ou raisonnement *montant* qui permet d'expliquer pourquoi la fonction n'est plus correctement remplie, en partant d'observations du monde physique). Une fois le diagnostic effectué, l'opérateur effectue alors une exploration descendante des niveaux, ce qui lui permet de répondre au comment (raisonnement *descendant* permettant d'expliquer comment la fonction peut être correctement remplie, c'est-à-dire en quels termes une décision de correction peut se traduire au niveau des composants).

<i>Niveau d'abstraction</i>	<i>Descriptif du niveau</i>	<i>Modèles d'étude, de conception, de maintenance</i>	<i>Descriptions utiles en conduite</i>
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Définition des objectifs et performances recherchées. • Spécification des propriétés fonctionnelles du système et contraintes environnementales (liens entre variables ou états et événements extérieurs, ses bornes, les contraintes externes et effets) • Spécification des bornes du système. • Description du fonctionnement désiré et les plages de variation acceptables des principales variables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Partie opérative : spécifications fonctionnelles et techniques ; contraintes de production, de performance, et contraintes portant sur les énergies nécessaires et les matières d'entrée et sous-produits rejetés ; contraintes relatives aux spécifications du produit à réaliser, contraintes de sûreté. • Partie commande : Objectifs du système de contrôle-commande, consignes, tables de décision. 	<ul style="list-style-type: none"> • Objectifs et consignes de production. • Valeur requise des variables et paramètres du système. • Consignes opératoires liées à des critères de qualité du produit attendu et de sûreté de fonctionnement.
Fonctions abstraites	<ul style="list-style-type: none"> • Définition du comportement souhaité. • Traduction des fonctions du système en choix techniques. • Description des critères de performance du système, relatifs aux choix techniques (les moyens de juger des performances du système). • Relations symboliques entre variables. • Description des flux de matière, énergie et information entrant en jeu dans le processus. 	<ul style="list-style-type: none"> • Partie opérative : transactions de matière et d'énergie vues, par exemple, sous l'angle de schémas de transformation du type boîte noire, de graphes de causalité faisant intervenir des flux de matière et d'énergie. Lois de conservation de matière et d'énergie. Constantes de transformation physique. • Partie commande : Réseau de flux d'information ; opérations utilisant la logique booléenne (tables de vérité). 	<ul style="list-style-type: none"> • Description qualitative des transformations. • Relations de cause à effet entre variables pertinentes. • Entrées et sorties principales. • Fonctions principales. • Critères globaux de performance.
Fonctions génériques	<ul style="list-style-type: none"> • Principes sur lesquels sont fondées les transformations ; fonctions génériques. • Description des connaissances liées à la dynamique des phénomènes mis en jeu, au travers des variables et de leurs interactions, des fonctions et des événements qui déterminent le niveau de performance atteint. <hr/> <ul style="list-style-type: none"> • Description de fonctions standard, indépendamment de leur implémentation physique. • Les fonctions sont exprimées en termes de transformations chimiques, électriques, ou mécaniques ; les propriétés respectives de ces fonctions, sont exprimées sous forme d'interactions. 	<ul style="list-style-type: none"> • Partie opérative + (Modèles variables/relations) : règles, lois ou propriétés générales du domaine liant les variables entre elles. Ces modèles caractérisent les <i>propriétés physiques, chimiques, électriques du système</i>, et font appel à des tables physico-chimiques, des lois physiques générales (ontologies : Bernouilli, Newton, Ohm, etc.) ou encore des relations empiriques. • Partie commande : modèles d'automatique : schémas blocs (ces schémas décrivent des objets auxquels on attribue une fonction, des propriétés et des capacités à interagir). • Les modèles variables/relations résultent d'une analyse technique ou d'une modélisation mathématique. <hr/> <ul style="list-style-type: none"> • Modèle fonctions/propriétés : les fonctions sont considérées comme objets du modèle, et ont la propriété d'interagir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Courbes d'étalonnage des appareils. • Plage de fonctionnement nominal des variables principales. • Événements caractéristiques du procédé. • Règles permettant de caractériser les états normaux et dégradés du système. • Fonctions mises en jeu dans le processus et moyens de déterminer si elles s'effectuent normalement. • Critères de performance, fonction par fonction.

Tableau A.I.1 : Niveaux d'abstraction des connaissances.

<u>Niveau d'abstraction</u>	<u>Descriptif du niveau)</u>	<u>Modèles d'étude, de conception, de maintenance</u>	<u>Modèles utiles en conduite</u>
Structure-fonction	<ul style="list-style-type: none"> • Description des connaissances liées à la dynamique des phénomènes. • Description des variables qui caractérisent les états fonctionnels des composants (propriétés physiques). • Modélisation des comportements du système sous forme de transitions d'états dynamiques. <ul style="list-style-type: none"> • Organisation des appareils assurant les fonctions spécifiées • Description des propriétés fonctionnelles des appareils, représentées par des corrélations en temps et espace des changements survenant dans l'environnement (interactions objet/objet ou objet/environnement). 	<ul style="list-style-type: none"> • Partie opérative : modèles décrivant les variables du système et les lois qui régissent leurs interactions (règles de calcul, équations différentielles ou courbes de réponse) • Caractéristiques physiques des appareils. <ul style="list-style-type: none"> • Partie commande : variables mesurées, plages de fonctionnement autorisées ; règles de production et graphes d'événements. <ul style="list-style-type: none"> • Partie opérative : Description des propriétés des composants au travers de modèles de comportement (arbres de conséquences, arbres des causes) <ul style="list-style-type: none"> • Partie commande : Grafcet, Réseaux de Pétri. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle variables / relations : représentation quantitative de l'état du système au travers de variables se référant à des objets. Un tel modèle décrit un réseau de relations d'influence qualitatives entre variables. • Plage de variation des variables mesurables. • Caractéristiques des appareils pertinents pour la conduite. <ul style="list-style-type: none"> • Structure Objets / propriétés : représentation du système par des variables qualitatives globales - état du système, événements, et actions associées (corrections, ajustements). • Ces modèles sont constitués par des règles empiriques, des associations issues de l'expérience (elles constituent ainsi le niveau privilégié du raisonnement causal en langage naturel). • Plans d'organisation des objets du système pour l'action (appareils clés, commandes, mesures). • Organisation de la partie opérative et propriétés des composants clés.
Anatomie	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des objets selon des critères physiques directement observables : forme, dimension, relations entre objets, identification de familles d'objets (vanne, jonction, cuve,etc.). • Agencement spatial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Plans d'installation (schémas Flowsheet), noms et codes employés, situation géographique, etc. • Famille d'appareils, taxinomie d'objets génériques ainsi que de leur mission associée. (la vanne a pour mission le réglage d'un débit, la jonction de faire transiter un fluide, la cuve de stocker de la matière). • Photos, localisation des équipements. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perception visuelle, tactile et auditive de l'installation. • Noms, labels et localisation des appareils.

Tableau A.I.2 : Niveaux d'abstraction des connaissances (suite).

Les propriétés de cette classification sont les suivantes :

- chaque modèle représente un point de vue du même système,
- chaque modèle (ou strate) contient son propre ensemble de termes, de concepts et de principes (autrement dit, chaque modèle représente une classe spécifique de contraintes),
- l'opérateur choisit le modèle qui lui convient pour appréhender le processus; ce niveau est fonction de son domaine de compétences et de ses objectifs,
- les exigences de fonctionnement, définies à un niveau d'abstraction quelconque, se traduisent sous forme de contraintes de réalisation aux niveaux inférieurs ; à l'inverse, l'évolution de l'état du système est déterminée par l'effet des niveaux inférieurs sur les niveaux supérieurs,

- l'organisation en degrés d'abstraction permet d'améliorer la compréhension du système : le parcours ascendant des modèles d'abstraction permet de mieux appréhender les objectifs assignés au système, alors qu'un cheminement descendant permet de comprendre comment ces objectifs peuvent être atteints.

A.I.2 MODÈLES DE RAISONNEMENT

Les modèles de raisonnement caractérisent les traitements effectués par l'opérateur pour résoudre une situation. Deux modèles sont décrits ici : le modèle proposé par Rasmussen (1983), qui constitue, à ce jour, le modèle de référence pour ergonomes, psychologues et automaticiens ; et le modèle proposé par Rouse (1983), moins connu mais qui présente quelques similitudes intéressantes.

A.I.2.1 Le modèle SRK de Rasmussen

Rasmussen introduit l'hypothèse selon laquelle l'opérateur adopte des comportements qui dépendent de trois situations-types : familiale, répertoriée et inconnue. Les situations familiales correspondent pour l'opérateur à des comportements de routine, les situations répertoriées caractérisent des comportements fondés sur des règles, et les situations inconnues à des comportements typiques de résolution de problème, encore appelés comportements basés sur les connaissances.

Le comportement routinier (Skill-Based Behavior ou SBB) correspond aux actions réalisées de manière réflexe, de façon non consciente, automatique.

Le comportement basé sur des règles (Rule-Based Behavior ou RBB) caractérise quant à lui une situation connue, pas nécessairement familiale mais répertoriée par les concepteurs de l'installation comme situation prototype, et pour laquelle des procédures ont été mémorisées.

Enfin, le comportement basé sur les connaissances (Knowledge Based Behavior ou KBB) traduit un comportement de résolution de problème fondé sur les connaissances du système surveillé. Il est activé lorsque le sujet est face à une situation nouvelle, c'est-à-dire non familiale et non anticipée, pour laquelle il ne possède ni savoir-faire ni règles déjà construites. La situation demande alors l'élaboration d'un plan d'action, en fonction des buts poursuivis. Cette élaboration nécessite le recours à un modèle mental (une représentation) du système contrôlé, qui permet notamment une estimation des effets du plan élaboré, et donc son évaluation [RASMU 83] [FALZON 89]⁴.

La figure A.I.1 reproduit le processus de résolution proposé par Rasmussen, dans lequel l'activité de décision est considérée comme un traitement séquentiel d'informations [RASMU 84]. L'auteur distingue un chemin "montant" (observation, identification, interprétation et évaluation des priorités) et un chemin descendant (choix de l'état cible, formulation d'un plan d'action et exécution).

Ce modèle décrit l'ensemble des chemins cognitifs possibles qui conduisent à des actions sur le procédé. Les comportements basés sur des stéréotypes sont décrits par des passages directs entre observation et sélection des tâches à effectuer. Pour les comportements basés sur des règles, il y a sélection des procédures à mettre en œuvre puis identification des tâches à appliquer. Le comportement basé sur des connaissances requiert l'évaluation de la situation en considérant des critères de performance, par exemple, et la définition d'une stratégie opératoire. Ce schéma indique

⁴P. Falzon, Assister l'activité, AVIGNON 1989, vol. n°1, pp. 383-391.

qu'il n'y a pas de distinction nette entre classes de comportements. En réalité, plus le chemin observation - action comporte d'étapes, plus il aura tendance à être associé à un comportement basé sur les connaissances.

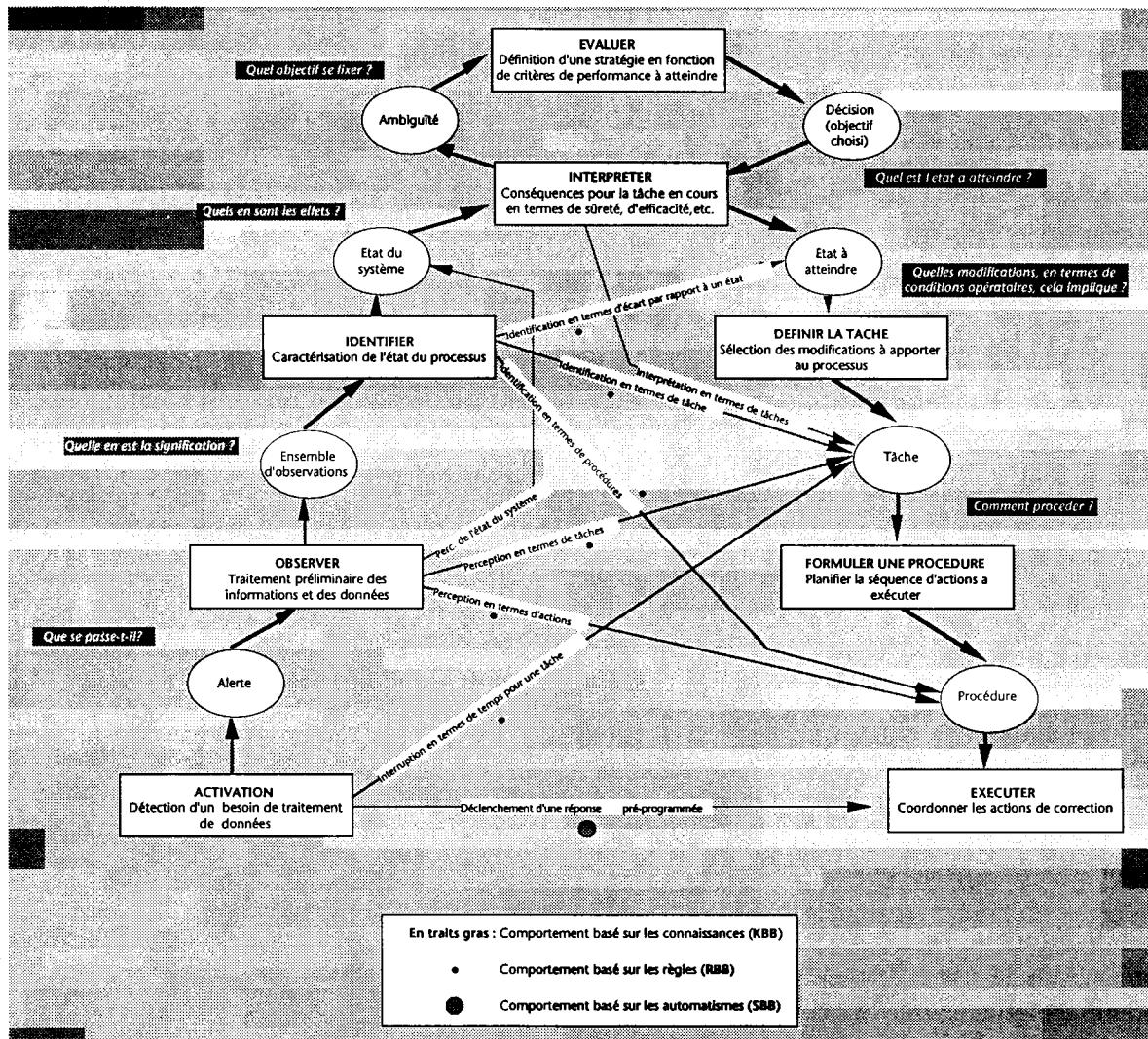


Figure A.I.1 : Le processus de raisonnement proposé par Rasmussen.

Le comportement basé sur les connaissances et les modèles d'abstraction sont en fait interdépendants. En effet, le système décisionnel (décision programmée pour le SNCC et décision "vraie" pour l'opérateur) a pour tâche de s'assurer, par des actions appropriées sur l'installation, que l'état du système est en accord avec l'objectif spécifié. Il est possible d'associer intuitivement un degré d'importance des fonctions qui figurent dans la hiérarchie de modèles d'abstraction, sachant que plus la fonction est "abstraite", plus une défaillance à son niveau peut remettre en cause l'objectif global du système. Ainsi, dès qu'un défaut est décelé, il s'agit de déterminer le degré de priorité de la situation en se référant au niveau d'abstraction qui voit un de ses éléments perturbé. On attribue, en général, le degré de priorité le plus fort au niveau d'abstraction le plus élevé. L'opérateur doit ensuite effectuer un balayage du type "top-down" en trois temps. En premier lieu, il y a évaluation des conséquences du défaut en regard de l'objectif et de la sécurité, de façon à déterminer si un état de repli doit être envisagé. En second lieu, l'opérateur évalue de la possibilité de reconfigurer l'installation en faisant appel à des fonctions et ressources de secours (disponibilité et capacité de traitement). Enfin, la cause matérielle du défaut est recherchée. L'ordre de ces opérations dépend évidemment de l'urgence.

En situation de résolution de problème, l'opérateur explore de façon ascendante ses niveaux d'abstraction afin de répondre à la question du "Pourquoi" (ou raisonnement "bottom-up" qui permet d'expliquer pourquoi la fonction n'est plus correctement remplie, en partant d'observations du monde physique) ; ayant déterminé la source de la perturbation, l'opérateur effectue alors une exploration descendante des niveaux, ce qui lui permet de répondre au "Comment" (raisonnement "top-down" permettant d'expliquer comment la fonction peut être correctement remplie, c'est-à-dire en quels termes une décision de correction peut se traduire au niveau des composants).

Pour évaluer la situation, l'opérateur a besoin d'informations du niveau considéré (structure fonctionnelle et état du processus), en même temps que d'informations du niveau supérieur (utilité de la fonction considérée) et du niveau inférieur (comment appliquer la décision).

A.I.2.2 Modèle de Rouse

Le modèle proposé par Rouse distingue trois niveaux généraux de résolution de problème : 1) **reconnaissance et classification** (identification du problème), 2) **planification** (processus à partir duquel la démarche de résolution de problème est élaborée) et 3) **exécution et contrôle** (mise en œuvre de la solution élaborée et vérification de son effet) [ROUSE 83].

Le premier niveau concerne la **reconnaissance et la classification** de la situation. L'auteur indique qu'il existe deux modalités de perception d'un processus, selon le type de problème auquel l'opérateur a à faire face :

- au travers des **caractéristiques d'une situation donnée** : l'opérateur a reconnu une situation par analogie avec des situations déjà vécues, c'est-à-dire grâce à la perception des caractéristiques de surface de cette situation.
- au travers de la **structure du système** : la situation est inconnue de l'opérateur et il est contraint d'effectuer une **analyse du problème**, c'est-à-dire rechercher la cause de dysfonctionnement en menant un raisonnement basé sur ses connaissances générales du processus (une forme de connaissances générales est l'organisation physique de l'installation, par exemple).

La **planification** traduit le processus à partir duquel la démarche de résolution de problème est élaborée. Dans le cas des situations familiaires, l'opérateur décide des tâches, du script et des procédures à mettre en œuvre (réponse orientée état).

Si la situation n'a pas de précédent, l'opérateur doit se servir des informations structurelles (schémas de flux) afin d'envisager des alternatives, prévoir et évaluer les conséquences (réponse orientée structure).

Enfin, l'étape d'**exécution et contrôle** voit l'application de deux types de règles, selon que la situation est familiale ou non. Elles sont appelées **règles symptomatiques** (S-règles), dans le cas de situations familiaires, et des **règles topographiques** (T-règles) dans les autres cas, c'est-à-dire quand il s'agit d'effectuer une recherche des causes de dysfonctionnement par étapes en raisonnant sur la structure du processus (à noter que Rasmussen faisait déjà état de ces deux modes de raisonnement en 1978 [RASMU 78]).

En situation familiale, les S-règles élaborées permettent le passage direct de la reconnaissance à la formulation d'actions. L'opérateur met en œuvre la solution élaborée et en vérifie les effets. Dans les autres cas, il met en œuvre les T-règles pour rechercher les causes d'un dysfonctionnement.

Face à un problème, l'attitude d'un sujet ne se réduit pas à parcourir les trois niveaux de façon purement montante (bottom-up) ou descendante (top-down) ; l'opérateur navigue, en fait, à tous les niveaux à la fois (ou presque).

Le modèle précédemment décrit tient compte de ce constat, si l'on considère que les trois décisions peuvent être, à tout moment, réévaluées : selon le modèle, l'opérateur pourrait, par exemple, mettre en œuvre des règles faisant appel à la structure du système (ou T-règles) et soudain abandonner cette voie de recherche car la situation vient d'être reconnue (les S-règles sont alors applicables).

Des conflits peuvent survenir si les trois décisions sont constamment réévaluées ; il s'agit alors de définir un ordre de précédence : cette situation laisse une place importante à la subjectivité de l'opérateur, qui peut choisir de décider si la solution est familière, ou bien décider d'une alternative qui maintienne l'orientation de résolution déjà choisie.

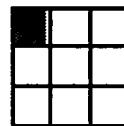
ANNEXE II : Aspects fonctionnels, organiques et opérationnels concernant le PEV

Dans le cadre du projet DIAGPEV, un recueil de connaissances concernant le Prototype Evolutif de Vitrification (P.E.V.) a été effectué. Il s'agissait de répertorier les diverses informations susceptibles d'intéresser le projet. Est décrite ici une partie des informations collectées avant leur mise au format SAGACE. Nous avons conservé le découpage d'un système selon les neuf points de vue de la méthode afin de mieux faire percevoir ce que peut être le contenu de chacun des neuf points de vue, qui sont, tout compte fait, assez bien différenciés. Seront successivement passés en revue les trois points de vue de la "vision fonctionnelle", de la "vision organique", puis de la "vision opérationnelle". La majeure partie de ce travail de recueil a été réalisée en participant au travail d'équipes postées d'exploitation, et sur la base d'entretiens avec l'ingénieur procédé, un chef de quart et un opérateur.

II.1. VISION FONCTIONNELLE

La vision fonctionnelle, selon SAGACE, permet de répertorier les connaissances concernant le procédé, les phases de fonctionnement et les états de fonctionnement de l'installation PEV.

II.1.1 Le procédé



Le procédé de confinement des déchets de haute activité (c'est-à-dire les produits de fission, ou Pf) issus du retraitement du combustible utilisé dans les réacteurs à eau pressurisée, consiste à enfermer ces déchets à l'intérieur d'une matrice de verre. Cette forme de piégeage est, en effet, considérée comme la plus sûre, et elle permet de réduire sensiblement le volume de déchets à stocker.

Les services demandés sont essentiellement : préparer les déchets à la calcination et les vitrifier, tout en garantissant l'absence d'éléments nocifs (acides et radioéléments) dans l'environnement.

Préparer les déchets

Ce service revient à mettre les déchets, qui se trouvent initialement en solution ou en suspension dans une solution aqueuse, sous une forme adaptée à leur vitrification. Dans la pratique, on calcine la solution de manière à obtenir une poudre, qui sera ensuite mis en présence de verre en fusion.

Vitrifier

Il s'agit de mettre en contact les déchets à l'intérieur d'une matrice de verre en fusion. C'est la partie du procédé qui pose le plus de problèmes technologiques ; la fusion du verre impose des moyens de chauffe particuliers, ainsi que des matériaux dimensionnés pour résister aux températures élevées. Par ailleurs, la qualité du verre qui sortira est, pour une part importante, dépendante des paramètres de

fonctionnement choisis, du dimensionnement et de la conformation du pot de fusion.

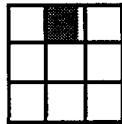
Garantir l'absence de rejet nocif

L'absence de rejet est une contrainte forte imposée aux exploitants. Il s'agit de mettre en œuvre les moyens permettant de garantir que les déchets ne puissent s'échapper sous forme de gaz (rejets atmosphériques), ou de rejets liquides. Il s'avère donc nécessaire d'adoindre une unité chargée de traiter les gaz produits et d'éliminer les déchets des rejets liquides ; les recyclages permettent de récupérer les éléments et de les réintroduire en amont du processus.

La solution de Pf étant fortement acide, il est également nécessaire de traiter les gaz de façon à piéger ces acides dans la phase aqueuse, qu'il faudra ultérieurement traiter.

Enfin, malgré toutes les étapes de traitement, il est possible que certains déchets ne soient pas piégés. Pour parer ce risque, des filtres sont mis en place en fin de chaîne.

II.1.2 Les activités



Le fonctionnement du PEV est décrit par un séquencement de phases de fonctionnement enchaînées dans le temps telles que : démarrer, élaborer et arrêter.

Démarrer

Le démarrage fait passer l'installation par une succession de d'activités qui conduisent au régime de fonctionnement souhaité :

- mise en état du système de contrôle,
- mise en service de la chauffe du four de fusion,
- mise en service du circuit de traitement des gaz,
- Remplissage des cuves d'alimentation et de la trémie 1,
- initialisation des volumes, débits et paramètres de fonctionnement,
- mise en chauffe du four de fusion,
- vérification de l'automatisme de secours rotation calcinateur,
- mise en marche des alimentations,
- test de passage à l'eau.

Une fois le préchauffage effectué, l'installation est ensuite progressivement amenée au régime nominal. Ce programme de montée en régime peut subir des modifications en fonction des essais.

Elaborer

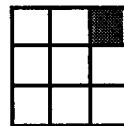
L'activité "élaborer" consiste à alimenter le pot de fusion en Pf et en fritte de verre, en énergie, de manière à inclure les éléments de Pf dans la matrice de verre. Le pot de fusion est considéré ici comme un stockeur de matière.

Cette phase de fonctionnement voit alternativement des activités d'alimentation en Pf et fritte de verre, puis de coulée du verre élaboré.

Arrêter

Une fois la campagne terminée, les alimentations sont arrêtées et le passage en eau automatiquement établi. Un programme de refroidissement est alors mis en œuvre : le tube de calcination est refroidi progressivement en adaptant le débit d'eau.

II.1.3 Les modes de comportement



Ce point de vue répertorie les modes de comportement, qui sont liés à des états fonctionnels jugés suffisamment stables. On distinguera donc des modes de comportement tels que : nominal, d'attente, de repli critique, ou encore d'arrêt. Ils correspondent chacun à un ensemble de flux de matière et d'énergie en entrée et en sortie spécifiques.

Mode nominal

Le mode nominal correspond à l'alimentation en Pf, fritte, adjuvant, et en énergie, c'est-à-dire que l'ensemble des alimentations est activé et que du verre s'élabore.

Mode d'attente

Cet état caractérise la mise en attente du processus : l'alimentation en (Pf+adjuvant+fritte) est remplacée par une alimentation en eau, tout en maintenant les entrées telles que la chauffe des calcinateur et four de fusion.

On ne fait ici aucune hypothèse sur les conditions qui amènent à ce mode ; il peut être activé quand le verre ne remplit pas l'ensemble des critères de qualité, c'est-à-dire par l'opérateur, ou bien automatiquement sur détection d'un défaut de dilatation sur le calcinateur.

Mode de repli critique

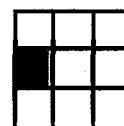
Ce mode caractérise un défaut de rotation du tube de calcination : il y a arrêt des alimentations sans passage en alimentation en eau. Cette mesure est prise pour éviter une déformation irréversible du tube.

Mode d'arrêt

Ce mode caractérise le processus PEV quand il n'y a plus d'entrée et de sortie de matière et d'énergie.

II.2. VISION ORGANIQUE

II.2.1 L'installation



La vitrification est un procédé en deux étapes qui comprend la calcination de la solution et la fusion

du verre. Ces deux opérations sont réalisées par l'intermédiaire d'une installation qui comporte essentiellement :

- un calcinateur rotatif alimenté en continu par la solution à traiter qui effectue l'évaporation, le séchage et la calcination partielle du résidu sec,
- un four de fusion qui fond le mélange calciné et verre primaire pour produire le verre de formule choisie; celui-ci est coulé à intervalles réguliers dans un conteneur métallique.

Un appareillage de traitement des gaz est associé à cet équipement. Il comprend un système de dépoussiérage qui permet de recycler dans le calcinateur la majeure partie des poussières entraînées et un ensemble de dispositifs pour la condensation, la recombinaison des vapeurs nitreuses, le lavage final des gaz et leur filtration.

Alimentations

Alimentation en Pf simulés

A partir de la cuve d'alimentation agitée mécaniquement, la solution est acheminée vers le calcinateur par :

- un air-lift à double étage,
- une roue doseuse,
- un ensemble garde hydraulique-confluent.

La solution de Pf simulés est d'abord relevée par un air-lift sous vide, elle redescend dans un pot à niveau constant d'où elle est reprise par un air-lift à submergence naturelle, pour alimenter la roue doseuse. Le trop plein de cette roue doseuse se déverse dans la cuve.

Le débit d'alimentation est réglé sur la roue doseuse. Il correspond au régime nominal et la solution est ensuite introduite dans le calcinateur par l'intermédiaire d'une garde hydraulique et du confluent. La garde hydraulique reçoit en plus la solution de recyclage du dépoussiéreur et c'est le confluent qui reçoit l'adjvant de calcination. Des alimentations en eau sont prévues sur la garde hydraulique et sur le confluent. La première est utilisée pour le rinçage, la seconde pour le maintien en alimentation du calcinateur en cas d'incident ou pendant la phase d'arrêt de l'installation. L'envoi d'eau vers le confluent se fait au débit de la roue doseuse par l'utilisation d'une vanne suiveuse.

La cuve Pf est brassée mécaniquement afin de garantir une alimentation à composition constante, mais aucun contrôle de la solution n'est effectué en ligne (vérification éventuelle par prise d'échantillon).

Depuis peu, le relevage primaire par air-lift sous vide est remplacé par une pompe, en raison d'un problème de désamorçage de l'air-lift dès que le volume de solution dans la cuve atteint le seuil minimal. L'usage de la pompe permet ainsi d'éviter qu'il reste systématiquement un certain volume de solution de Pf simulés inutilisés en fin de campagne. Cet air-lift reste tout de même opérationnel, c'est pourquoi il peut être considéré :

- soit comme alternative laissée aux exploitants en phase de conception d'essai,
- soit comme un système auxiliaire .

Alimentation en adjuvant

L'envoi de solution d'adjvant de calcination se fait à l'aide d'une pompe doseuse via une garde hydraulique. Son brassage est assuré par circulation via une pompe, et une pompe doseuse alimente à faible débit le calcinateur.

Alimentations en nitrate d'aluminium et en fines

Ces unités ne sont plus utilisées sur le PEV car les deux réactifs sont directement ajoutés à la solution de Pf simulés. Mais elles peuvent toujours être sollicitées, le cas échéant.

Alimentation en eau

L'alimentation en eau est employée en remplacement des alimentations en solution Pf, adjuvant et recyclage. Elle est assurée par un système d'alimentation externe au PEV.

Alimentation en fritte de verre

La fritte de verre est distribuée à l'aide d'un équipement qui comprend :

- une trémie de stockage et un tapis de chargement,
- une trémie d'alimentation contrôlée par pesage,
- une alimentation par godet taré basculant,
- un sas d'étanchéité comprenant plusieurs vannes à passage direct et des soupapes.

La fritte de verre est chargée manuellement sur la trémie de stockage, ou trémie 1, de manière périodique.

Unité de calcination

Elle comprend principalement :

- le tube de calcination et son système d'entraînement,
- l'embout supérieur du calcinateur,
- l'embout inférieur,
- le four de calcination.

Le tube de calcination est en acier forgé. Il repose incliné sur des galets et est entraîné par l'intermédiaire d'une couronne dentée située à son extrémité supérieure. Le mouvement de rotation est transmis à cette couronne par un pignon à partir d'un moteur électrique. Ce moteur est doublé, en cas de défaillance, par un second moteur électrique (reprise secours de rotation tube).

Une barre folle et une grille situées à l'intérieur du tube permettent l'obtention d'un calcinat de granulométrie déterminée. Le calcinat sort au niveau de l'embout inférieur. Il tombe ensuite par gravité avec la fritte de verre dans le pot de fusion.

L'embout supérieur permet d'assurer l'étanchéité du tube et d'absorber son déplacement du fait de la dilatation.

C'est au niveau de l'embout supérieur que se situent le départ vers l'unité de traitement des gaz et l'entrée de l'alimentation en solution. L'embout inférieur est relié au pot de fusion par une buse cylindrique verticale et mobile qui repose sur la collerette supérieure du pot. Ce dispositif permet d'accepter les déplacements qui résultent de la dilatation du pot et de réaliser une liaison étanche et démontable avec le pot par l'intermédiaire d'un joint de verre, fusible à basse température.

Le four de calcination comporte plusieurs zones de chauffe indépendantes formées chacune de deux demi-coquilles. Les premières zones sont destinées à l'évaporation et au séchage de la solution, et les autres zones sont dédiées à sa calcination.

Les manchettes inférieure et supérieure du calcinateur sont balayées par un flux d'air qui est mélangé

au gaz procédé. Cela permet d'assurer l'étanchéité du calcinateur.

Unité de vitrification

Cette unité comprend :

- le pot de fusion,
- le four de fusion,
- l'appareillage électrique de chauffage,
- le refroidissement des inducteurs.

Le four de fusion est constitué par :

- un empilement d'inducteurs bétonnés qui reposent sur une dalle de béton; cette dernière supporte également le pot de fusion et comprend les deux inducteurs de coulée,
- une assiette de maintien,
- un moufle qui joue le rôle d'écran thermique entre le pot de fusion et les inducteurs.

Les inducteurs sont constitués par du tube de cuivre refroidi par eau et noyé dans le béton.

La conception du four est à dalle amovible, le four et ses connexions restant fixes. Après descente de la dalle qui supporte le pot, on réalise une translation qui permet le remplacement de ce dernier.

De nombreux thermocouples, internes et externes, permettent d'effectuer le suivi de la vitrification.

Un jeu de cannes de brassage, plongeant dans le pot de fusion, permet d'obtenir un verre homogène.

Unité de traitement des gaz

Les unités qui assurent le traitement des gaz sont :

- unité de dépoussiérage, qui est chargée de piéger et recycler les poussières,
- unité de condensation, qui élimine l'eau des gaz issus du dépoussiérage,
- unité de recombinaison, qui piège les vapeurs nitreuses,
- unité de lavage, qui assure un lavage de sécurité.

Unité de dépoussiérage

La colonne de dépoussiérage se compose :

- d'une colonne à chicanes à contre-courant,
- d'un corps inférieur avec double enveloppe chauffée à la vapeur, destiné à la rétention du liquide chargé à partir duquel se fait l'arrosage des plateaux et le recyclage en amont du calcinateur,
- d'une zone intermédiaire comportant la tuyauterie d'entrée des gaz et les différents piquages nécessaires au contrôle de l'appareil.

Elle a récemment été modifiée. On distingue à présent : un corps de colonne, un pied de colonne et un bouilleur. Le brassage dans le pied de colonne est assuré par thermosiphon.

La solution contenue dans le pied de colonne est recyclée dans le calcinateur afin de ramener les poussières entraînées. Cette solution est débitée au moyen d'une roue doseuse. Ce débit est déterminé par rapport au débit d'air de propulsion de l'air-lift (déterminé par étalonnage).

Unité de condensation

Cette unité est chargée de condenser la vapeur issue de l'évaporation des solutions de Pf simulés, d'adjuvant et de recyclage.

Elle est constituée d'une colonne à chicanes et à double enveloppe pour le refroidissement des gaz. Un échangeur thermique permet de refroidir les condensats avant d'être renvoyés en tête de colonne.

Les condensats sont recueillis dans une cuve, qui est ensuite évacué dès que le niveau maximal de la cuve est atteint.

Unité de recombinaison

La colonne de recombinaison est une colonne à plateaux arrosée par de l'eau et par un recyclage de l'effluent de recombinaison, qui s'évacue par trop-plein à partir de la cuve de recette. L'arrosage de la colonne se fait à l'aide d'une pompe.

Unité de lavage

La colonne de lavage reçoit les gaz provenant de l'éjecteur à air et de l'unité de recombinaison. Elle est constituée de plateaux perforés, arrosés par de l'eau et par l'effluent de lavage (recyclage par air-lift). Cette solution est recueillie dans une cuve de recette, d'où elle s'écoule par trop-plein vers l'égout suspect.

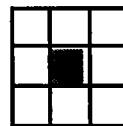
Unité de filtration

Un ensemble de filtres servent à faire barrière aux dernières poussières pouvant encore être contenues dans les gaz traités.

Unité de dépression de l'installation

La pompe à anneau liquide assure l'extraction finale des gaz. Elle est régulée en fonction de la pression mesurée à la sortie de la colonne de lavage.

II.2.2 Les dispositifs logistiques



Les dispositifs logistiques sont les appareils qui assurent le déroulement du programme de fonctionnement. Ce sont donc les automates, les régulateurs et le TDC. Quelques exemples sont proposés ci-dessous.

Sur l'alimentation en fritte

L'alimentation en fritte est commandée par un automate : la masse du godet de fritte est fixe et la fréquence de basculement est réglée au débit désiré avant essai sur l'automate ; une période sur 8 peut être modifiée par le système de contrôle et de commande (en l'occurrence le TDC 2000 d'HONEYWELL) pour corriger le débit réel selon la valeur désirée. Ce débit est de plus susceptible d'être ajusté par l'opérateur en cas de prises d'échantillon du calcinat, puisque dans ce cas, l'arrivée de fritte est temporairement coupée ; cette action n'est jamais effectuée en situation de production normale.

Sur l'alimentation en eau

Le passage en eau est commandé par le TDC. Il s'agit de stopper les différentes alimentations et d'activer l'alimentation en eau. Le débit d'alimentation en eau est réglé avant essai (il doit être équivalent au débit total des solutions d'alimentation) ; la commande de la vanne d'alimentation en eau est de type tout ou rien.

Au niveau du calcinateur

La régulation des températures du four de calcination s'effectue au moyen de régulateurs indépendants.

Sur le pot de fusion

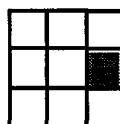
Le pot de fusion est chauffé sur plusieurs zones, chacune étant prise en charge par un régulateur indépendant. La régulation agit sur la tension d'alimentation de chaque inducteur, par scrutation de la température la plus haute de la zone. Pour chacune des zones de chauffe, un comparateur (externe au TDC) sélectionne la température la plus élevée de la zone et la transmet au TDC, qui est chargé de la régulation de la puissance de chauffe.

Sur l'unité de dépoussiérage

La chauffe est commandée manuellement par réglage du débit de vapeur usine. La température dans le pied de colonne varie en fonction du débit d'évaporation choisi.

Une régulation maintient un niveau constant dans le pied de colonne par commande tout ou rien de la vanne d'appoint d'eau.

II.2.3 Les configurations



Une configuration caractérise un ensemble d'appareils actifs. Cela permet de tenir compte des appareils auxiliaires. Le PEV comporte peu d'appareils de secours, étant entendu que l'on ne s'intéresse qu'aux appareils dont la mise en route ne nécessite pas l'arrêt préalable de l'installation. Pour l'exploitation du PEV, seule la rotation du calcinateur, considérée comme vitale, est secourue.

Configuration d'alimentation sans coulée

Les appareils assurant les alimentations en solutions, en fritte, et en énergie sont actifs. C'est une configuration qui permet de remplir le pot de fusion, donc d'élaborer le verre.

C'est la configuration de marche normale, où toutes les alimentations sont assurées.

Configuration de coulée avec alimentation

Cette configuration correspond à l'activation de la buse de coulée et au maintien des alimentations en calcinat de Pf et de fritte dans le pot de fusion.

L'opération de coulée du verre est suffisamment longue pour pouvoir considérer une configuration de

ce type.

Configuration de coulée sans alimentation

Cette configuration correspond à l'activation de la buse de coulée et à l'arrêt des alimentations de calcinat de Pf et de fritte dans le pot de fusion.

Elle peut être effective après affinage du verre.

Configuration d'attente

Cette configuration correspond à la désactivation des alimentations en Pf, adjuvant et fritte, à l'activation de l'alimentation en eau et sans coulée.

Plusieurs conditions peuvent y conduire : la configuration d'attente est considérée comme une position de repli qui permet de protéger le calcinateur en cas de dépassement de seuil de dilatation ; cette configuration permet également de mettre l'installation dans des conditions d'attente, ou d'affinage qui offre la possibilité de laisser au verre en élaboration un délai supplémentaire avant de couler. Il est alors possible d'arrêter les alimentations et de se laisser un délai supplémentaire avant de couler.

La dilatation du tube de calcination est une variable très surveillée. La configuration de repli correspond au remplacement des alimentations en Pf et adjuvant par une alimentation en eau. Celle-ci remplace l'alimentation en solution afin de maintenir la dilatation à sa valeur de consigne. Si la cause de la dilatation est due à un débit liquide insuffisant, le passage en eau constitue la solution la plus indiquée pour maintenir le calcinateur dans les conditions nominales de fonctionnement, et cela permet aux opérateurs de localiser le défaut et d'y remédier.

Configuration de secours

Cette configuration correspond à l'activation du moteur auxiliaire, afin de maintenir la rotation du calcinateur, sur détection d'un problème au niveau du moteur principal.

L'arrêt de la rotation du tube de calcination peut entraîner, à terme, la déformation irréversible du tube. Pour prévenir ce risque, il est prévu dans ce cas, l'arrêt automatique des alimentations et l'interdiction de passer en eau, tant que la rotation du tube n'aura pas repris.

Cette configuration est rendue effective par détection d'un problème de rotation au niveau des galets sur lesquels repose le tube du calcinateur.

Configuration de vidange

La vidange du pot est prise en charge par une seconde buse, appelée buse de vidange. Elle est activée en fin de campagne.

Configuration d'arrêt

Cette configuration correspond à l'arrêt de toutes les alimentations liquide et solide, ainsi qu'à l'arrêt de la chauffe des calcinateur et pot de fusion.

II.3. VISION OPÉRATIONNELLE

Ici est considérée l'activité des opérateurs en fonction des contextes de fonctionnement.

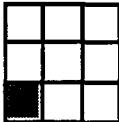
II.3.1 L'équipe de conduite

PEV fonctionne ponctuellement (les essais effectués durent généralement une semaine) ; en dehors de ces campagnes, les équipes de conduite sont chargées de piloter d'autres installations.

Trois équipes composées de 3 agents (un chef de quart, un adjoint et un opérateur) se relaient en 3*8 pour conduire le PEV.

Au sein de l'équipe de conduite, les tâches sont réparties en fonction de la charge de travail des opérateurs, et non en fonction de tâches assignées préalablement (surveillance sur écran de contrôle, surveillance des informations fournies sur l'armoire de contrôle, intervention en local). Chaque opérateur est susceptible d'intervenir sur chaque tâche.

II.3.2 Les performances



Les performances principalement surveillées par les opérateurs sont liées à des critères de qualité du verre à produire : les températures internes du pot de fusion, le débit et la température de coulée.

En ce qui concerne PEV, les tâches de pilotage proprement dites consistent grossièrement à prédire la qualité du verre pendant le remplissage du pot de fusion et à décider, une fois le pot rempli, l'affinage ou la coulée du verre.

Un opérateur effectue une ronde toutes les heures environ pour vérifier ce qui ne peut l'être que localement (circuits d'eau et d'air de refroidissement, niveau de fritte dans la trémie 1, non débordement de la cuve Pf dû à des mousses, etc.).

Les défauts à détection lente n'entraînent pas de passage en position de repli. Ce sont des défauts que l'opérateur doit compenser pour assurer que les quantités de Pf et de fritte désirées sont bien dans la fourchette de tolérance.

Pilotage des alimentations

Alimentation en solution Pf

Surveillance : surveillance des débits horaires et calcul du rapport fritte/Pf (voir paragraphe concernant l'alimentation en fritte).

Maintien des paramètres nominaux : il n'y a pas de réglage particulier à effectuer, sauf éventuellement une correction de compensation si le débit pendant l'heure précédente était trop incorrect.

Le débit d'alimentation est estimé à travers la mesure de vitesse de rotation de la roue doseuse. Cette mesure est vérifiée par la mesure du débit des condensats, au niveau du traitement des gaz.

Pilotage avec des défauts

Il est possible de détecter une dérive de débit des alimentations en Pf par suivi de l'enregistrement de la dilatation du tube, des puissances dissipées par le four de calcination, et des bilans sur la cuve Pf et condensats.

Le cas qui pourrait se produire est le bouchage partiel des godets de la roue doseuse. La détection d'un tel défaut peut mettre une à deux heures, dans le cas d'un bouchage important, ou bien plusieurs jours si la diminution de débit est faible et progressive.

Alimentation en adjuvant

La solution d'adjuvant est préparée manuellement dans une cuve particulière, puis transférée de la cuve de préparation vers la cuve d'alimentation au moyen d'une vanne manuelle. Habituellement, une seule charge suffit mais une campagne peut requérir une seconde charge d'adjuvant, donc l'intervention d'un opérateur en local.

L'opérateur vérifie que les débits horaires d'adjuvant sont dans la fourchette admissible. Deux moyens permettent de le calculer : le débit en sortie de pompe et la pesée de la cuve d'alimentation. L'expérience montre que la pesée fournit des valeurs plus proches de la réalité.

Pilotage avec des défauts

L'absence momentanée d'adjuvant, ou une simple dérive de débit, n'a pas d'incidence sur la qualité du calcinat, donc du verre. Il a un effet notable sur le traitement des gaz, et sur la digestibilité du calcinat (mauvaise calcination), et aucun sur la composition du verre. Dans le cas d'une interruption prolongée de son alimentation (c'est-à-dire plusieurs heures), cela peut conduire à des bouchages.

Alimentation en fritte

Le débit de fritte est contrôlé par bilan massique sur la trémie d'alimentation (respect du rapport fritte/verre).

Le passage effectif de chacune des charges est suivi au moyen de la mesure de la perte de charge dans le conduit menant au calcinateur.

L'opérateur peut avoir un synoptique du fonctionnement du sas à fritte sur TDC, mais cette fonctionnalité est très peu utilisée.

Le TDC informe les opérateurs que la trémie 2 a atteint son seuil minimum et qu'il commande l'alimentation de la trémie 2 via la trémie 1. De même, la fin de son remplissage est signalée.

Par contre, la trémie 1 n'est pas instrumentée ; l'opérateur doit surveiller visuellement son niveau de remplissage pour déterminer le moment où il faudra la remplir. En moyenne, le remplissage s'effectue une fois par poste.

Maintien des paramètres nominaux :

- l'ajustage du débit de fritte intervient quand le rapport fritte/verre n'est plus vérifié. L'opérateur joue alors sur le débit de fritte pour revenir à une valeur satisfaisante. Les écarts observés (par bilan horaire) sont généralement faibles, ils sont corrigés en modifiant le débit de fritte en conséquence, par l'intermédiaire de la masse pesée sur le godet (le nouveau débit est maintenu jusqu'au bilan horaire suivant).

- le TDC effectue une régulation des débits de fritte. Les opérateurs ont d'ailleurs observé que ces corrections n'étaient, la plupart du temps, pas justifiées. Il semblerait donc que le TDC contraine les opérateurs à prendre en compte ses limites de correction, puisqu'ils doivent en corriger les effets : ils ajustent le débit de fritte de telle sorte que le TDC n'ait pas de correction à effectuer (ajustage de la masse du godet de sorte à forcer le TDC à effectuer une correction dans le sens d'une augmentation du temps de cycle uniquement).

Pilotage avec des défauts

Les opérateurs peuvent avoir à effectuer des envois manuels dans le cas d'un blocage du sas d'alimentation en fritte.

Pilotage de la calcination

Les paramètres de la calcination définis pour une campagne sont :

- la vitesse de rotation du tube de calcination,
- les températures des zones de chauffe du four de calcination,
- le débit de recyclage,
- le débit de la solution Pf,
- le débit de l'adjuvant de calcination (concentration fixe).

Les opérateurs ne peuvent avoir d'informations directes sur le calcinat. Cependant, les paramètres opératoires tels que : température des différentes zones du four, rotation des galets et débit d'adjuvant correct, permettent d'effectuer le suivi de la calcination (de même : mesures électriques pour les résistances du four de calcination, dilatation du tube, mesures électriques relatives au moteur d'entraînement du tube et la perte de charge dans le calcinateur).

L'air de balayage est réglé localement dès le démarrage de l'installation. Il n'y a pas de report en salle de contrôle.

La vitesse de rotation du tube est contrôlée au chronomètre environ toutes les semaines.

Pilotage avec des défauts

Le colmatage du tube de calcination est détecté par analyse des variations de puissances sur le four de calcination. Le phénomène est progressif et lent.

Un des paramètres les plus surveillés est la dilatation du tube, qui dépend à la fois des débits d'alimentation et de la chauffe du calcinateur. En régime nominal, la dilatation du tube est pratiquement constante ; c'est un signe de "bon" fonctionnement. Cependant, une variation de cette valeur est le signe d'un défaut (alimentations en solutions ou chauffe du tube). L'opérateur veille également à prévenir l'encrassement de la manchette située entre le calcinateur et le dépoussiéreur. En effet, il peut se produire une amorce de bouchage de la liaison calcinateur-dépoussiéreur, détectée par augmentation de la perte de charge du calcinateur.

Un moyen utilisé par les opérateurs pour enrayer ce phénomène est de provoquer l'engorgement de la solution contenue dans le pied de colonne du dépoussiéreur (en augmentant le débit de vapeur de chauffe) pour provoquer le reflux de solution vers le calcinateur. Cette action a déjà montré son efficacité.

Le moyen le plus courant consiste à rincer la manchette à l'eau, par l'intermédiaire de deux buses

réservées à cet effet. La quantité d'eau injectée est prise en compte dans les calculs de bilans.

Pilotage de la vitrification

Les températures externes et internes du pot de fusion sont des paramètres les plus surveillés (le synoptique du pot apparaît quasi constamment sur l'écran du TDC 2000).

Lorsque la quantité de verre requise pour la coulée est atteinte, et si la température n'est pas suffisante, le verre est affiné (correspond au passage en eau du calcinateur ; alimentations coupées, maintien des consignes de chauffe du pot).

Le suivi du fonctionnement du pot de fusion consiste à vérifier que les températures externes restent comprises dans les fourchettes de régulation, à surveiller l'évolution des températures internes au cours du remplissage. Ces températures sont les principales données qui permettent de juger l'homogénéité du bain de verre en élaboration (un écart de températures internes faible en 4 points du pot indique que le verre en fusion est homogène).

Un opérateur est spécifiquement chargé de s'assurer du bon fonctionnement du four de fusion. Il surveille :

- les températures externes et internes au pot de fusion (sur le TDC : valeurs instantanées ; sur le micro-ordinateur : courbes d'évolution),
- le déphasage courant-tension à chaque changement de plot effectué par les régulateurs (toutes les dix minutes), détecté de façon auditive,
- le brassage du pot de fusion en local (rotamètres),
- les températures et débits d'eau de refroidissement du générateur MF,
- les mesures électriques au niveau des inducteurs et du générateur MF (puissance, intensité, tension, déphasage),

Quelques coulées intempestives ont été, par le passé, recensées. Elles ne portent pas à conséquence car le phénomène est rare et bref. Aucune intervention ni correction n'est ici possible.

Vieillissement du pot de fusion :

La déformation du pot de fusion, due à son vieillissement, impose à l'opérateur une surveillance des températures externes, qui peut l'amener à ajuster la puissance délivrée sur le four (la régulation s'effectue uniquement sur les températures externes). L'ajustage de la puissance est une intervention manuelle sur le jeu de barres et les capacités permettant de modifier les plages de tensions applicables par les régulateurs.

Ajustages :

- réglage de la phase des inducteurs (sur l'armoire de contrôle en salle de conduite),
- modification des barres de tension : la décision est prise par le chef de quart, et la mise en œuvre est réalisée par un électricien.
- pendant l'affinage, l'opérateur peut baisser la tension générale appliquée aux inducteurs de chauffe, ce qui permet de diminuer la chauffe du pot sans dérégler d'autres paramètres.

Panne de certains thermocouples du pot de fusion :

Même si quelques thermocouples tombent en panne, il est possible d'extrapoler les valeurs de température correspondantes d'après l'expérience acquise pendant leur bon fonctionnement (cartographie thermique du pot de fusion, paramètres électriques de conduite). Il faut surtout

connaître :

- les variations de puissance consommée entre deux coulées pour chaque zone de chauffe,
- les points chauds du pot de fusion afin de ne pas les surchauffer en cas de défaillance du thermocouple correspondant.

Dans le cas d'une insuffisance d'informations de recouplement des paramètres manquants, il faudra envisager le changement des thermocouples défaillants, voire le remplacement du pot.

Pilotage de la coulée

La coulée est effectuée périodiquement lorsque les critères suivants sont respectés :

- la quantité de verre nécessaire a été introduite,
- la température moyenne minimale est atteinte.

Avant coulée, un opérateur vérifie qu'un conteneur a été préalablement placé sous le pot de fusion. Le conteneur est pesé en continu et permet le calcul des débits de verre. Cette mesure permet de vérifier les bilans sur les entrées/sorties de matière, afin de contrôler les éventuels phénomènes de rétention dans le calcinateur. La coulée est commandée par mise en service de l'inducteur de coulée (sur l'armoire de contrôle en salle de conduite). Le temps d'amorçage de la coulée correspond au temps entre la mise sous tension de la buse et le début effectif de la coulée.

Pendant la coulée, l'opérateur qui se trouve devant l'écran de contrôle vérifie que le TDC a détecté la mise sous tension de la buse de coulée en vérifiant la remise à zéro des bilans matières. En local, un opérateur effectue la mesure de la température du verre en sortie de pot, et les prises d'échantillon demandées dans le cahier de définition d'essai.

Pilotage du traitement des gaz

La stabilisation du fonctionnement du dépoussiéreur requiert de la part de l'opérateur l'ajustement de la température du pied de colonne (en jouant, en local, sur la pression de vapeur d'eau) afin de garantir un taux d'évaporation suffisant tout en évitant l'engorgement de la colonne (retour de solution vers le calcinateur, donc entraîne certaines perturbations). Auquel cas un ajustage de la chauffe, en local, peut s'avérer nécessaire.

Les bilans d'alimentation en solutions injectées en entrée du calcinateur sont régulièrement calculés par les opérateurs. Plusieurs méthodes permettent de s'assurer des bilans, par exemple : calcul à partir des vitesses de rotation des roues doseuses et calcul à partir des cuves d'alimentation. Le bilan calculé sur la cuve de condensats permet de vérifier les bilans globaux.

Pilotage avec des défauts

Le traitement des gaz est sans doute la partie du procédé la moins surveillée par les opérateurs. Malgré tout, un paramètre permet de qualifier le bon fonctionnement du traitement des gaz : le débit des gaz rejetés, mesuré en continu par le Venturi.

La diagnostic d'une entrée d'air, au niveau du traitement des gaz, est délicat car les informations disponibles (débit venturi, course de la vanne de régulation) sont suffisantes pour détecter une entrée d'air mais ne permettent pas de la localiser précisément.

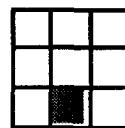
Comptes-rendus d'exploitation

Les divers comptes-rendus émis par les équipes de conduite permettent à l'exploitant de vérifier le

bon déroulement de la campagne. Trois supports sont utilisés :

- le cahier de quart, dans lequel sont recensés les rapports bilans et ainsi que les journaux récapitulatifs quotidiens édités par le TDC,
- les rapports d'exploitation :
 - émis toutes les heures,
 - émis toutes les 8 heures,
 - quotidien à 12h 30, qui répertorie les données concernant le fonctionnement du pot de fusion, du calcinateur et du dépoussiéreur,
- les fiches d'état de l'installation recensent le nombre d'heures de fonctionnement, les interventions et les modifications réalisées par les opérateurs.

II.3.3 La gestion du fonctionnement



Sont répertoriés ici les contextes qui conduisent l'équipe de conduite à adapter le programme de fonctionnement du PEV face à de nouvelles consignes et pendant la montée en régime de l'installation, ainsi qu'à la détection de dérives normales et inévitables (c'est-à-dire les limites de variation acceptables qui permettent de garantir l'élaboration d'un verre dont les caractéristiques sont considérées satisfaisantes).

Il ne s'agit pas de répertorier les diverses tâches effectuées par les opérateurs, mais plutôt de répertorier les contextes caractéristiques qui motivent la réalisation de ces tâches.

Gestion des alimentations

Puisque le PEV a pour mission de tester diverses conditions d'exploitation du procédé de vitrification, chacune des campagnes est caractérisée par un programme de fonctionnement particulier. Une des caractéristiques du PEV est donc sa faculté à s'adapter à des conditions nouvelles ; ces conditions changent pendant la campagne, puisque les exploitants testent, pour chaque conteneur à remplir, de nouveaux paramètres de fonctionnement et/ou de nouvelles concentrations en éléments dans la solution de Pf, ou encore divers types de fritte de verre.

Chaque programme spécifie la montée en régime, les temps d'alimentation, les coulées à effectuer, le nombre de coulées, les conditions d'élaboration propres à chaque coulée, etc.

Pendant la montée en régime de l'installation, les débits d'alimentation sont progressivement augmentés jusqu'à atteindre leur valeur nominale. La gestion du démarrage est, en majeure partie, laissée à la charge des opérateurs, donc très peu automatisée ; elle est définie par l'ingénieur procédé, en fonction des objectifs de la campagne.

Gestion de l'alimentation en Pf

Montée en régime :

- Le débit est réglé par tâtonnements : une fois que l'opérateur a déterminé la cylindrée de la roue doseuse, celle-ci est intégrée dans le TDC et utilisée pour calculer le débit instantané de la roue doseuse. Ce débit est ensuite ajusté par l'opérateur en jouant sur la vitesse de rotation de l'arbre rapide sur le TDC (la cylindrée est préalablement mesurée avant chaque essai),

- Cette vitesse est progressivement augmentée jusqu'à atteindre le débit nominal de solution Pf.

Adaptation : la solution de Pf comporte un grand nombre de composants et dont les exploitants essaient de déterminer la contribution sur les caractéristiques du verre. Les exploitants jouent sur la composition de la solution Pf en ajoutant par exemple un ou plusieurs éléments dans la cuve d'alimentation. Cet ajout s'effectue en local, directement sur la cuve d'alimentation en Pf.

Gestion de l'alimentation en adjuvant

Montée en régime : le débit d'adjuvant est réglé localement en modifiant la course du piston de la pompe doseuse et par lecture du débit instantané sur TDC.

Adaptation : les exploitants peuvent faire varier la concentration en adjuvant afin d'en étudier la contribution.

Gestion du recyclage

Montée en régime : le débit de recyclage est progressivement augmenté (comme pour la montée en régime du débit de la solution Pf, sauf que la cylindrée des godets n'est pas mesurée préalablement).

Le recyclage du dépoussiérage n'est pas un paramètre sur lequel interviennent les exploitants.

Gestion de l'alimentation en fritte

Le débit de fritte est progressivement augmenté en jouant sur la masse de godet et le temps de cycle de l'automate (tous deux sur l'armoire de contrôle). La montée en régime semble délicate, de l'avis des opérateurs.

Il est possible, en cours de campagne, d'alimenter le PEV avec une fritte de verre ayant des caractéristiques différentes.

Gestion du calcinateur

Montée en régime : l'accord de chauffe est donné par le TDC. L'opérateur intervient sur chacun des quatre régulateurs pour entrer la consigne de température à atteindre, conformément à la procédure de montée en régime calcinateur.

Les paramètres de fonctionnement du calcinateur ne sont généralement pas modifiés (température, vitesse de rotation).

Gestion du pot de fusion

La préchauffe du pot de fusion s'effectue plusieurs heures avant le lancement de la chauffe du calcinateur (ce délai correspond au temps de préchauffe du pot). De même que pour le calcinateur, la montée en température est commandée manuellement.

Les premières heures correspondant à la phase de démarrage servent à la montée en régime de l'installation et à la constitution du hold-up du pot de fusion ; ce hold-up ne sera coulé qu'en fin de campagne.

L'arrêt de l'installation est possible sans la vidange ; cela peut se produire dans le cas d'une rétention dans le pot de fusion. Le rinçage s'effectuera ultérieurement avec de la frite fusible.

L'expérience a montré que plus le temps de séjour dans le pot de fusion est long, meilleure est la qualité du verre obtenu. Pour des essais particuliers, il est possible d'affiner le verre dans le pot de fusion en maintenant la chauffe sans alimenter, avant de couler.

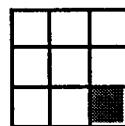
Le brassage du verre dans le pot de fusion, est un paramètre au niveau duquel les opérateurs peuvent avoir à intervenir :

- brassage ou non du bain de verre pendant la coulée,
- modification de la répartition des brassages pendant l'affinage et la coulée.

Gestion du traitement des gaz

Les paramètres de fonctionnement du traitement des gaz sont définis une fois pour toutes, et ne sont pas modifiés en cours de campagne, ni entre les campagnes.

II.3.4 La conduite de l'évolution



La conduite de l'évolution correspond à l'exploitation de l'installation dans l'ensemble de ses aspects. Il s'agit de piloter le PEV, d'adapter le fonctionnement en fonction de conditions particulières d'élaboration du verre, et de faire face aux comportements dangereux, en envisageant des positions de repli ou de sécurité.

On répertorie ici les différents contextes auxquels l'opérateur a à faire face ; à chacun de ces contextes peuvent être associées des activités d'adaptation, ainsi que des activités de pilotage.

Contexte d'élaboration du verre de référence

Dans ce contexte, l'élaboration du verre est bien connue et ne pose pas de difficulté particulière au niveau de l'exploitation du PEV. Le programme de fonctionnement se déroule sans qu'il y ait besoin d'affiner le verre.

Contexte d'élaboration d'un verre hors norme

L'objet du PEV est de tester des caractéristiques de verre différentes. Les équipes de conduite y sont très fréquemment soumises, ce qui suppose de leur part une surveillance accrue des paramètres de fonctionnement du calcinateur (risques de bouchage), des températures au niveau du pot de fusion, des prises d'échantillons régulières à divers endroits de l'installation. Le programme de fonctionnement peut subir des aménagements dans la mesure où le verre élaboré ne satisfait pas aux critères de qualité : en accord avec l'ingénieur procédé, les équipes de conduite peuvent être amenées à affiner le verre.

Les conditions dans lesquelles sont effectuées les campagnes peuvent provoquer des problèmes de bouchage ou d'augmentation du taux de poussières dans les gaz de calcination. Cela implique donc une vigilance des opérateurs focalisée sur ces aspects.

Contexte de repli sécuritaire

Les opérateurs sont placés dans ce contexte sur apparition d'un défaut grave sur le calcinateur. Le repli est activé automatiquement, ce qui impose aux opérateurs de vérifier les paramètres les plus

sensibles, au niveau des calcinateur et pot de fusion, de vérifier que la mise en repli a permis de stabiliser l'état de l'installation, et d'en rechercher la cause.

Il s'agit principalement de s'assurer du bon fonctionnement du calcinateur (rotation tube et températures) et du four de fusion pour, le cas échéant, intervenir pour stopper l'évolution dangereuse.

ANNEXE III : Retrouver la causalité chez De Kleer/Brown et Iwasaki/Simon

Le raisonnement causal est un domaine de la physique qualitative, discipline qui se préoccupe de décrire les phénomènes physiques en conciliant une perception du monde proche de l'homme (qui raisonne volontiers de manière intuitive) et une certaine dose de quantitatif. Il se base sur le caractère déterminisme des phénomènes physiques qui, une fois mis en évidence, permettent d'expliquer les évolutions observées sur un système physique donné.

Les approches de De Kleer/Brown et Iwasaki/Simon permettent d'exprimer la causalité par un traitement sur les équations qui décrivent le comportement du système (les références sont indiquées en fin de chapitre IV) ; ce sont des confluences pour De Kleer et Brown, et les équations classiques pour Iwasaki et Simon. A l'inverse de l'approche d'Iwasaki et Simon, qui vise à retrouver la causalité au travers d'un système d'équations, l'approche de De Kleer et Brown s'intéresse davantage à la façon dont est perçu le procédé ; sa modélisation se rapprochant, en effet, davantage d'une interprétation du procédé.

III.1 MÉTHODE D'IWASAKI / SIMON

Iwasaki et Simon proposent une approche formelle de la modélisation causale : partant des équations du système, il s'agit d'organiser les variables en fonction de l'ordre dans lequel les variables sont calculées.

Considérons l'exemple de l'évaporateur proposé par Iwasaki, et dont le schéma de principe est présenté en figure A.III.1.

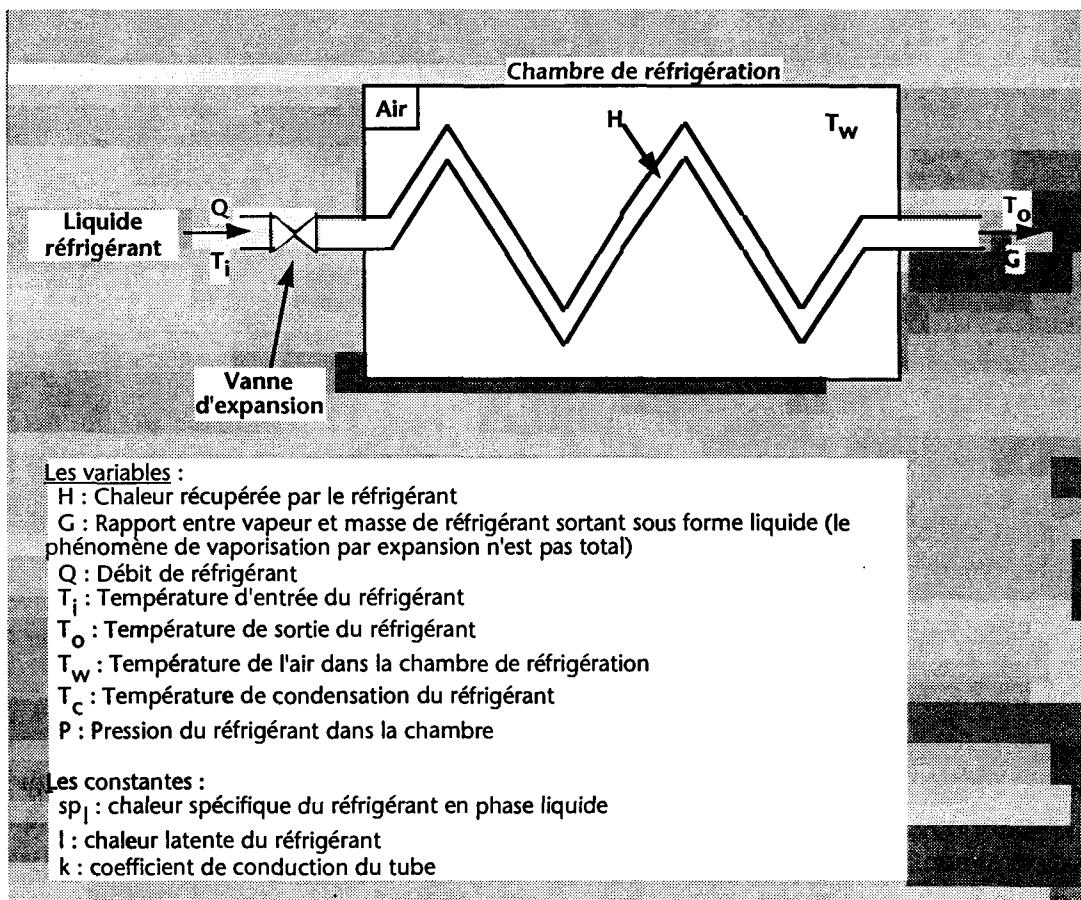


Figure A.III.1 : Chambre de réfrigération d'un système de production de froid.

Soient Q , T_i , T_o , G , H , P , T_c , et T_w les variables (mesurées ou non) du système ; avec sp_1 , l et k comme constantes. Les équations régissant le comportement de ce système sont :

$$H = k * (T_w - T_c) \quad (1)$$

$$H = G * Q * l - (T_i - T_o) * Q * sp_1 \quad (2)$$

$$T_c = f_1(P) \quad (3)$$

$$T_o = T_c \quad (4)$$

$$T_i = t_i \quad (5)$$

$$Q = q \quad (6)$$

$$P = p \quad (7)$$

$$T_w = t_w \quad (8)$$

Les équations (5) à (8) expriment les relations existant entre les variables Q , T_i , P , T_w et leurs valeurs respectives, mesurées via des capteurs (les valeurs t_i , q , p , et t_w). Elles ont été ajoutées afin qu'il y ait autant d'équations que d'inconnues, le système est alors dit complet. Les variables Q , T_i , P , T_w sont considérées comme des variables exogènes du système.

Il s'agit maintenant de déterminer l'ordre de calcul des variables, les unes par rapport aux autres. Pour ce faire, une représentation matricielle est employée. Par convention, les valeurs "1" symbolisent la présence de la variable dans l'équation considérée. Le système d'équations s'écrit donc :

	H	G	Q	T _i	T ₀	T _w	T _c	P
(1)	1					1	1	
(2)	1	1	1	1	1			
(3)							1	1
(4)					1		1	
(5)				1				
(6)			1					
(7)							1	
(8)					1			

Soit S l'ensemble des huit équations qui définissent complètement le système. Dans un premier temps, il faut extraire le plus grand sous-système S_0 complet pour lequel toutes les équations peuvent être immédiatement résolues. Dans notre cas, ce système S_0 sera composé des équations (5) à (8), puisqu'en effet, les variables T_i , Q , P et T_w sont exogènes, donc définies de manière externe par rapport au système considéré.

Une fois le système S_0 isolé, les variables à calculer ultérieurement sont représentées dans le système $S-S_0$ suivant :

	H	G	T ₀	T _c
(1)	1			1
(2)	1	1	1	
(3)				1
(4)			1	1

Une fois que les variables correspondant au système S_0 ont été calculées, la variable T_c est déterminée par l'équation (3). Cette dernière constitue donc l'élément unique du système S_1 . Le système résultant est à rechercher parmi les variables suivantes :

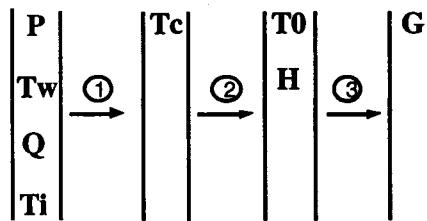
	H	G	T ₀
(1)	1		
(2)	1	1	1
(4)			1

Les variables H et T_0 peuvent maintenant être calculées de façon indépendante l'une de l'autre, respectivement par les équations (1) et (4).

A présent la variable G peut être calculée :

	G
(2)	1

L'ordre des calculs à effectuer pour résoudre le système d'équations est à présent explicité. L'ordre de calcul des variables est donc le suivant :



Les relations de causalité entre variables sont déduites des équations (1) à (8) grâce à cet ordonnancement : T_c est, par exemple, calculé par (3) connaissant P ; T_0 est déterminé une fois que T_c a été calculé. Il existe donc une relation d'ordre qui se traduit, pour l'ensemble des variables, par le graphe de la figure A.III.2.

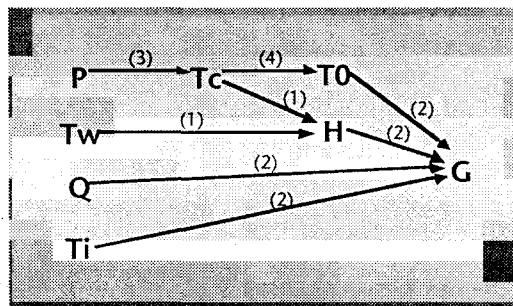


Figure A.III.2 : Graphe causal obtenu par la méthode d'Iwasaki et Simon.

Les principales caractéristiques de l'approche proposée par Iwasaki et Simon sont donc les suivantes :

- la méthode est basée sur une vision statique du système, c'est-à-dire qu'il suffit d'avoir un système d'équations représentatif pour déterminer par résolution l'ensemble des chemins de propagation,
- les chemins de propagation sont déduits par ordonnancement des variables d'un système selon l'étape de calcul qui a conduit à la détermination de leur valeur. Le graphe correspondant décrit donc la calculabilité des variables d'un système,
- la méthode accepte une description qualitative des comportements (équation (3)),
- elle met en œuvre une algèbre classique.

III.2 MÉTHODE DE DE KLEER /BROWN

De Kleer et Brown [DE KLE 84] proposent de modéliser la causalité au sein d'un système physique en partant de sa structure. La structure s'exprime en termes de matériaux, de conduits (qui ne font que transporter des matériaux) et de composants interreliés, et le comportement des composants peut être décrit par un ensemble d'équations différentielles qualitatives, les confluences. Les composants sont considérés n'entrer en interaction qu'avec leurs voisins directs, d'où la notion de causalité locale qui permet une approche modulaire du système analysé.

La modélisation qualitative introduit les notions de **variable qualitative** x (dont la valeur est notée $[x]$), de **tendance** (en fait la dérivée en fonction du temps de la variable considérée, et de **confluence**.

Une confluence décrit le comportement d'un composant. Elle peut être déduite des équations quantitatives en remplaçant la variable x par sa valeur qualitative $[x]$, qui peut prendre des valeurs comprises dans l'ensemble $\{-, 0, +\}$, de sorte que pour $x < 0$, $[x] = -$, pour $x = 0$, $[x] = 0$ et pour $x > 0$, $[x] = +$. De même, la tendance d'une variable x prend ses valeurs dans l'ensemble $\{-, 0, +\}$ et est interprétée de la façon suivante : à la dérivée dx/dt correspond, dans le référentiel qualitatif, une dérivée ∂x telle

que $\partial x = +$ si et seulement si la variable x augmente, $\partial x = -$ si et seulement si x diminue, $\partial x = 0$ si x est stable. Les confluences sont donc des équations qualitatives reliant des variables qualitatives par des opérateurs d'addition et de multiplication, auxquels sont associés des lois de combinaison qui sont exprimées sous forme de tables (tableau A.III.1). La valeur qualitative "?" a été ajoutée comme valeur possible de façon à ce que les opérations soient internes dans l'ensemble $\{-, 0, +, ?\}$ [LEYVA 91].

+	-	0	+	?
-	-	-	?	?
0	-	0	+	?
+	? <td>+</td> <td>+</td> <td>?</td>	+	+	?
?	?	?	?	?

*	-	0	+	?
-	+	0	-	?
0	0	0	0	0
+	-	0	+	?
?	?	0	?	?

Tableau A.III.1 : Tables d'addition et multiplication qualitatives.

III.2.1 Déduction d'une relation de confluence

Le cas d'un fluide dont le débit est réglé par une vanne de réglage est pris comme exemple [LEYVA 91].

L'équation qui régit le fonctionnement de cette vanne est donné par :

$$Q = C * A * \sqrt{\frac{2 * P}{\rho}} \quad , \quad P > 0$$

Q désigne le débit de fluide, C un coefficient positif constant relatif à la vanne, A l'aire de la vanne sur laquelle s'exerce la pression du fluide, P la perte de charge entre entrée et sortie de la vanne et ρ la densité du fluide. Sachant que les variables sont nécessairement positives, il est alors possible d'écrire :

$$[Q] = [C] * [A] * [(2 * P / \rho)^{1/2}] = [+] * [+] * [2 * P / \rho] = [2] * [P] * [\rho] = [P] = +$$

Le comportement de la variable qualitative $[Q]$ est fourni par la différentiation de l'équation de départ, puis par une transposition dans le référentiel qualitatif :

$$\frac{dQ}{dt} = C * \left(\frac{2 * P}{\rho} \right)^{1/2} * \frac{dA}{dt} + \frac{C * A}{\rho} * \left(\frac{\rho}{2 * P} \right)^{1/2} * \frac{dP}{dt}$$

$$\partial Q = [C] * [(2 * P / \rho)^{1/2}] * \partial A + \frac{[C] * [A]}{[\rho]} * \left[\left(\frac{\rho}{2 * P} \right)^{1/2} \right] * \partial P$$

et enfin

$$\partial Q = \partial A + \partial P,$$

$$\partial A + \partial P - \partial Q = 0$$

Le même traitement est à effectuer pour l'ensemble des composants du système. L'intérêt de cette approche est de ne pas nécessiter l'expression quantitative exacte puisque celle-ci serait de toute façon réduite à une forme qualitative.

III.2.2 Exemple de l'évaporateur

La causalité est déduite des équations de confluence en considérant une perturbation initiale et en la propageant à travers tout le système. La propagation est stoppée si plus d'une variable inconnue est présente dans une équation. Il faut alors émettre une hypothèse pour pouvoir continuer à propager sur l'ensemble des variables.

Soit l'exemple de l'évaporateur, considéré par Iwasaki et Simon. Sachant que G (quantité de vapeur restante en sortie de chambre rapportée à la masse totale de réfrigérant), que la chaleur H absorbée par le réfrigérant pendant son passage dans l'évaporateur, et que le coefficient de conduction k sont positifs, que f_1 est une fonction monotone croissante, alors le système de confluences issu des équations (1) à (4) s'écrit :

$$\partial H - \partial T_w + \partial T_c = 0 \quad (1')$$

$$\partial H - \partial G - \partial Q + \partial T_i - \partial T_o = 0 \quad (2')$$

$$\partial T_c - \partial P = 0 \quad (3')$$

$$\partial T_o - \partial T_c = 0 \quad (4')$$

Supposons l'existence d'une perturbation sur la variable P , considérée comme une entrée du système. Envisageons sa propagation sur l'ensemble des autres variables.

Soit $\partial P = +$ une perturbation initiale sur P . Les confluences (3') et (4') fournissent les perturbations propagées sur les variables T_c puis T_o : $\partial T_c = +$, $\partial T_o = +$.

La relation de précédence s'écrit donc :

$$P \rightarrow T_c \rightarrow T_o. \quad (a)$$

Le système de confluences s'écrit alors :

$$\partial H - \partial T_w = - \quad (5')$$

$$\partial H - \partial G - \partial Q + \partial T_i - \partial T_o = 0 \quad (6')$$

Mais cela n'est pas suffisant pour déterminer le chemin de propagation sur les autres variables, puisqu'il y a plus d'inconnues que d'équations. Pour ce faire, De Kleer introduit la notion de causalité mythique, fondée sur trois heuristiques :

1. les relations topologiques entre composants déterminent des chemins de propagation des perturbations ("conduit heuristic"),
2. si l'on agit sur un composant donné, et que l'on ne sait rien sur d'autres contributions qui peuvent affecter son comportement, alors il faut considérer qu'il réagit comme si les autres contributions étaient nulles ("component heuristic"),
3. si certaines variables d'une confluence sont inconnues, il faut propager la perturbation comme si toutes sauf une des variables inconnues étaient nulles ("confluence heuristic").

La connaissance de la topologie du système permet de distinguer les variables internes et les variables externes ou exogènes, c'est-à-dire des variables susceptibles d'être perturbées par l'environnement, et non par le système en question. En vertu du "conduit heuristic", les chemins de propagation établis devront prendre en compte le fait que des variables exogènes soient les entrées du graphe. Les deux autres heuristiques permettent de lever l'indétermination liée au nombre d'inconnues restant au sein d'une confluence. Elles sont appliquées une première fois au niveau de la confluence (1') : sachant que la valeur quantitative de la variable T_W est très supérieure à celle de T_C , il est légitime de supposer qu'une petite perturbation sur T_C aura peu d'influence sur T_W . En d'autres termes, sachant que ∂T_C est connue, supposons que ∂T_W soit négligeable et déterminons les effets de la perturbation sur H :

$$\partial H = -$$

Ainsi, la variable H est déterminée après calcul de T_C :

$$T_c \rightarrow H \quad (b)$$

On définit ainsi un chemin de propagation privilégié entre T_C et H . Cela ne signifie nullement que la variable T_W ne soit pas causallement liée à H , au contraire, l'équation de confluence qui lie H , T_C et T_W prouve que ces trois variables sont bel et bien liées. Etant donné que l'on ne peut avoir plus d'informations sur T_W , cette variable sera considérée comme exogène, selon le "component heuristic".

Il reste à déterminer les chemins de propagation sur les variables inconnues contenues dans la confluence (6'). Selon la première heuristique, les variables Q et T_i sont exogènes au système, ce qui revient à supposer qu'elles ne sont pas affectées par une perturbation provoquée sur P , donc que ∂Q et ∂T_i sont négligeables (pas de chemin de propagation entre P , Q et T_i). Par ailleurs, avec les données dont nous disposons sur les variables Q et T_i , nous ne pouvons envisager de chemin de propagation entre elles et H . Nous supposerons alors que Q et T_i ne sont pas causallement liés à H , en vertu du "component heuristic". La résolution de la confluence (6') conduit à :

$$\partial H - \partial G - \partial Q + \partial T_i - \partial T_o = 0$$

$$(-) - \partial G - 0 + 0 - (+) = 0$$

$$-\partial G = +$$

$$\partial G = -$$

Ainsi, la perturbation est propagée jusqu'à la variable G par le biais de H et T_o . Mais il ne faut pas perdre de vue le fait qu'une perturbation ∂Q ou ∂T_i peut se répercuter sur G (la confluence (6') le confirme), il existe donc un lien de causalité entre ces variables, qui s'exprime par :

$$H \rightarrow G$$

$$T_o \rightarrow G$$

$$T_i \rightarrow G$$

$$Q \rightarrow G$$

(c)

Les perturbations supposées négligeables se rapportent aux variables T_W , Q et T_i , considérées avec P comme des variables d'entrée du système. En réunissant l'ensemble des relations de précédence (a), (b) et (c), on obtient le réseau suivant, identique à celui obtenu dans le cas d'un traitement effectué selon Iwasaki (figure A.III.3).

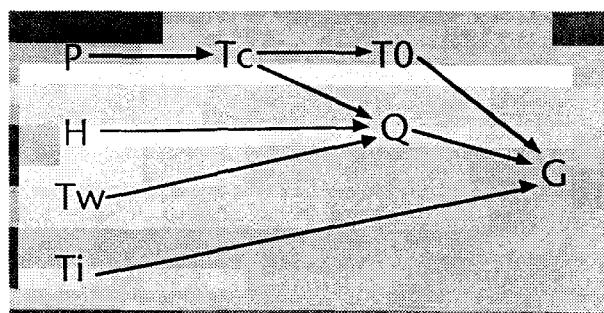


Figure A.III.3 : Graphe obtenu par la méthode de De Kleer/Brown

Les principales caractéristiques de l'approche de De Kleer et Brown sont les suivantes :

- la méthode est fondée sur l'expression qualitative des équations d'évolution d'un système,
- elle permet l'analyse des effets de la propagation de perturbations sur les variables du système,
- l'approche est intéressante quand les équations quantitatives sont non disponibles ou non linéaires,
- la méthode accepte les équations logiques, quantitatives, des règles, etc., puisqu'elles seront toutes traduites sous forme de confluences,
- elle utilise le raisonnement qualitatif,
- l'analyse est plus ambiguë, ou plus intuitive, que celle d'Iwasaki, bien que le choix des équations de ce dernier soit emprunt d'une part de subjectivité (la manière dont les équations doivent être écrites n'est pas arbitraire).

L'exemple de l'évaporateur montre que les deux approches permettent d'aboutir à des résultats similaires pour l'exemple considéré. D'un autre côté, l'analyse de la causalité selon De Kleer, s'appuie fortement sur la manière dont est perçu le procédé. Il faut s'attendre alors à des différences, surtout quand interviennent des phénomènes de feed-back (équilibres ou boucles de régulation).

ANNEXE IV : Analyse de dépendances selon la méthode de Finch et Kramer

La construction d'un système de diagnostic suppose l'analyse préalable du processus. Finch et Kramer proposent une démarche permettant de déterminer les liens de dépendance entre appareils, de manière à définir le jeu de règles de diagnostic le plus complet possible. Cette démarche est basée sur la décomposition structuro-fonctionnelle du processus.

Dans un premier temps, est considéré l'exemple du réacteur régulé qui a servi d'application aux auteurs. Une généralisation aux systèmes de grande taille est ensuite envisagé. L'exemple de l'installation industrielle PEV servira ensuite à en valider les concepts.

IV.1. LA DÉCOMPOSITION STRUCTURO-FONCTIONNELLE

La décomposition structuro-fonctionnelle est le processus d'identification des différents systèmes et unités qui assurent l'ensemble des fonctions au sein d'un procédé. Elle se base sur la description de trois types de systèmes : les **systèmes régulés**, les **systèmes passifs** et les **systèmes externes**. Les systèmes régulés correspondent aux boucles de régulation existant au sein du système, ce sont les systèmes les plus facilement repérables. Les systèmes passifs représentent, en fait, l'ensemble des systèmes qui produisent des sorties mesurées mais non directement impliquées dans une boucle de régulation ; ces systèmes sont particulièrement sensibles aux perturbations. Les systèmes externes se situent en périphérie du champ d'étude et correspondent aux entrées et sorties du système considéré.

Un système est décrit comme étant un groupe d'unités fonctionnelles qui agissent de façon concomitante pour remplir l'objectif global ou une fonction intervenant dans l'accomplissement de cet objectif. Un système est constitué par l'ensemble d'unités fonctionnelles qui remplissent ensemble la fonction objectif.

L'unité fonctionnelle est à distinguer de l'**unité physique** (ou composant), en ce sens que cette dernière peut remplir plusieurs fonctions, contrairement à l'unité fonctionnelle : à une unité fonctionnelle est associée une et une seule fonction qui correspond alors à la fonction d'un organe élémentaire, au niveau de décomposition le plus bas envisagé par l'analyste.

IV.2. ANALYSE DES DÉPENDANCES ENTRE SYSTÈMES ET UNITÉS

IV.2.1. Exemple d'un réacteur chimique

Finch et Kramer [FINCH 88] (référence donnée dans le chapitre IV) proposent l'exemple d'un réacteur agité, alimenté par un unique flux de matière, et lieu d'une réaction exothermique. Les paramètres régulés sont : le niveau, la température, et le débit de recyclage.

Il s'agit de réaliser une réaction exothermique dans un réacteur agité en fonctionnement continu. Afin d'éviter les élévations de température dans le réacteur, le milieu réactionnel est refroidi par circulation au travers d'un échangeur de chaleur.

A chacun des systèmes fonctionnels répertoriés est associée une et une seule variable permettant de rendre compte de son état de fonctionnement. Dans le cas d'une boucle de régulation du niveau d'un réacteur (figure A.IV.1), le système fonctionnel correspondant contient l'ensemble des composants qui participent à la fonction de régulation, cette fonction étant vérifiée par le suivi du niveau via un capteur spécifique. Dans le cas de la figure 2, le système de régulation du niveau du réacteur comporte : une pompe, le réacteur, le capteur de niveau "Lr", le régulateur de niveau "[LRC]", la vanne de régulation "[vanne 1]", ainsi que les divers conduits de fluide.

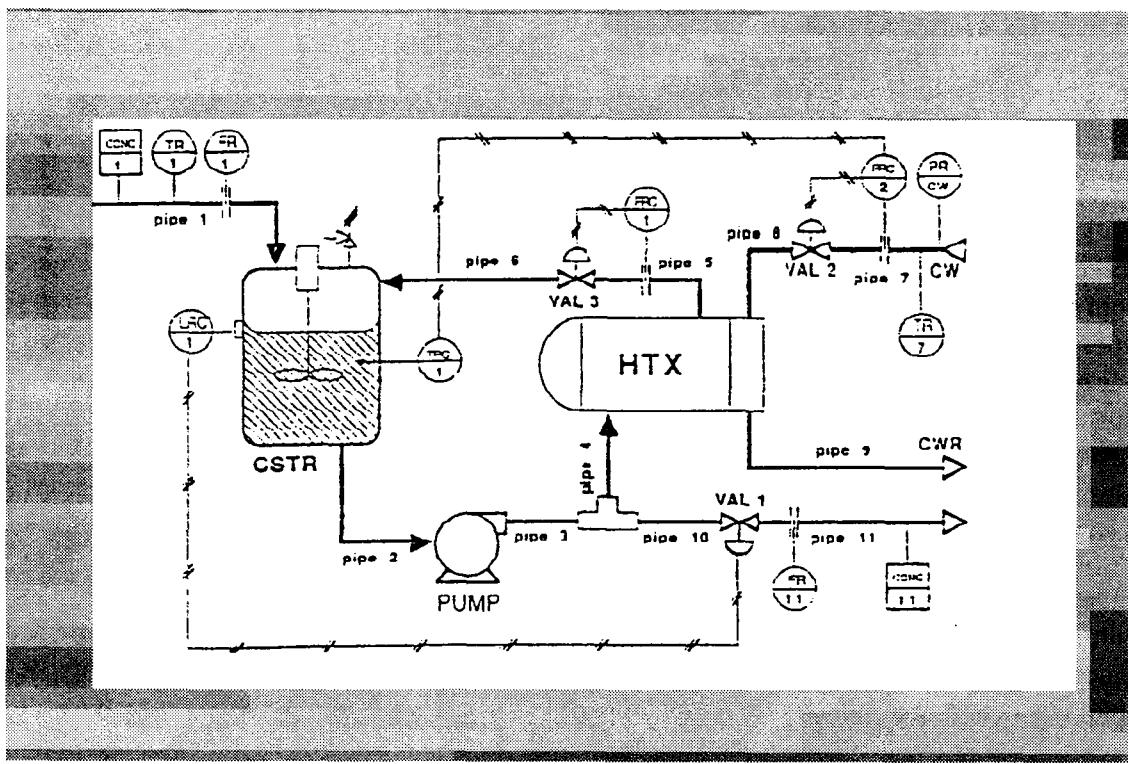


Figure A.IV.1 : Schéma PI&D du réacteur régulé.

La fonction d'un système peut être remise en cause par la défaillance d'une de ses unités (la pompe est en panne, par exemple) ou par la défaillance d'un système qui lui est fonctionnellement relié (la pompe n'alimente plus parce qu'elle est désamorcée ou parce que la cuve de prélèvement est vide). Un défaut se réfère à quelque dégradation physique survenant au niveau d'une unité, qui peut affecter le procédé en réduisant, voire en annulant la capacité de l'unité physique (ou d'un ensemble d'unités) à réaliser la (les) fonction (s) vitale (s) attendue (s).

IV.2.2. Décomposition du réacteur

Dans un premier temps sont listés l'ensemble des composants participant au procédé, ainsi que la (les) fonction (s) qu'ils assurent. Dans l'exemple ci-dessus, le réacteur, l'échangeur thermique, les vannes, les régulateurs, les capteurs et les conduits de fluide sont répertoriés. Leurs fonctions sont indiquées dans le tableau A.IV.1 suivant :

APPAREIL	FONCTION	SYSTEME
Echangeur	Lieu du transfert thermique	Système de régulation température réacteur
Régulateur de température réacteur [TRC 1]	Maintien température réacteur	
Capteur température réacteur T_r	Mesure	
Vanne 2	règle le débit d'eau de refroidissement	
Vanne de régulation [vanne 2]	Règle le débit d'entrée	
Capteur de débit $F7$	Mesure du débit aqueux	Système de régulation débit réfrigérant
Régulateur [FRC 2]	Maintien débit constant	
Réacteur	Stockage de fluide	
Capteur de niveau L_r	Mesure	Système de régulation niveau réacteur
Régulateur niveau réacteur [LRC]	Maintien niveau constant	
Vanne 1	Règle le niveau réacteur	
Pompe	Propulsion	
Vanne 1	Règle le débit de sortie vers l'extérieur	Système d'évacuation du produit
Capteur de débit $F11$	Mesure le débit de sortie liquide	
Pompe	Propulsion	Système de régulation du débit recyclage
Echangeur	Stockage transitoire de fluide	
Vanne 3	Réglage du recyclage vers le réacteur	
Capteur de débit $F5$	Mesure du débit retour réacteur	
Régulateur [FRC 1]	Maintien débit constant	
Réacteur	Siège de la réaction	Système de réaction chimique
Capteur de concentration $S11$	Mesure concentration en sortie	
Capteur de température $T7$	Mesure température	Système de refroidissement (externe)
Capteur $F1$	Mesure débit solution d'entrée	Système d'alimentation réacteur (externe)
Capteur $T1$	Mesure température solution d'entrée	Système de mise en température du réactif (externe)
Capteur $S1$	Mesure concentration solution d'entrée	Système de préparation solution d'alimentation (externe)

Tableau A.IV.1 : Décomposition du réacteur chimique.

Ensuite, les divers systèmes fonctionnels sont mis en évidence : les systèmes de régulation (régulation de la température du réacteur, du débit de réfrigérant, du niveau dans le réacteur, ainsi que du taux de recyclage), les systèmes passifs (la réaction chimique proprement dite), et enfin les systèmes externes (alimentations en eau de refroidissement et en réactif, par exemple).

Les composants sont ensuite classés dans les divers systèmes précédemment explicités. Il s'agit de ranger, dans chacun des systèmes, l'ensemble des composants nécessaires pour atteindre chaque objectif. Par exemple, le système de régulation de température du réacteur comporte les composants suivants : l'échangeur de chaleur, le capteur ainsi que le régulateur. Pour des éléments physiques

comme l'échangeur qui assure plusieurs fonctions, une fonction lui sera associée pour chaque système considéré.

IV.2.3. Règles de construction du modèle de dépendances

L'analyse structuro-fonctionnelle sert de base pour la construction du réseau de dépendances entre les fonctions recensées. Les règles correspondantes sont les suivantes :

- Au sein d'un système donné, les diverses unités fonctionnelles sont liées par des liens de dépendance. Un dysfonctionnement de l'une peut remettre en cause l'objectif du système auquel elle appartient,
 - Deux systèmes, qui n'ont pas d'unité fonctionnelle en commun, sont en relation de dépendance si le dysfonctionnement de l'un entraîne le dysfonctionnement du second (l'objectif de l'un est compromis par une défaillance de l'autre),
 - Ces relations de dépendance sont orientées,
 - Les dépendances fonctionnelles caractérisent des **chemins de propagation de perturbations**.

Ainsi, l'établissement d'un modèle de dépendances est guidé par l'énonciation de règles de causalité conditionnelles " si ... se trouve perturbé, alors cela induira probablement la perturbation de ...".

IV.2.4. Modèle obtenu

Les phénomènes de propagation de dysfonctionnement peuvent être représentés sous forme de liens de dépendances conditionnelles (les arcs) entre les divers systèmes (les nœuds du graphe), dont un exemple est indiqué en figure A.IV.2. Une flèche double entre deux systèmes indique qu'un même composant participe à la réalisation de deux fonctions ; ainsi, le fonctionnement perturbé de l'un est lié au mauvais fonctionnement du second, les deux dysfonctionnements pouvant être simultanés.

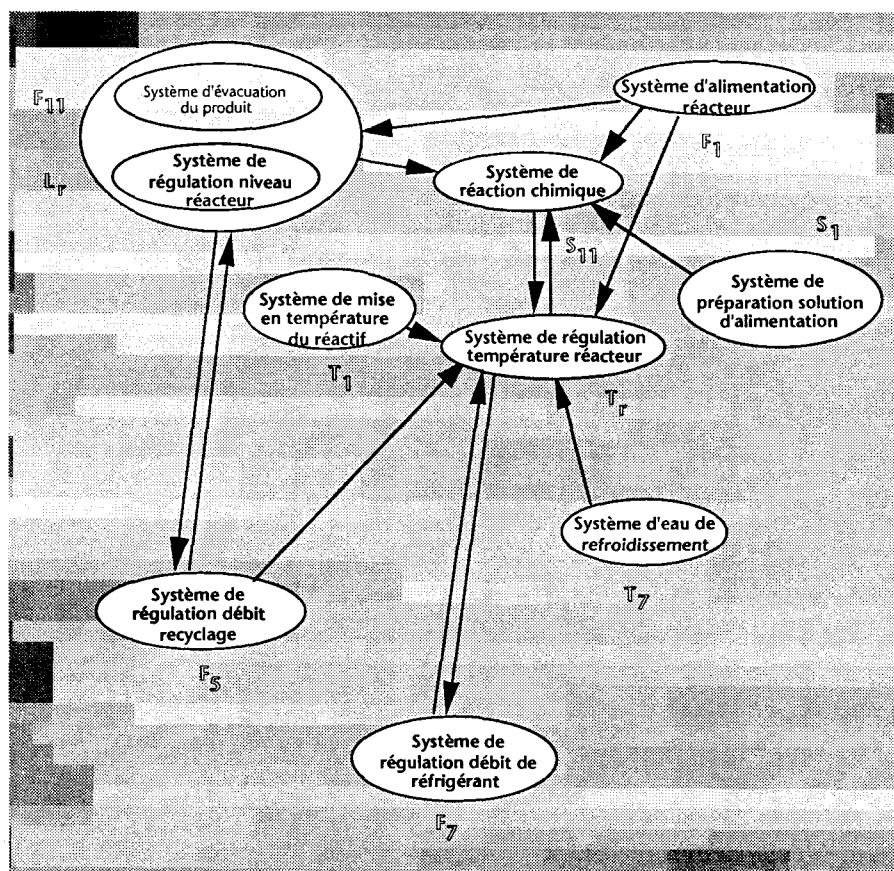


Figure A.IV.2 : Graphe de dépendance entre systèmes.

Il s'agit ici de déterminer le modèle logique de comportement du procédé, en considérant les liens d'interdépendance entre systèmes. Ces dépendances forment, en fait, un réseau de propagation de défauts potentiels, pris ici au sens d'écart par rapport à une norme (valeur nominale plus ou moins un epsilon donné). L'exemple du réacteur chimique montre de telles relations, établies à partir des règles simples : le système de maintien de température du réacteur est fortement influencé par les alimentations en réactifs, le débit d'alimentation en eau de refroidissement, etc.

Le modèle de dépendances conditionnelles obtenu à partir de l'ensemble des systèmes considérés dans le tableau A.IV.1 est donné en figure A.IV.2. Dans leur article de 1988, Finch et Kramer n'ont pas distingué les systèmes de régulation du niveau du réacteur et d'évacuation du produit. Pour rester cohérent avec leur modèle, nous avons choisi de les distinguer à l'intérieur d'un "pseudo-système" les englobant.

ANNEXE V : Liens entre graphe causal et réseau de dépendances de Finch et Kramer

Un réseau de dépendances structuro-fonctionnel exprime des liens de causalité entre unités élémentaires et systèmes. Il est alors intéressant de mettre en lumière le rapport qui existe avec un réseau qui lie causalement les variables importantes du processus, tel qu'envisagé en automatique, et plus particulièrement dans le module PROTEE de simulation causale.

Modèle de dépendances fonctionnelles ainsi que graphe causal définissent tous deux des modèles "entité-relation" basés sur l'expression de relations de causalité : l'un est orienté description du mauvais fonctionnement d'un système, l'autre propose un modèle de comportement normal des variables pertinentes de ce même système. Un tel modèle permet de déterminer l'évolution de l'ensemble des variables, soumises par exemple à l'influence d'une perturbation externe.

L'analyse comparative que nous allons à présent mener se base sur les travaux de Finch et Kramer de 1988 précédemment relatés, ainsi que sur ceux de 1987 des mêmes auteurs, où un graphe causal du réacteur était proposé (les références se trouvent en fin de chapitre IV). Ce graphe présente toutefois un certain nombre de différences avec le modèle fonctionnel, principalement parce qu'il comporte des variables qui ne figurent pas dans le modèle de dépendances.

Une première étape consiste alors à extraire du graphe causal toutes les variables qui ne sont pas associées à des capteurs de mesure (positions de vanne et intensité des signaux de commande des régulateurs ne sont pas pris en compte). Mais cette suppression doit s'accompagner de certaines précautions afin de préserver l'ensemble des relations de dépendance qu'entretiennent les diverses variables mesurées les unes avec les autres. Il faut en effet s'assurer que le graphe causal obtenu par réduction du graphe initial décrit toujours le même système. Une telle réduction est légitime si l'on considère que le principe de causalité permet d'établir des relations particulières entre variables. Puisqu'un tel graphe constitue une interprétation du comportement d'une installation, il est parfaitement légitime de faire abstraction d'un certain nombre de nœuds à condition que les relations entre nœuds restants soient préservées.

La figure A.V.1 présente le schéma du graphe causal initial tel que proposé par Finch et Kramer, qui contient l'ensemble des variables procédé. Pour plus de clareté, les signes portés par les arcs ont été omis. Les variables cerclées sont les seules à être mesurées, toutes les autres doivent par conséquent être supprimées du graphe. Cette réduction peut être effectuée de façon purement qualitative, en considérant successivement les nœuds à éliminer et en conservant les chemins de propagation entre variables mesurées.

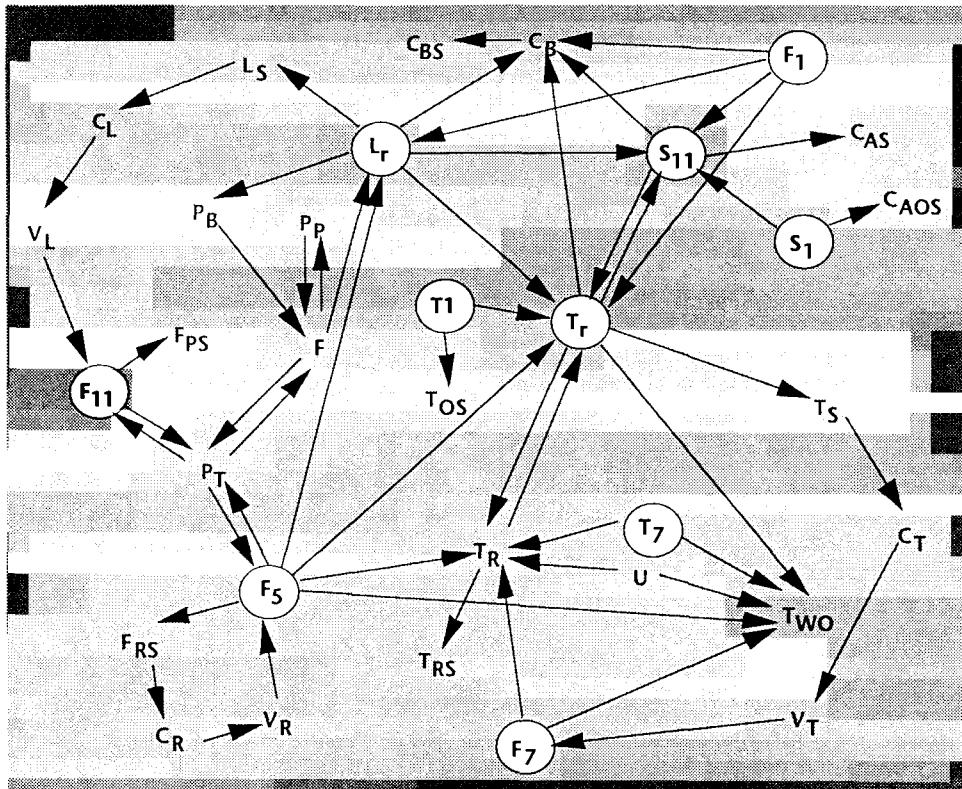


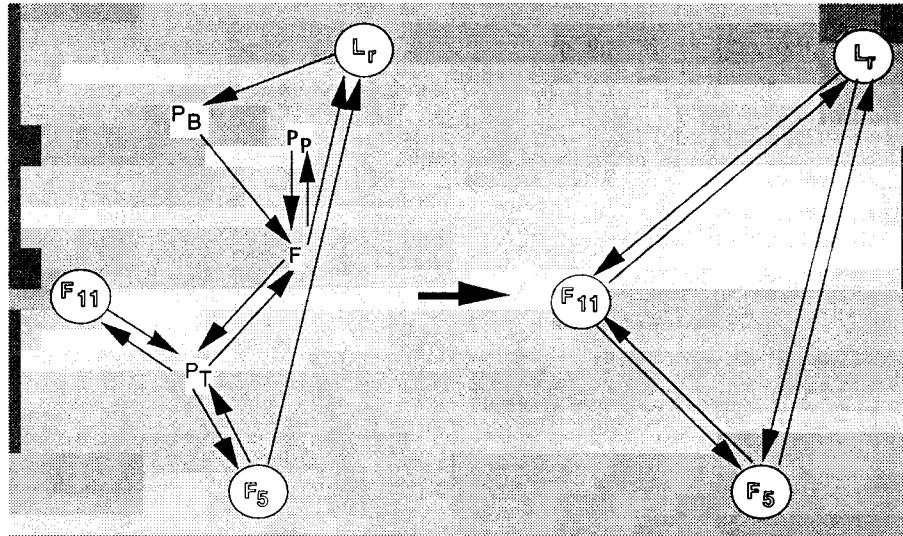
Figure A.V.1 : Structure du graphe causal selon Finch et Kramer.

Trois types de nœuds sont distingués : les nœuds terminaux ou périphériques (T_{two} , C_{BS} , TRS , C_{AS} , $CAOS$, U et T_{OS}), les nœuds internes correspondant à des mesures (T_7 , F_7 , F_5 , F_{11} , T_1 , T_r , S_1 , S_{11} , F_1 , L_r) et les nœuds internes non mesurés (L_s , C_L , V_L , P_T , F , P_p , P_B , F_{RS} , C_R , V_R , T_r , T_S , C_T , V_T). Nous nous proposons d'éliminer les nœuds non mesurés.

Elimination de P_T , F , P_p , et P_B

Les variables intermédiaires P_T , F , P_B et P_p doivent être éliminées du graphe :

- le chemin de propagation $F_5 - P_T - F_{11}$, symbolisant l'influence mutuelle des variables F_{11} et F_5 , sera naturellement remplacé par un chemin direct entre F_5 et F_{11} ,
- le chemin " $F_5 - P_T - F - L_r$ " schématise l'influence de F_5 sur L_r , or il existe un chemin direct $F_5 -> L_r$. L'élimination de P_T et F doit être effectuée en ajoutant un arc $L_r -> F_5$ pour indiquer l'influence de L_r sur F_5 via P_B ,
- le même traitement est effectué entre L_r et F_{11} : le chemin " $L_r - P_B - F - P_T - F_{11}$ " est réduit à un arc liant directement L_r à F_{11} . De même, le chemin " $F_{11} - P_T - F - L_r$ " est réduit à un arc direct entre F_{11} et L_r (figure A.V.2).

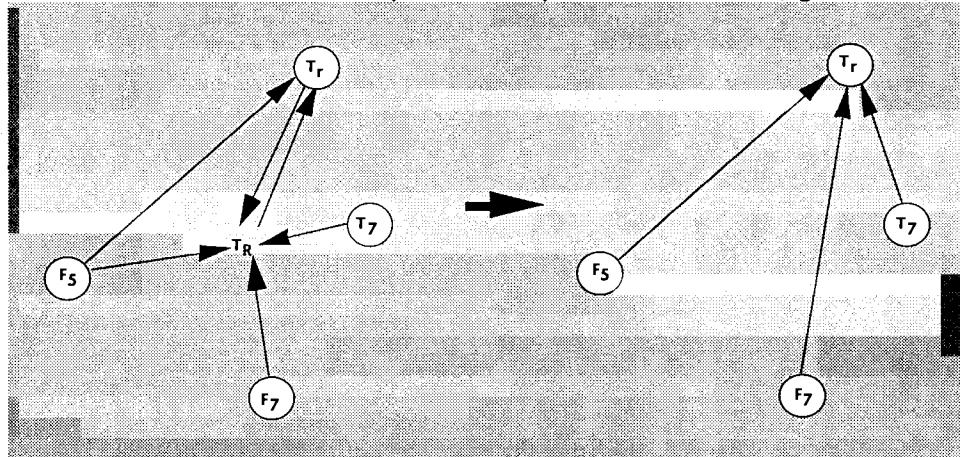
Figure A.V.2 : Résultat de l'élimination de P_T , F , P_P et P_B .

Elimination de L_S , C_L et V_L

Le chemin "L_r - L_S - C_L - V_L - F₁₁" schématise la régulation du niveau du réacteur. Il est aisément remplacé par un chemin unidirectionnel entre L_r et F₁₁. Puisqu'un tel chemin a déjà été tracé, nous n'en ajouterons pas d'autre.

Elimination de T_R

La variable T₇ n'est reliée qu'à la variable T_r, via T_R. En éliminant T_R, ce chemin sera remplacé par un arc direct de T₇ à T_r. Le chemin "F₇ - T_R - T_r" peut, de même que pour T₇, être remplacé par un chemin direct entre F₇ et T_r. F₅ n'est reliée à T_r que de façon unidirectionnelle, donc il n'y a pas d'arc à ajouter entre ces deux variables, sachant qu'il existe déjà un arc les reliant (figure A.V.3).

Figure A.V.3 : Elimination de T_R .

Elimination de T_S , C_T , V_T

De même que pour les variables L_S, C_L et V_L, les variables T_S, C_T, V_T sont des variables entrant dans la boucle de régulation de la température du réacteur via le débit d'eau de refroidissement. Il implique un chemin orienté partant de la variable T_r vers la variable F₇ (figure A.V.4).

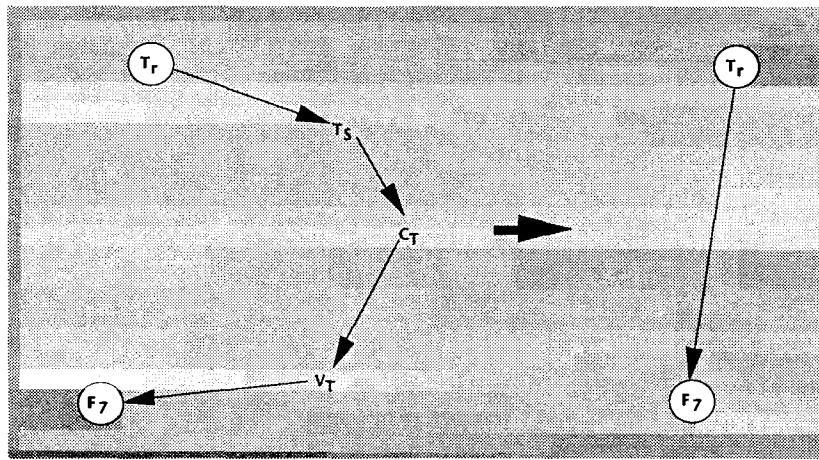


Figure A.V.4 : Elimination des variables de régulation.

Elimination de F_{RS} , C_R , V_R

Ces variables peuvent être considérées comme des variables internes à la variable mesurée F_5 . Elles n'apparaîtront donc pas dans le graphe causal final (figure A.V.5).

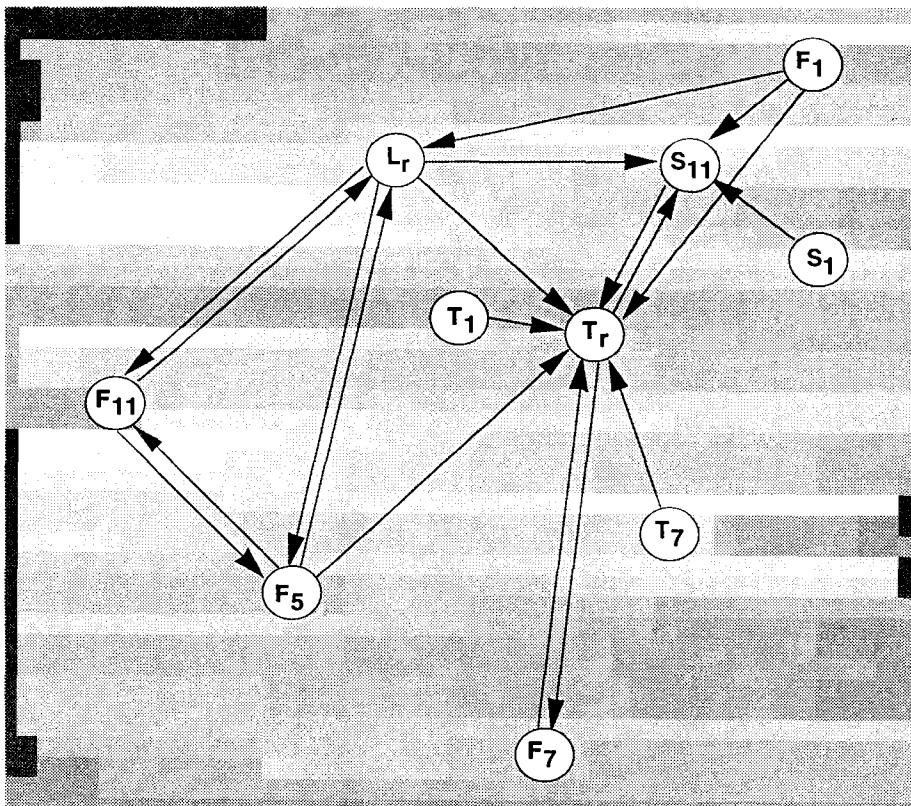


Figure A.V.5 : Graphe causal final.

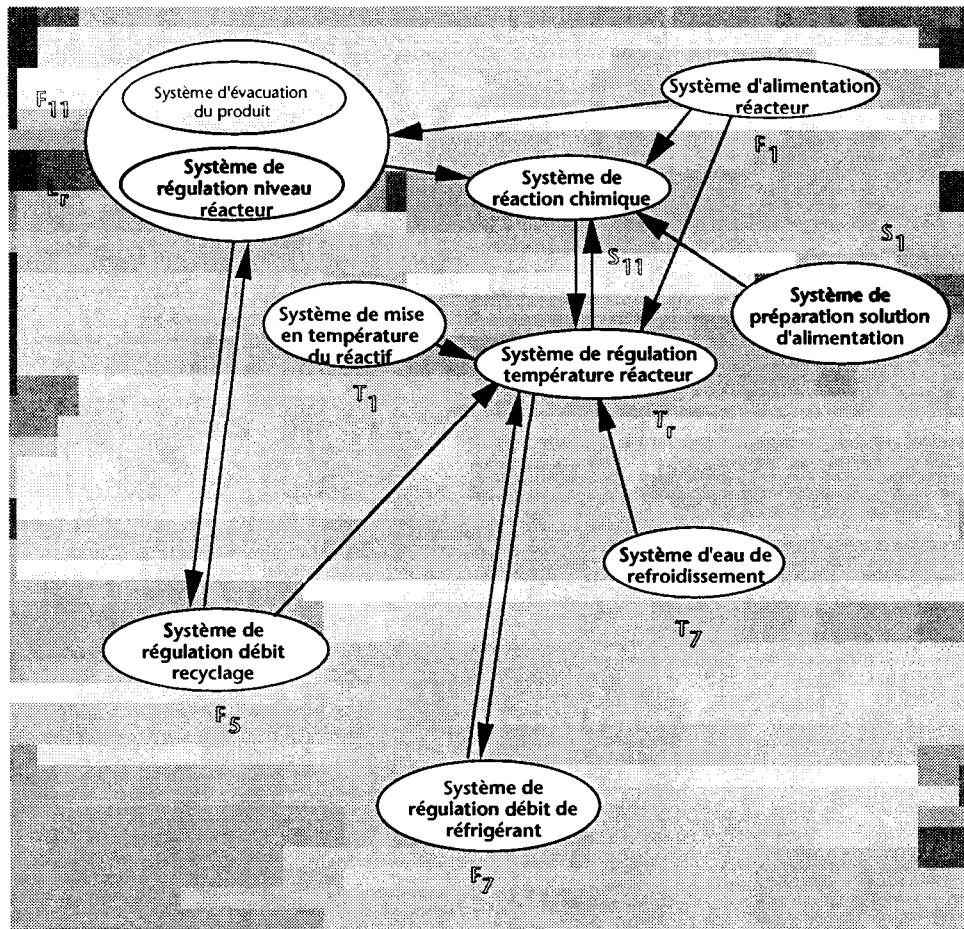


Figure A.V.6 : Réseau de dépendance pour le réacteur chimique.

L'analyse comparée du graphe causal (figure A.V.5) et du modèle de dépendances (figure A.V.6) permet de vérifier que la structure des deux réseaux est sensiblement la même, à quelques différences près :

- dans le modèle de dépendances, les deux variables L_r et F_{11} sont incluses dans un seul et même système, le système de régulation du niveau du réacteur. Il eut été préférable de les séparer au sein de deux systèmes distincts, cela aurait certainement permis de retrouver les relations de causalité existant entre les variables F_{11} et F_5 (figure A.V.5),
- il n'y a pas de relation directe entre le système de régulation de niveau et le système de régulation de température, comme le laissait supposer l'arc reliant L_r à T_r dans le graphe causal. N'ayant aucune information sur la façon dont le graphe causal a été obtenu, on ne peut écarter l'hypothèse d'un arc redondant.

En définitive, bien que ces deux modèles correspondent à des visions à priori distinctes - l'une aborde la modélisation de la propagation de dysfonctionnements, et l'autre la modélisation des influences entre variables du processus en fonctionnement normal -, elles se basent toutes-deux sur l'interprétation des interactions entre entités (d'un côté les systèmes et de l'autre les variables) en termes de causalité.

ANNEXE VI : Généralisation de l'analyse des dépendances structuro- fonctionnelles

L'exemple du réacteur chimique (annexe V) a permis de décrire la démarche de description des relations de dépendances dans un système de petite taille. Pour les installations industrielles, l'analyse devient très vite difficile, car il faut gérer un grand nombre de systèmes fonctionnels. Pour remédier à cette difficulté, la hiérarchisation en niveaux d'agrégation semble plus satisfaisante, encore faut-il suivre un certain nombre de règles. C'est ce que nous décrivons ici.

VI.1. MAÎTRISER LA COMPLEXITÉ PAR LA HIÉRARCHISATION

La décomposition est réalisée de la manière suivante :

1. L'objectif global du système à analyser est explicité,
2. Les contours du système sont définis,
3. Tous les composants sont répertoriés : appareils (les conduits ne seront pas pris en compte dans cette étude), instrumentation,
4. La (les) fonction (s) de chacun est (sont) précisée (s),
5. Le regroupement de plusieurs organes qui participent à la même fonction élémentaire et à laquelle est associée une variable mesurée constituera l'unité fonctionnelle, qui représente la limite de décomposition,
6. Chacun des organes recensés est associé à au moins une unité fonctionnelle,
7. Ces unités fonctionnelles sont ensuite regroupées au sein de trois types de systèmes : les systèmes régulés, externes puis le reste,
8. Ces systèmes sont ensuite regroupés au sein de systèmes de plus haut niveau, jusqu'à parvenir au système qui décrit le procédé dans sa totalité. Ainsi, le système global peut être décrit au travers d'une arborescence de sous-systèmes, chaque strate décrivant un niveau de description particulier (figure A.VI.1),

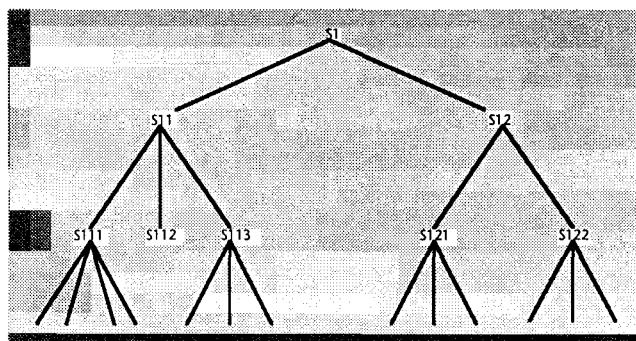


Figure A.VI.1 : Exemple d'arbre fonctionnel.

La construction d'un modèle s'effectue en deux phases : (1) description exhaustive des fonctions, processus, moyens de contrôle mis en œuvre pour réaliser l'objectif global, ainsi que les composants participant à chacune des fonctions ; (2) détermination des relations d'influence entre fonctions du système (un système est défini comme l'ensemble d'unités fonctionnelles qui interagissent pour remplir un objectif particulier).

La démarche employée pour décomposer le système s'inspire de la méthode d'analyse fonctionnelle proposée par Finch et Kramer. Cette méthode a été adaptée à l'analyse des systèmes industriels : elle consiste en une description fonctionnelle élaborée selon une hiérarchie de niveaux de raffinement. Le procédé est ainsi décomposé en systèmes fonctionnels remplissant chacun une mission particulière pour remplir l'objectif global. Ces systèmes peuvent, à leur tour, être décomposés en sous-systèmes décomposables, et unités fonctionnelles élémentaires.

L'état de fonctionnement du procédé dépend des unités fonctionnelles qui le composent, mais aussi des relations de dépendance fonctionnelle qui le lient aux autres systèmes. Cette démarche permet de percevoir initialement le système selon un niveau global, puis d'affiner progressivement ce modèle global en sous-modèles fonctionnels.

La seconde phase consiste en l'établissement des relations de dépendances pour chacun des niveaux de la décomposition. Sachant qu'un système, pour assurer la fonction dont il a la charge, nécessite que tous les systèmes qui l'influencent et que chacun des sous-systèmes qui le composent fonctionnent correctement (respectivement dépendance externe et interne), l'analyse se traduira par l'établissement des chemins de propagation des effets de défaillances potentielles à l'ensemble du procédé, et pour chacun des niveaux de la hiérarchie.

VI.2. ETABLISSEMENT DES RELATIONS DE DÉPENDANCE

VI.2.1. Règles de décomposition

L'analyse d'un système complexe est effectuée de façon hiérarchisée : à partir du système initial, il s'agit de décrire les principales fonctions qui permettent d'atteindre l'objectif principal, puis d'affiner le modèle en considérant les sous-systèmes qui le composent. Cette décomposition doit tenir compte des "règles" suivantes :

- A chaque sous-système est associé un objectif clairement spécifié,
- Chaque sous-système peut, à son tour, être décomposé en sous-systèmes et unités fonctionnelles, correspondant à la description des fonctions des composants élémentaires,
- Toute unité fonctionnelle remplit un objectif et un seul,
- L'état d'un système peut être évalué, en continu, au moyen des valeurs fournies par les capteurs ou estimateurs qui renseignent sur son état de fonctionnement,

- A chaque unité fonctionnelle est associée une caractéristique observable qui qualifie son état de fonctionnement,
- Si une unité fonctionnelle est partagée par deux systèmes, son dysfonctionnement peut entraîner deux défaillances simultanées,
- le modèle de représentation obtenu est hiérarchisé.

Penchons-nous sur le problème de la limite de décomposition (jusqu'où aller dans la décomposition) : le niveau de décomposition le plus bas doit comporter l'ensemble des unités fonctionnelles élémentaires (unité de relevage, de réglage du débit de fluide, et correspondant, au niveau physique, à la fonction d'une pompe ou d'une vanne), à chacune desquelles est associée une caractéristique observable (mesure de débit de relevage, mesure d'ouverture de vanne).

VI.2.2. Règles de parcours de l'arborescence

Une fois l'arborescence établie, il s'agit de définir les relations de dépendance entre systèmes fonctionnels. Cette seconde phase d'analyse s'appuie sur la décomposition fonctionnelle hiérarchisée décrite précédemment.

D'un point de vue purement opératoire, plusieurs approches pourraient être envisagées pour en effectuer une analyse exhaustive. La première consisterait à ne considérer que le niveau le plus bas de la décomposition, et dans ce cas considérer chacune des paires possibles de systèmes. Cela conduirait alors à analyser une quantité rapidement trop importante de combinaisons dans le cas d'installations de taille moyenne voire de grande taille.

Une seconde approche consisterait à ne considérer que le niveau le plus bas mais à effectuer le regroupement des unités fonctionnelles en groupes d'unités sœurs. L'analyse reviendrait ici à passer en revue l'ensemble des paires possibles à l'intérieur de chacun des groupes formés. Une fois cette étape réalisée, il s'agirait de rassembler les groupes frères, de mettre en évidence les relations de dépendance entre unités fonctionnelles appartenant à des regroupements différents, ainsi de suite jusqu'à parvenir à un unique groupe d'unités fonctionnelles qui compose le procédé dans sa globalité. Si cette approche est plus structurée que la première, elle ne met toutefois pas à l'abri d'oubli. C'est pourquoi une troisième approche, hiérarchique cette fois, lui sera préférée.

L'approche hiérarchisée consiste à décrire les relations d'influence à tous les niveaux d'abstraction. Elle permet de procéder par phases successives, d'affiner progressivement la description des relations de dépendance entre systèmes hiérarchisés. Deux démarches sont envisagées : l'approche descendante, qui, partant du système global, permet de décrire, pour chaque niveau d'abstraction, les relations de dépendance existant entre systèmes ; l'approche ascendante qui consiste à décrire les relations entre unités fonctionnelles, puis à remonter d'un niveau et à en déduire les relations de dépendance existant pour les niveaux supérieurs.

La démarche proposée est ici descendante. Elle permet d'établir les relations entre systèmes de haut niveau, puis d'affiner ces mêmes relations dans les niveaux inférieurs (voir les figures A.VI.3, A.VI.4 et A.VI.5). Notons que plus on descend dans la hiérarchie, plus les relations sont nombreuses. Ainsi, à une relation exprimée dans un niveau (i), peuvent correspondre plusieurs relations au niveau (i+1).

Pour un système qui se décompose en une arborescence à quatre niveaux, la démarche proposée est décrite à travers les étapes 1 et 2.

Etape 1

Partant du niveau le plus haut de la décomposition, il s'agit d'établir les relations de dépendance fonctionnelle entre systèmes frères, et ce, pour chacun des niveaux. Opérer de la sorte jusqu'à parvenir au niveau le plus bas.

Cette étape est schématisée en figure A.VI.2.

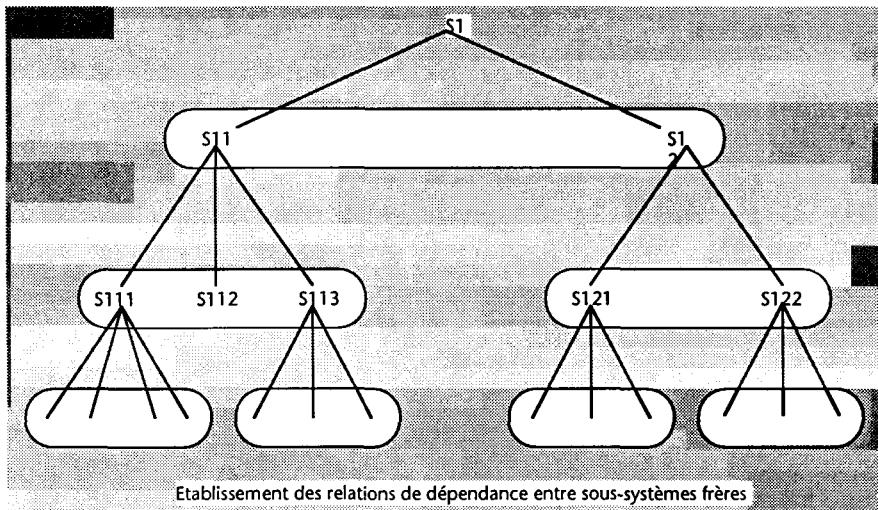


Figure A.VI.2 : Première étape d'analyse.

Dans cet exemple, les relations entre les nœuds S_{11} et S_{12} issus d'un même nœud père S_1 sont analysées. De même pour les nœuds S_{111} , S_{112} et S_{113} qui proviennent de la décomposition du nœud S_{11} .

Etape 2

Reprendre au niveau le plus haut de la décomposition. Considérer les relations entre S_{11} et S_{12} et reporter les influences ainsi établies au niveau directement inférieur. Cela facilite grandement l'analyse des dépendances entre les groupes formés d'une part par S_{111} , S_{112} et S_{113} , et les systèmes S_{121} et S_{122} d'autre part. De même, pour établir les relations entre les nœuds S_{111i} et S_{113j} , il suffit de reporter les relations établies au niveau des nœuds pères S_{111} à S_{113} (idem pour les relations entre nœuds S_{121i} et S_{122j} , qui héritent des relations définies au niveau des nœuds S_{121} et S_{122}). Ceci est schématisée en figure A.VI.3.

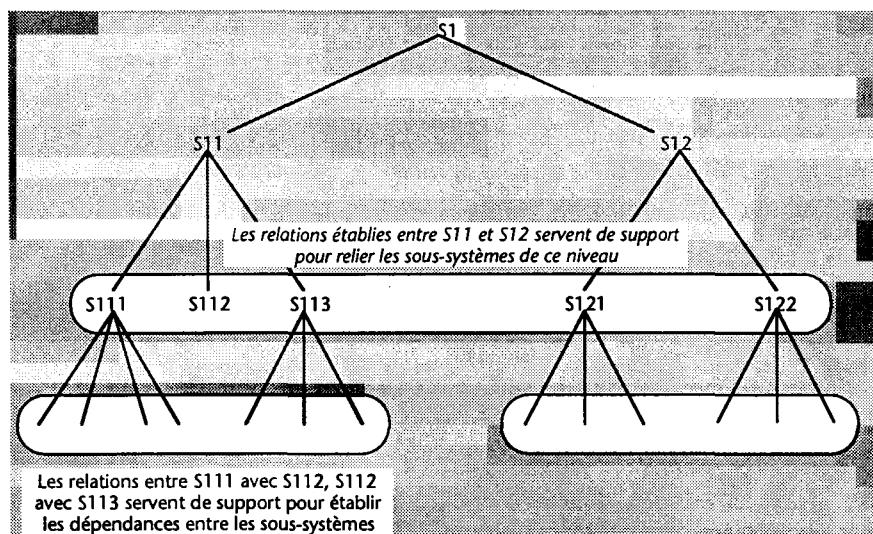


Figure A.VI.3 : Seconde étape d'analyse.

Le report des influences définies en étape 1 vers les niveaux inférieurs se poursuit jusqu'à définir les influences liant les nœuds du niveau le plus bas de décomposition à partir des relations d'influence définies au niveau des nœuds S11 et S12. Il s'agit, en somme, d'effectuer des cycles d'analyse descendants, qui consistent à préciser à des niveaux de décomposition de plus en plus détaillés, les liens de dépendance établis en première phase.

Après avoir effectué l'analyse des relations entre les nœuds S111, S112 et S113 d'une part, et S121 et S122 d'autre part, l'étape ultérieure consistera à reporter ces relations au niveau directement inférieur, c'est-à-dire le niveau le plus bas de l'arbre (figure A.VI.4). L'analyse des dépendances se termine une fois que toutes les relations à ce niveau ont été établies.

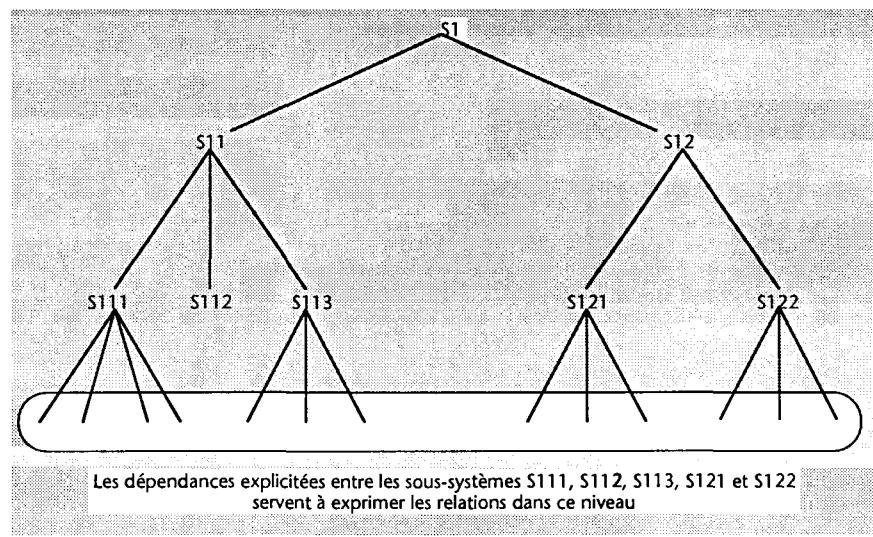


Figure A.VI.4 :Troisième étape d'analyse.

L'approche descendante envisagée ici permet de partir du niveau le plus global, et ainsi d'exprimer des influences globales entre systèmes, puis d'affiner de manière progressive ces relations au fur et à mesure que l'on descend dans la description des sous-systèmes. Elle permet, en cela, d'avoir à chaque phase un cadre d'analyse, une référence à laquelle il est possible de se reporter.

VI.2.3. Règles de description des relations

Une fois la décomposition du processus effectuée, il est maintenant possible de mettre en évidence les relations de dépendance entre systèmes fonctionnels. Mais il faut toutefois suivre certaines règles, dont la plus importante est : ne considérer que les influences de proximité et éviter de décrire des relations qui ne correspondent pas à des liens physiques directs entre systèmes fonctionnels ; cela permet de réduire la complexité du graphe en éliminant les chemins redondants.

VI.2.4. Exemple

Les figures A.VI.5, A.VI.6 et A.VI.7 illustrent cette démarche par l'analyse fonctionnelle d'un procédé réel : le Prototype Evolutif de Vitrification.

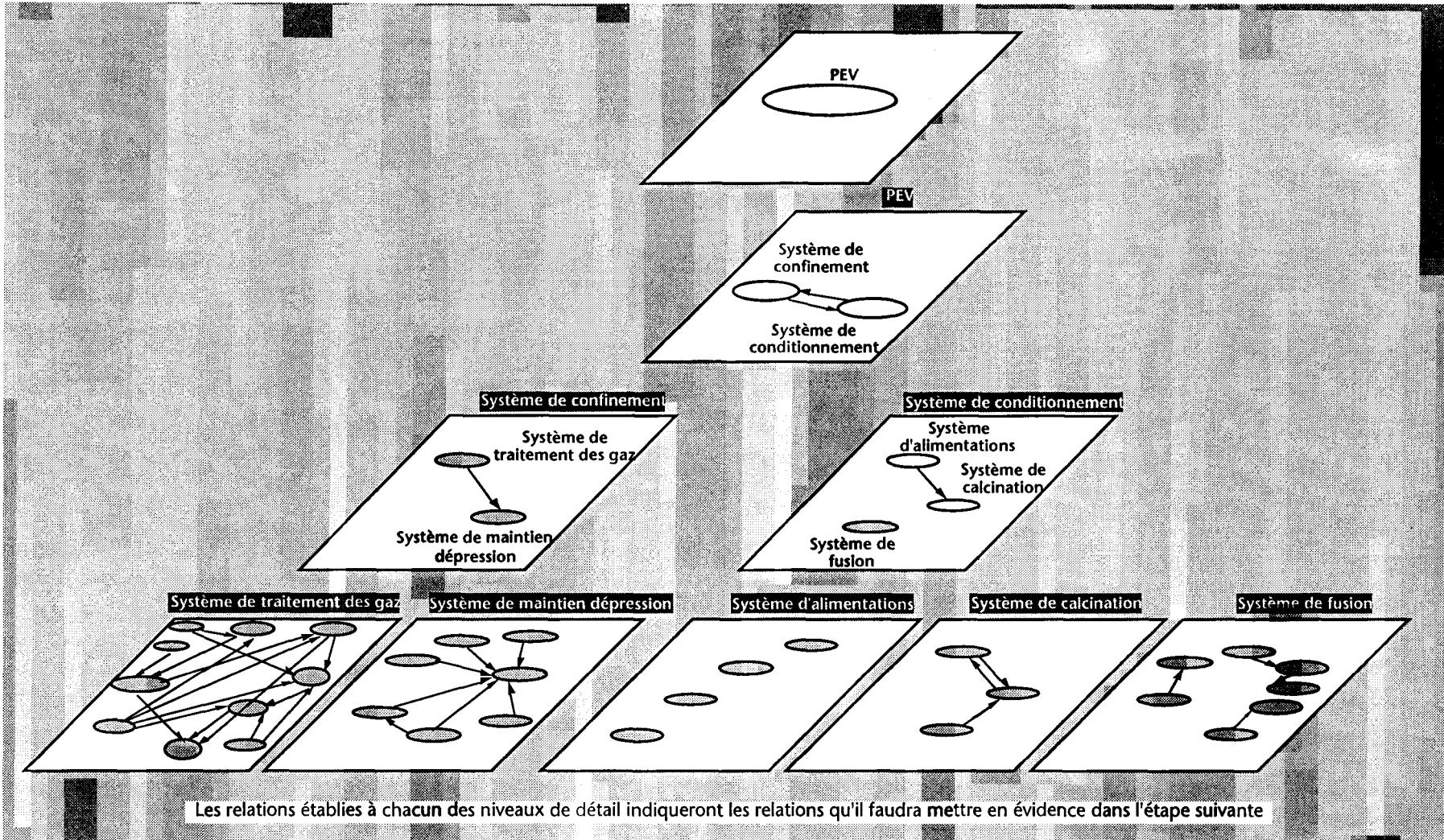
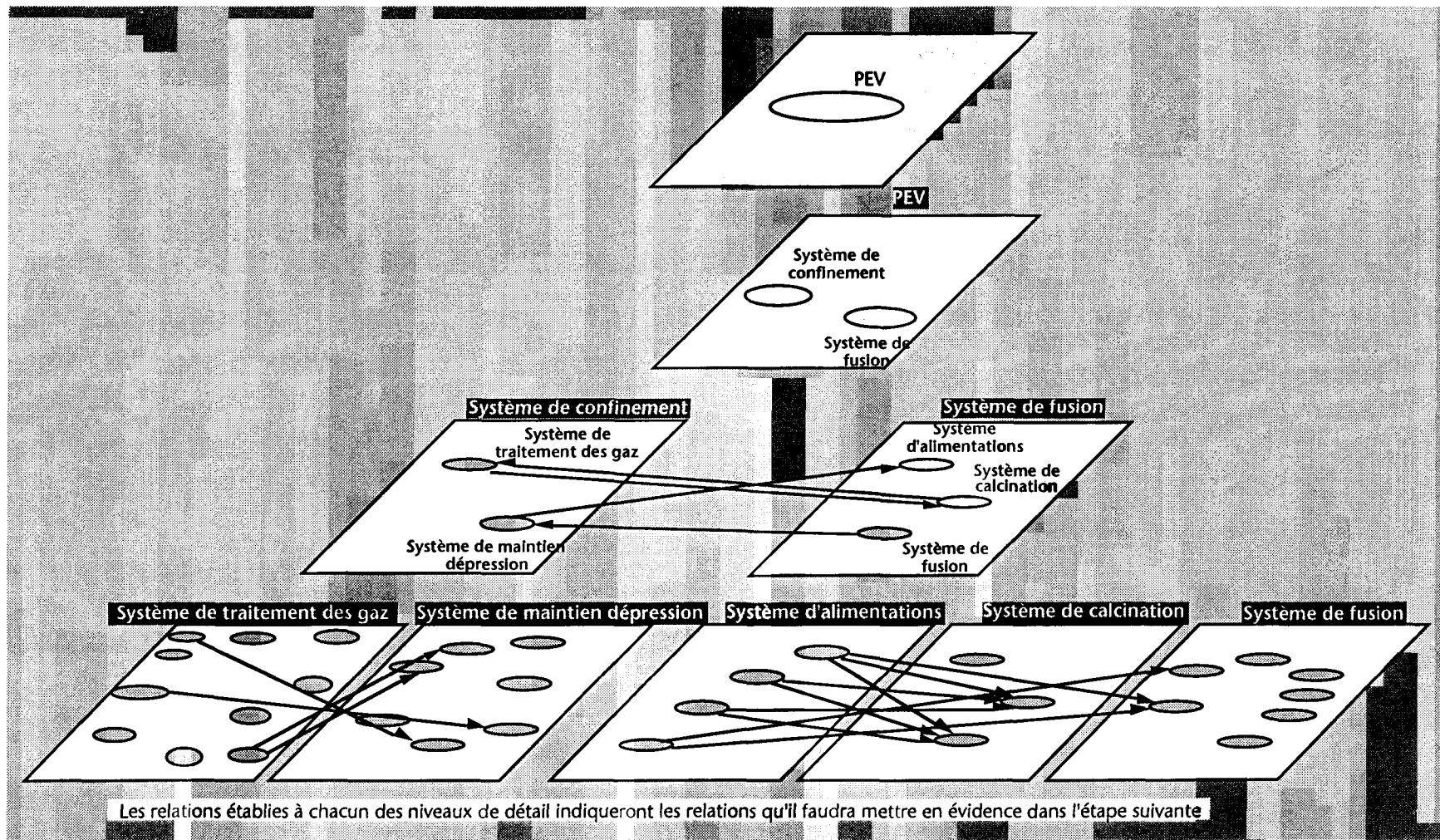
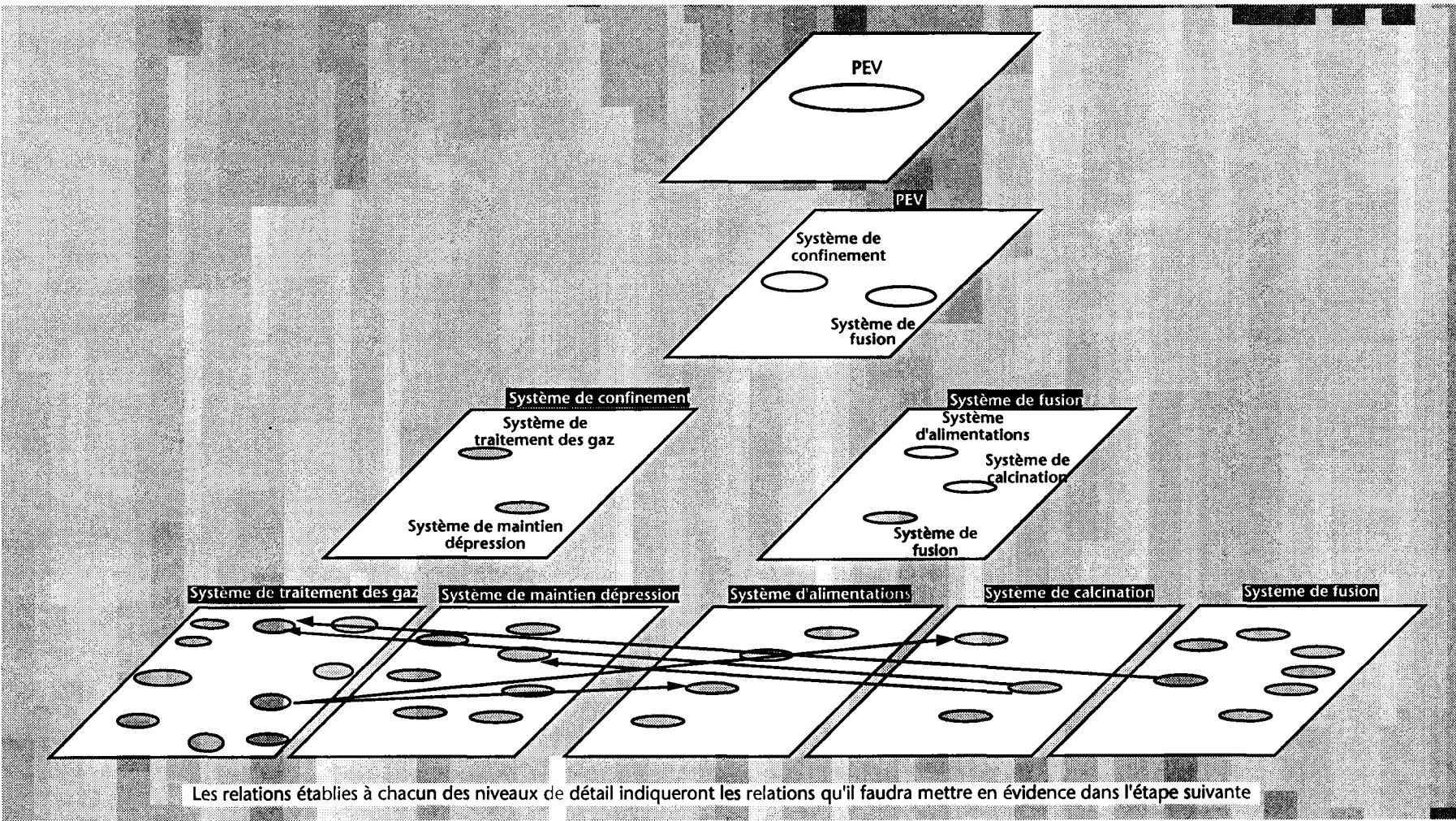


Figure A.VI.5 : Etape 1. Relations de dépendances entre systèmes frères.

Figure A.VI.6 : Etape 2. Instantiation des relations établies en étape 1.





Ainsi, il est possible de décrire les relations de dépendance entre systèmes en procédant de proche en proche, et ce, de façon descendante. L'algorithme correspondant pourrait s'écrire, en considérant une arborescence comportant "n" niveaux, et "x" un niveau quelconque :

*****Relations entre nœuds frères*****

Pour x=1 à n, faire :

Etablir les relations entre nœuds frères ;

Fin

*****Reports des relations entre frères dans les niveaux inférieurs*****

Tant que les relations établies au niveau 1 n'ont pas été reportées jusqu'au niveau n, faire :

Pour x=1 à n, faire :

Reporter les relations déjà établies au niveau i vers le niveau directement inférieur, sauf les relations qui viennent d'être établies au niveau supérieur;

Fin

Fin

ANNEXE VII : Analyse de dépendances sur une installation industrielle

L'étude des dépendances structuro-fonctionnelles a été menée sur le Prototype Evolutif de Vitrification. La présente annexe vise principalement la démonstration de faisabilité de la démarche d'analyse de dépendances. L'installation PEV est suffisamment importante pour permettre de juger de l'intérêt de la hiérarchisation du modèle structuro-fonctionnel.

Cette analyse est un prolongement de l'étude que nous avons menée sur le PEV dans le cadre du projet DIAGPEV. L'essentiel des connaissances a été collecté par entretiens auprès des opérateurs de conduite et des ingénieurs d'exploitation.

VII.1. DÉCOMPOSITION DU PEV

Les fonctions associées au PEV sont répertoriées dans les tableaux A.VII.1 à 5. Elles ont été regroupées, pour plus de lisibilité, en systèmes externes, passifs et régulés.

L'analyse qui est faite de cette installation est limitée aux appareillages et à l'instrumentation. Les conduits de transfert de matière et d'énergie pourront être ultérieurement pris en compte.

APPAREIL	FONCTION	VARIABLE MESURÉE	UNITÉ	SYSTÈME ENGLOBANT	
Vanne	Réglage débit pompe	% ouverture	Unité de réglage pression	Système de régulation dépression colonne lavage	
Pompe	Extraire les gaz		Unité déprimogène		
Capteur	Mesure de pression	PR 330.80.1	Unité de régulation pression col. lavage		
Régulateur [TDC PID n°2]	Maintenir une pression constante				
Vanne	Réglage du débit éjecteur	% ouverture	Unité de réglage	Système de régulation dépression dépoussiéreur	
Ejecteur	Propulser les gaz		Unité de propulsion des gaz		
Venturi	Mesure	Débit gaz			
Capteur	Mesure	PR 330.10.2	Unité de régulation pression		
Régulateur [TDC PID n°1]	Maintien d'une pression constante				
Régulateurs	Maintenir la température dans les bornes autorisées		Unité de régulation de la chauffe	Système de régulation chauffe calcinateur	
Capteurs	Mesure	TE 320.13.5 à 8			
Résistances chauffantes	Fournir la puissance de chauffe	WE 320.13.1 à 4	Unité de chauffe		
Régulateurs	Maintenir la température	Consignes	Unité de régulation de la chauffe		
Capteurs	Mesure	Températures extrêmes			
Inducteurs	Transforme l'induction en chaleur	WE 320.21.1 à 5	Unité d'induction	Système de régulation chauffe pot de fusion	
Sélecteurs de tension	Régler la puissance fournie	UE 320.21.1 à 5	Unité de distribution de tension		
Bouilleur	Chauffer le pied	TE 330.11.1	Unité de chauffe		
Pied	Stockage intermédiaire		Unité de stockage intermédiaire		
Régulateur (TDC)	Maintien niveau pied		Unité de régulation niveau	Système de régulation niveau dépoussiéreur	
Capteur de niveau	Mesure	NE 330.11.2			
Vanne	Commande appont en eau		Unité de réglage volume appont eau		
Trémie n°2	Stocker	BE 309.33	Unité de distribution		
Vibreur	Alimenter	Fréquence vibreur fixée en local	Unité d'alim. fritte	Système d'alimentation en fritte	
Godet	doser	Compteur 309.37.2	Unité de dosage		
Sas	Confiner	DPE 309.40	Unité de confinement		
Automate	Piloter		Unité de pilotage		

Tableau A.VII.1 : Les systèmes régulés du PEV.

APPAREIL	FONCTION	VARIABLE MESURÉE	UNITÉ	SYSTÈME ENGLOBANT	
Vanne	Réglage débit pompe	% ouverture	Unité de réglage pression	Système de régulation dépression colonne lavage	
Pompe	Extraire les gaz		Unité déprimogène		
Capteur	Mesure de pression	PR 330.80.1	Unité de régulation pression col. lavage		
Régulateur [TDC PID n°2]	Maintenir une pression constante				
Vanne	Réglage du débit éjecteur	% ouverture	Unité de réglage	Système de régulation dépression dépoussiéreur	
Ejecteur	Propulser les gaz		Unité de propulsion des gaz		
Venturi	Mesure	Débit gaz			
Capteur	Mesure	PR 330.10.2	Unité de régulation pression		
Régulateur [TDC PID n°1]	Maintien d'une pression constante				
Régulateurs	Maintenir la température dans les bornes autorisées		Unité de régulation de la chauffe	Système de régulation chauffe calcinateur	
Capteurs	Mesure	TE 320.13.5 à 8			
Résistances chauffantes	Fournir la puissance de chauffe	WE 320.13.1 à 4	Unité de chauffe		
Régulateurs	Maintenir la température	Consignes	Unité de régulation de la chauffe		
Capteurs	Mesure	Températures externes			
Inducteurs	Transforme l'induction en chaleur	WE 320.21.1 à 5	Unité d'induction	Système de régulation chauffe pot de fusion	
Sélecteurs de tension	Régler la puissance fournie	UE 320.21.1 à 5	Unité de distribution de tension		
Bouilleur	Chauder le pied	TE 330.11.1	Unité de chauffe		
Pied	Stockage intermédiaire		Unité de stockage intermédiaire		
Régulateur (TDC)	Maintien niveau pied		Unité de régulation niveau	Système de régulation niveau dépoussiéreur	
Capteur de niveau	Mesure	NE 330.11.2			
Vanne	Commande appont en eau		Unité de réglage volume appont eau		
Trémie n°2	Stocker	BE 309.33	Unité de distribution		
VibrEUR	Alimenter	Fréquence vibrEUR fixée en local	Unité d'alim. fritte	Système d'alimentation en fritte	
Godet	doser	Compteur 309.37.2	Unité de dosage		
Sas	Confiner	DPE 309.40	Unité de confinement		
Automate	Piloter		Unité de pilotage		

Tableau A.VII.2 : Les systèmes passifs du PEV.

APPAREIL	FONCTION	VARIABLE MESURÉE	UNITÉ	SYSTÈME ENGLOBANT
Cuve Pf 310.10	Stocker	VE 310.10.1	Unité de stockage Pf	Système d'alimentation Pf
Moteur de brassage	Brasser la cuve Pf	Intensité	Unité de brassage	
Pompe	Relevage primaire	Débit fixé localement	Unité de relevage primaire	
Pot tampon	Alimente l'air-lift 310.10.3		Unité tampon	
Air-lift 310.10.3	Relevage secondaire	Débit air local	Unité de relevage secondaire	
Roue doseuse	Dosage Pf	VE 310.30.5	Unité de dosage des Pf	
Cuve sucre	Stocker	BE 309.20	Unité de stockage	Système d'alimentation en sucre
Pompe 309.20.2	Relevage	Débit réglé en local	Unité de relevage	
Pot tampon	Alimente la pompe doseuse		Unité tampon	
Pompe doseuse	Dosage du sucre	QE 309.20	Unité de dosage	
Garde hydraulique	Mélanger Pf et recyclage		Unité de mélange Pf et recyclage	Système de mélange
Confluent			Unité de confluence	
Garde hydraulique	Barrière liquide entre gaz procédé et alimentations	NE 310.40	Unité de garde hydraulique	Système d'isolation alimentations et cœur du procédé
Cuve intermédiaire	Barrière liquide entre gaz procédé et sortie condensats		Unité tampon	Système d'isolation gaz procédé et sortie condensats
Pot de fusion	Constituer une masse de verre suffisante pour autoriser la coulée	Masse de verre		Système de fusion
Gaine de refroidissement inducteurs	Eviter la chauffe excessive des inducteurs	Températures d'entrée/sortie eau		Système de refroidissement inducteurs

Tableau A.VII.3 : Les systèmes passifs du PEV (suite).

APPAREIL	FONCTION	VARIABLE MESURÉE	UNITÉ	SYSTÈME ENGLOBANT
Alimentation en vapeur	Chauffer la solution en pied de colonne	Pression de vapeur en local		Système d'alimentation en vapeur
Alimentation en eau d'appoint dé poussiéreux	Maintenir le niveau constant	Débit calculé		Système d'alimentation en eau
Alimentation en eau d'appoint recombinaison	Récupérer les oxydes d'azote restants	Débit fixé en local	Unité d'alimentation en eau recombinaison	Système d'alimentation en eau permutée
Alimentation en eau d'appoint du lavage	Récupérer les oxydes d'azote restants	Débit fixé en local	Unité d'alimentation en eau de lavage	
Rejets condenseur	Evacuer les condensats	Débit calculé	Unité de rejet condensats	
Rejets recombinaison	Evacuer les solutions acides	Trop plein	Unité de rejet des solutions de recombinaison	Système de rejet liquide
Rejets lavage	Evacuer la solution de lavage	Trop plein	Unité de rejet des solutions de lavage	
Alimentation en air des Air-lifts et Ejecteur	Relever les solutions	Débit d'air fixé en local		Système d'alimentation en air
Alimentation en eau de refroidissement condenseur	Refroidir les gaz dans le condenseur	Débit fixé en local		Système d'alimentation en eau de refroidissement condenseur
Alimentation eau de refroidissement inducteurs	Refroidir les inducteurs	Débit fixé en local		Système d'alimentation; en eau de refroidissement inducteurs
Alimentation en électricité	Alimenter les appareils électriques			Système d'alimentation général en électricité
Groupe tournant	Fournir la puissance d'induction		Unité d'induction	Système de production de l'induction
Alimentation en argon	Brasser le pot de fusion	Débit d'argon en local		Système d'alimentation en argon
Air manchettes	Empêcher une fuite de poussières par le calcinateur	Débit air local		Système de confinement tube de calcination
Air balayage sas	Empêcher une fuite de poussières par le sas à frite	Débit air local		Système de balayage sas à frite

Tableau A.VII.4 : Les systèmes externes du PEV.

SOUS-SYSTÈMES	SYSTÈMES	FONCTIONS	OBJECTIFS	FONCTION	SYSTÈME
Système de régulation niveau dé poussiéreux	Système de traitement des gaz	Piéger les poussières d'oxydes (actinides et produits de fission) véhiculées par les gaz Piéger les oxydes d'azote dans la phase aqueuse	Confiner l'installation	SERVIR DE BANC DE TEST DES CHOIX DE PROCÉDÉ	PEV
Système de dépoussièrage					
Système d'alimentation en vapeur					
Système de recombinalson					
Système de condensation					
Système de lavage					
Système d'alimentation en eau permuteée					
Système de rejet liquide					
Système d'alimentation en eau de refroidissement condenseur					
Système d'alimentation en air					
Système de régulation dépression colonne lavage	Système de maintien en dépression de l'installation	Forcer le cheminement des gaz issus de la calcination vers le système de traitement des gaz	Vitrifier les Produits de Fission		
Système de régulation dépression dé poussiéreux					
Système de dépression installation					
Système de confinement tube de calcination					
Système d'isolation alimentations et cœur du procédé					
Système d'isolation gaz procédé et sortie condensats	Système de calcination	Préparer les oxydes de Pf pour les incorporer dans la matrice de verre			
Système de balayage sas à fritte					
Système de régulation chauffe calcinateur					
Système de préparation du calcinat					
Système de dilatation tube	Système de fusion	Incorporer le calcinat dans le verre en fusion			
Système de régulation chauffe pot de fusion					
Système de coulée					
Système d'incorporation fritte-calcinat					
Système de production de l'induction					
Système de brassage à l'argon					
Système de stockage final					
Système de refroidissement inducteurs	Système d'alimentations	Fournir au calcinateur les éléments constitutifs du verre			
Système d'alimentation en eau de refroidissement					
Système d'alimentation en fritte					
Système d'alimentation en sucre					
Système de dosage du recyclage					
Système d'alimentation Pf					
Système de mélange					

Tableau A.VII.5 : Classification des systèmes.

VII.2. RELATIONS DE DÉPENDANCES ET GRAPHE DE CAUSALITÉ

Les relations de dépendance sont établies conformément à la démarche descendante décrite jusqu'ici. Pour que cette description soit complète, il faut ajouter un niveau de détail au modèle, dans lequel sont représentées les unités fonctionnelles.

L'analyse des dépendances s'effectue en quatre étapes. Elle exploite les relations d'influence qui ont été déterminées dans les niveaux de raffinement supérieurs. L'étape 1 permet de déterminer l'ensemble des influences entre unités sœurs (figure A.VII.1). Les étapes 2, 3 et 4 permettent de relier les diverses unités de sous-systèmes différents, mais appartenant à un même système (figures A.VII.2, A.VII.3 et A.VII.4). Nous ne présentons ici que le niveau de décomposition du PEV le plus bas, c'est-à-dire celui qui regroupe l'ensemble des unités structuro-fonctionnelles.

La structure causale résultante est déduite du réseau de dépendances global (figure A.VII.5). Dans ce modèle, les nœuds correspondent aux paramètres procédé, et les arcs les relations d'influence qui les relient. Les variables grisées sont visualisées en local, elles ne sont donc pas transmises en salle de contrôle.

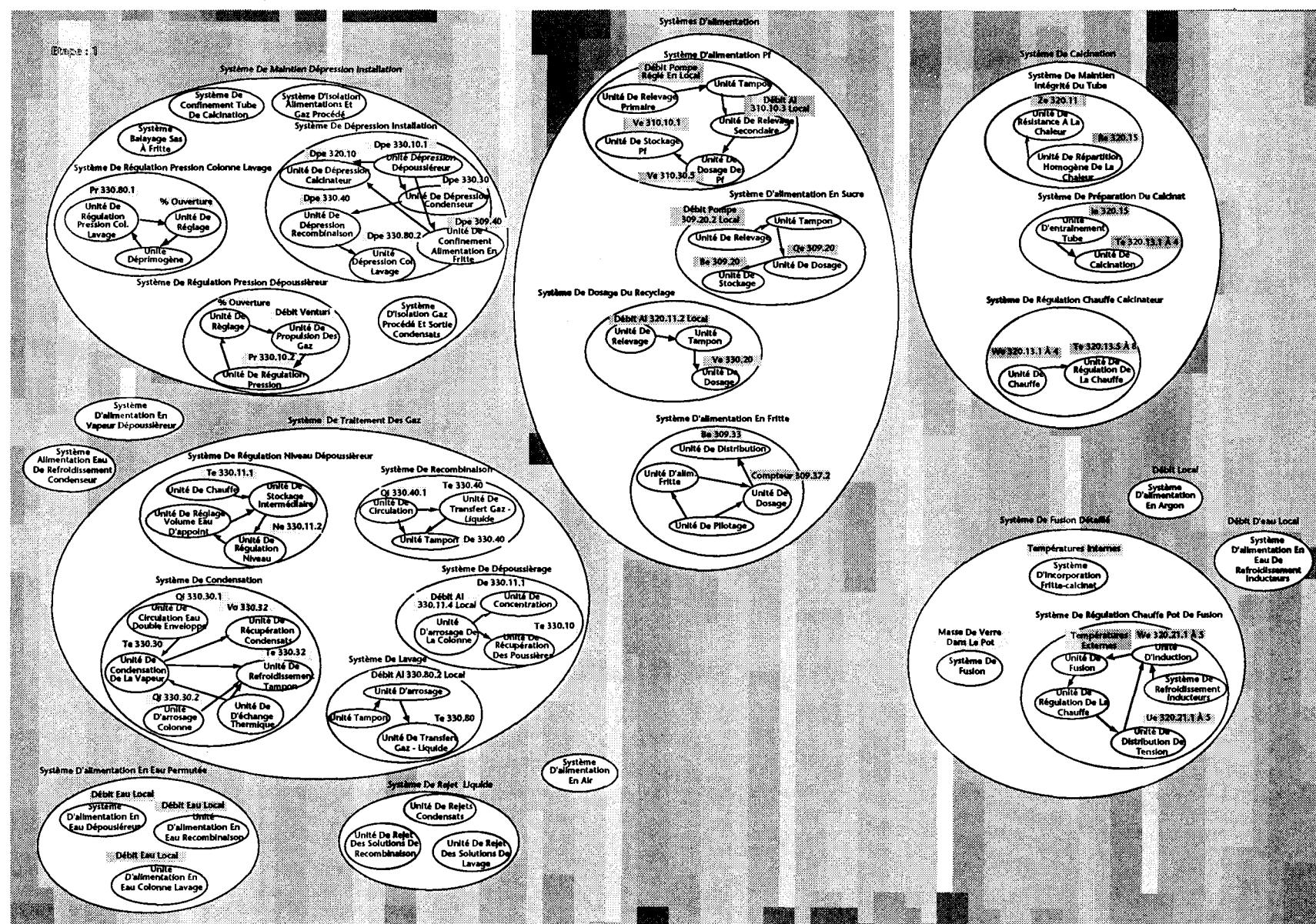


Figure A.VII.2 : Seconde étape d'analyse des dépendances sur le PEV.

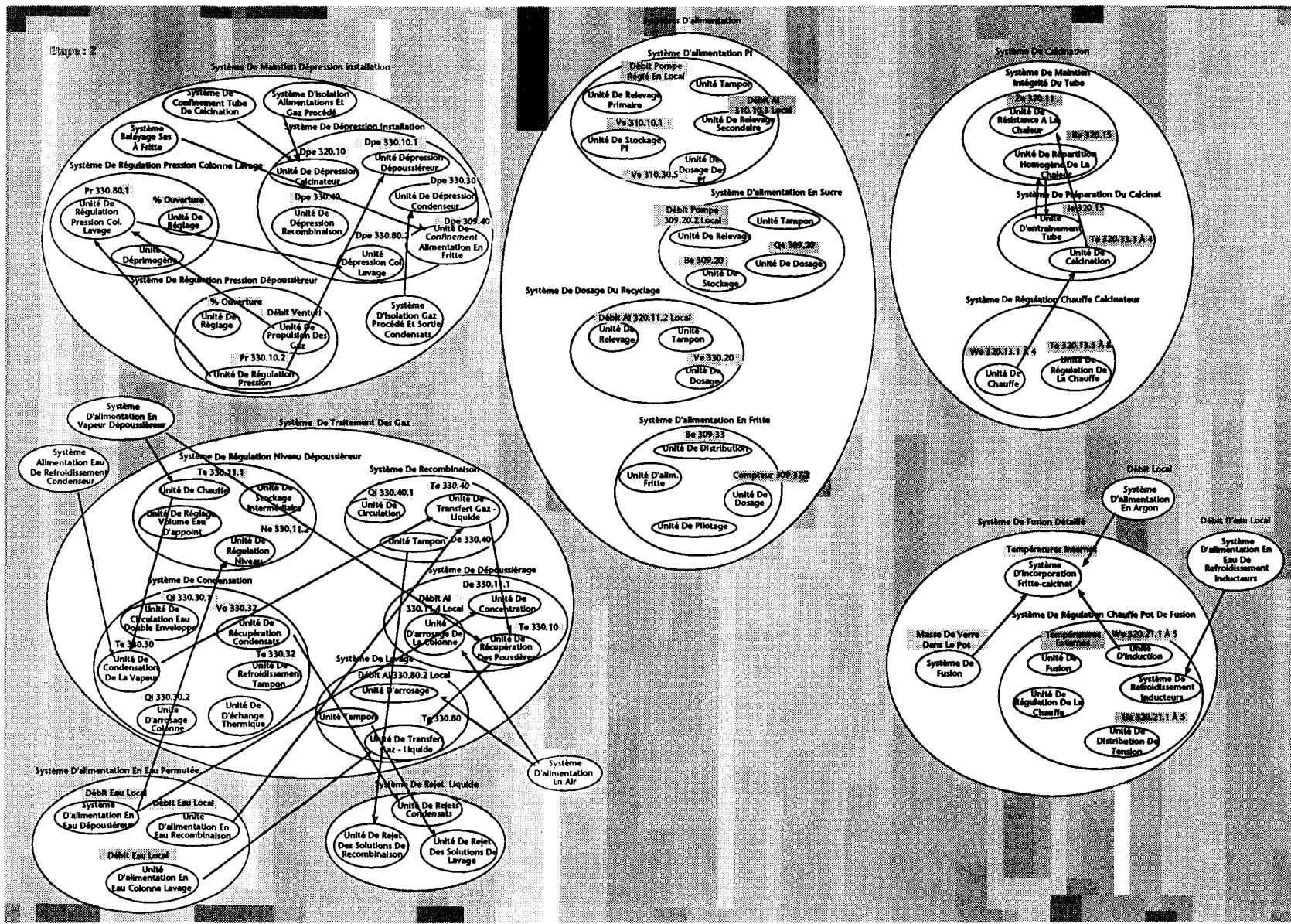


Figure A.VII.3: Troisième étape d'analyse des dépendances sur le PEV.

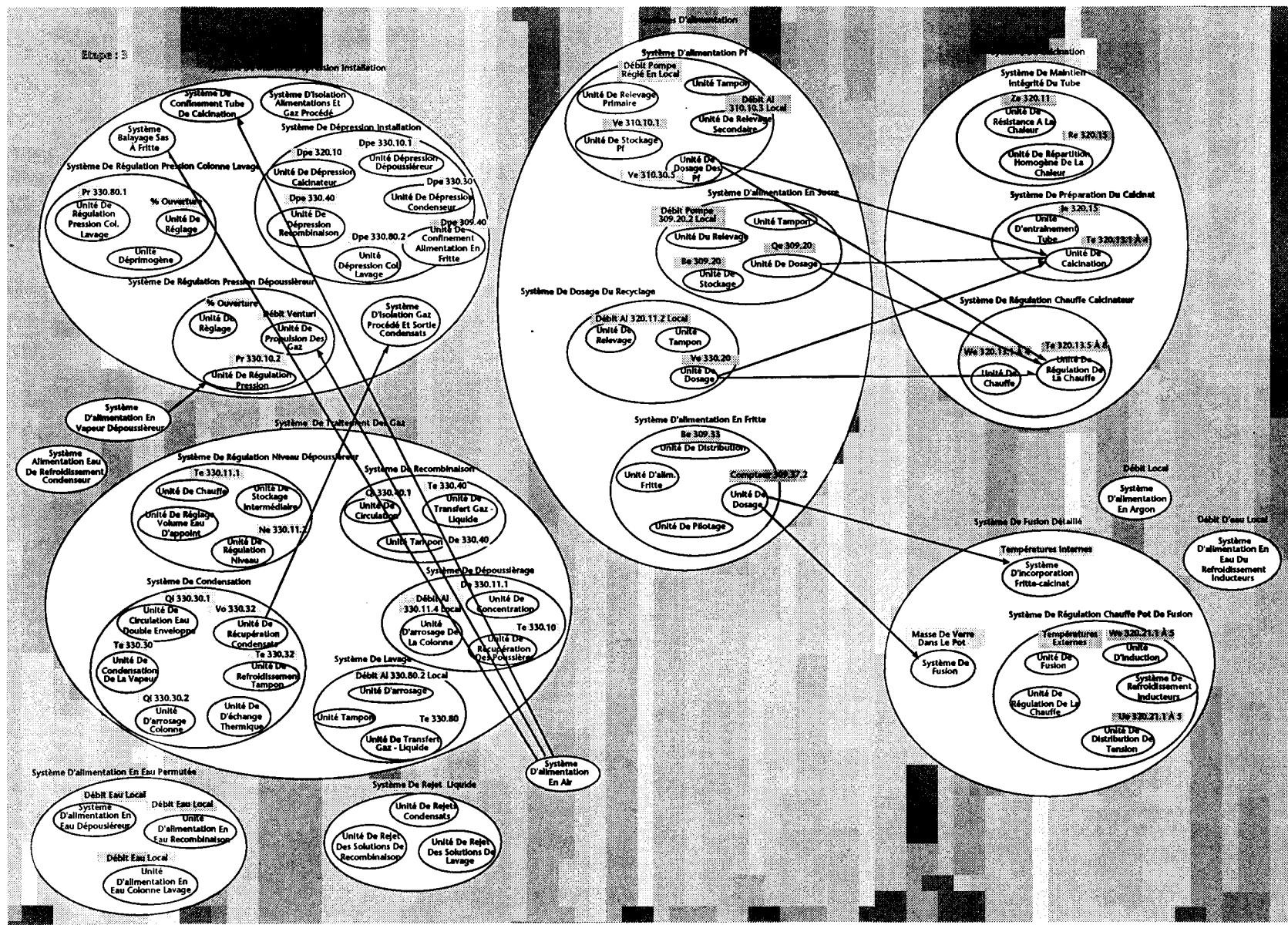
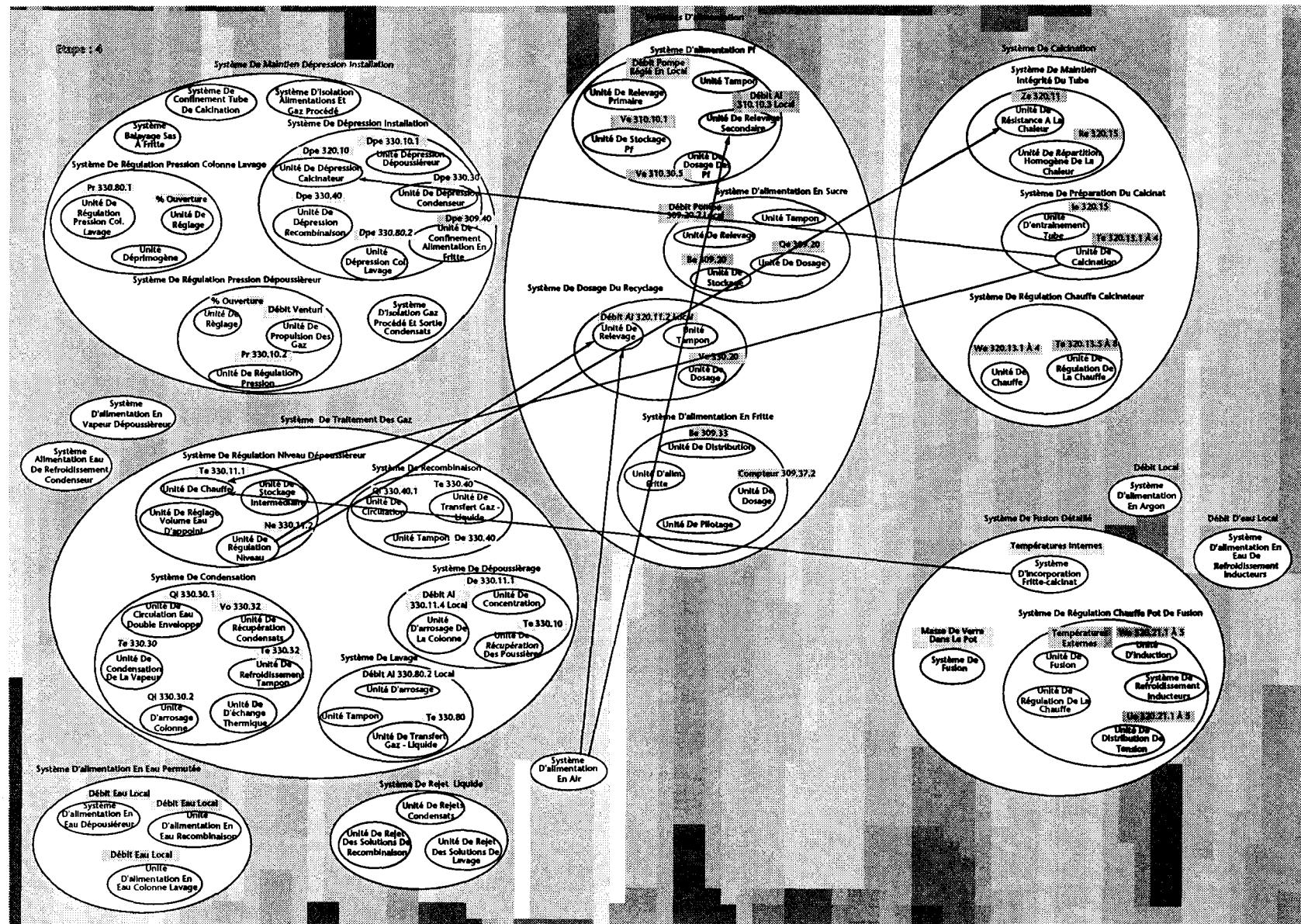


Figure A.VII.4 : Quatrième étape d'analyse des dépendances sur le PEV.



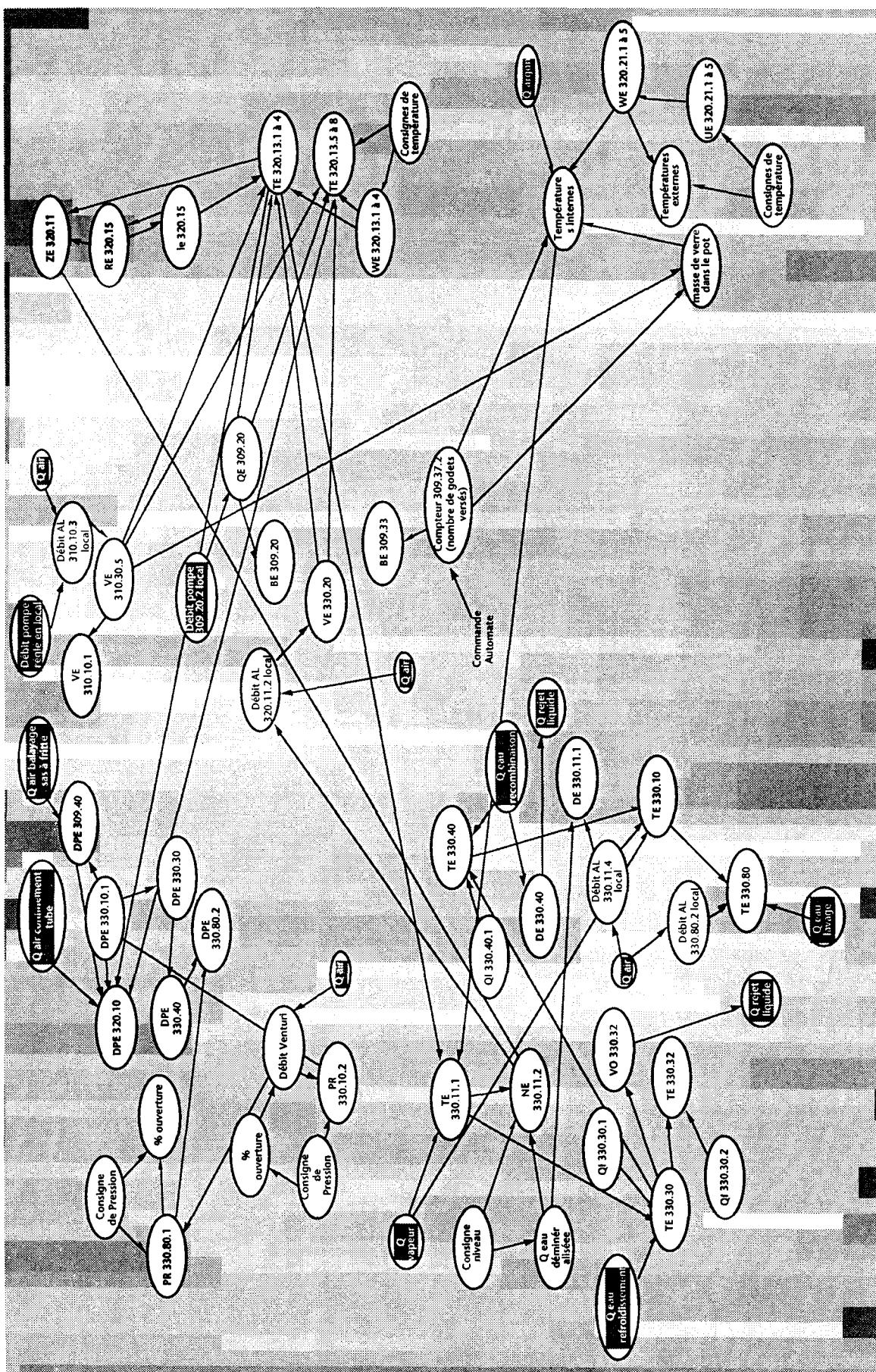


Figure A.VII.5 : Structure causale résultante.