

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

**Département du génie de l'environnement
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement**

**THÈSE DE MAGISTER
En Génie de l'Environnement
Option Génie de l'Environnement**

THEME

**Contribution à l'utilisation des systèmes experts
dans le domaine de traitement des eaux potables**

**Présentée par :
Mme A. BAKALEM épouse DJEMAI**

Membres du jury

Président:	Mr A. KETTAB	Professeur	ENP
Examinatrice :	M ^{me} .O BELMOKHTAR	Maître de conférences	ENP
Examineur :	Mr. H. AZZOUNE	Maître de conférences	USTHB
Examineur :	Mr. L. LALLEM	Maître de conférences	Université d'Alger
Invitée:	M ^{me} .K.DJOUADI	Chargée de cours	ENP
Invité:	Mr. A. BOUDJENOUNE	Directeur	Station de BOUDOUAOU
Promoteur:	Mr. R. KERBACHI	Professeur	ENP
Co-promoteur:	Mr. A. CHERGUI	Chargé de cours	ENP

Septembre 2005

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au laboratoire des sciences et techniques de l'environnement du département génie de l'environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger sous la direction de Monsieur R. Kerbachi (professeur à l'ENP) et Monsieur A.Chergui (chargé de cours à l'ENP).

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma gratitude pour les conseils avisés qu'ils m'ont prodigué tout au long de cette étude, pour le sérieux, la gentillesse et la patience dont ils ont fait preuve à mon égard.

Je présente l'expression de ma reconnaissance et mes remerciements aux membres du jury:

Monsieur A. Kettab, Professeur à l'ENP de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Madame O. Belmokhtar, maître de conférences à l'ENP ainsi que Messieurs L. Lallem, maître de conférences à l'université de Caroubier, et H. Azzoune, maître de conférences à l'USTHB de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce modeste travail.

Madame K. Djouadi (chargé de cours à l'ENP,) pour toute l'aide qu'elle m'a apportée, ainsi que pour tous ses conseils avisés, ses remarques pertinentes et ses encouragements, et d'avoir accepté notre invitation à participer au jury.

Monsieur A. Boudjenoune (Directeur de production de l'ADE et ex Directeur de la station de BOUDOUAOU) d'avoir accepter de m'accueillir au sein de l'usine, et d'avoir mis à ma disposition toutes les données nécessaires à la réalisation de ce travail, et d'avoir accepté notre invitation à participer au jury.

Mes remerciements s'adressent tout particulièrement à M. N. Dellala, chef de service exploitation pour tout l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour sa patience, sa disponibilité et ses encouragements.

Ma reconnaissance va également à tout le personnel de la station de BOUDOUAOU.

J'exprime ma reconnaissance à Madame D. Tali-maamar pour toute la documentation qu'elle m'a fourni et pour son dévouement au tout début de cette thèse.

Je remercie également toutes les personnes qui ont croisé ma route durant la réalisation de ce travail pour l'aide qu'elles m'ont apportés; entre autre :

Monsieur R. Hartani maître de conférence à l'INA; Monsieur Berbar enseignant à l'USTHB; Monsieur Nouali du CERIST et bien d'autres encore.

J'exprime ma sympathie à tous les membres du département de génie de l'environnement de l'ENP, et plus particulièrement Mahfoudh, technicien du département et Hamida la secrétaire du département et tous mes amis (es).

Je remercie tout particulièrement, Monsieur M. Bakalem, Directeur de la logistique à l'ISGP, et surtout mon frère, pour tous les conseils qu'il m'a apporté pour l'orientation de ce travail, et pour toutes les critiques constructives qu'il m'a faites.

Monsieur S. Djemai, maître assistant à l'USTHB, et surtout mon mari et père de mes enfants a relu tant sur la forme que sur le fond ce mémoire. Il a toujours soutenu cette entreprise qu'est la conception et la rédaction de cette thèse; pour tout cela, est-il vraiment utile de dire que je le remercie ?

LISTE DES PRINCIPAUX SIGLES ET ABRÉVIATION.

M.E.S : Les matières en suspension.

DBO₅ : Demande biologique en oxygène.

DCO : Demande chimique en oxygène.

MO : Matière organique

COT : Carbone organique total.

COA : Carbone organique assimilable.

SEC : Substances extractibles au chloroforme.

IA : Intelligence artificielle.

Ca²⁺: calcium

Mg²⁺: magnesium

Na⁺: sodium

K⁺:potassium

Fe²⁺: Fer.

NH₄⁺: Ammonium.

SO₄²⁻: Sulfates

Cl⁻: Chlorures

NO₃⁻: Nitrates

NO₂⁻: Nitrites

T° : Température

pH : potentiel d'hydrogène

SE : Système expert

G.S.E : Générateur de système expert

S.G.B.D : Système de gestion de base de données.

MDBS: Micro Data Base System

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Les principales chaînes de traitement	21
Figure II-1 : Typologie des systèmes experts	29
Figure II-2 : Structure de base d'un système expert	30
Figure II-3 : Cycle élémentaire de fonctionnement d'un moteur d'inférence	31
Figure II-4 : Chaînage arrière en profondeur d'abord	33
Figure II-5 : Chaînage avant pour prouver le fait S	34
Figure II-6 : Exploitation d'arbre en largeur d'abord	36
Figure II-7 : Exploitation d'arbre en profondeur d'abord	37
Figure II-8 : Le système expert et ses interfaces	38
Figure III-1 : Spirale de développement	64
Figure IV-1 : Photo d'une vue sur le barrage de Keddara.....	68
Figure IV-2 : Photo d'une vue aérienne sur la station de traitement des eaux potables de Boudouaou.....	70
Figure IV-3 : Diagramme fonctionnel de la station de traitement BOUDOUAOU.....	71
Figure IV-4 : Le processus d'extraction de connaissances	85
Figure IV-5 : Structure du générateur GURU	89
Figure IV-6 : Module diagnostique de SEXTEAU	93
Figure IV-7 : Représentation d'une partie d'un arbre de décision de la sous-base Turbidité .	98
Figure IV-8 : Schéma de la démarche diagnostique du système SEXTEAU	104

LISTE DE TABLEAUX

Tableau I-1 : Qualité des eaux distribuées. Réglementation suivant les pays	12
Tableau I-2 : Norme algérienne de potabilité des eaux de consommation	13
Tableau II-1 : Comparaison des structures des programmes classiques et des systèmes experts.....	28
Tableau II-2 : Comparaison des méthodes de représentation de connaissances.....	45
Tableau II-3 : Les systèmes experts existants dans les différents domaines	51
Tableau IV-1 : Évaluation de l'application en cours de développement	79
Tableau IV-2 : Comparaison des différents générateurs de systèmes experts	88

TABLE DES MATIÈRES*Liste des abréviations**Liste des figures.**Liste des tableaux*

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PROBLÉMATIQUE.....	4
CHAPITRE I : PRINCIPES GÉNÉRAUX DE TRAITEMENT DES EAUX POTABLES	8
I.1- Introduction.....	8
I.2- Objectifs de traitement des eaux de consommation et normes de potabilité.	9
I.3- Les indicateurs de qualité des eaux distribuées	10
I.3.1- Les indicateurs physico-chimiques	10
I.3.2- Les indicateurs de qualité bactériologiques.	16
I.4- Traitement des eaux de consommation.	17
I.4.1- Classement des traitements.	17
I.4.2- les processus unitaires de traitement.	19
1- La préoxydation.	19
2- La clarification.	20
2. a- La coagulation – Flocculation.	20
2. b- La décantation.	22
2. c- La flottation.	22
2. d- La filtration.	23
3- L'adsorption.....	24
4- La neutralisation au pH d'équilibre.	24
5- La désinfection.....	25
I.5- conclusion.	26
CHAPITRE II : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET SYSTÈMES EXPERTS	27
II.1- Introduction.....	27
II.2- Systèmes experts.....	27
II.2.1- Définition.....	27
II.2.2- Objectifs communs aux systèmes experts.	27
II.2.3- Principales différences ente programmation classiques et systèmes experts.....	27
II.2.4- Typologie des systèmes experts.....	28

II.2.5- Structure de base d'un système expert.....	30
II.2.5.1- Base de « connaissances ».....	30
II.2.5.2.- Moteur d'inférence.....	31
II.2.6 - Critères de différenciation des moteurs d'inférences.....	32
II.2.6.1- Classement par modes d'invocation des règles.....	32
II.2.6.2- Classement par type de stratégies de résolution.....	35
II.2.6.3- Classement par ordre du moteur.....	37
II.2.7- Les interfaces.....	37
II.2.8- Les outils de développement de système expert.....	38
A.1- Les langages de programmation classique.....	38
A.2- Les langages de programmation de l'IA.....	39
A.3- Les langages orientés objets.....	39
A.4- Les générateurs de systèmes experts (Shell).....	39
II.2.9- Les étapes de développement d'un système expert.....	41
II.2.9.1-Etape d'acquisition des connaissances.....	41
II.2.9.2- Etape de représentation et implémentation des connaissances.....	41
II.2.9.2.1. Les techniques de représentation des connaissances.....	42
II.2.9.2.2. Les méta-connaissances.....	46
II.2.9.2.3 La représentation de l'incertain.....	46
II.2.9.3.Étape de vérification.....	47
II.2.9.4. Étape de validation.....	47
II.2.10- Le prototypage.....	48
II.2.11- Critères d'évaluation de la faisabilité d'une application.....	48
II.3- Les systèmes experts réalisés dans les différents domaines autres que le traitement des eaux.....	50
II.4- Conclusion.....	52
 CHAPITRE III : LES APPLICATIONS EXISTANTES ET POTENTIELLES DES SYSTÈMES EXPERTS DANS L'INDUSTRIE DE L'EAU.....	
III.1- Introduction.....	53
III.2- Évaluation de l'intérêt d'une application de système expert en traitement des eaux.....	54
III.3- Les applications potentielles des systèmes experts dans le domaine de l'eau...	56
III.3.1- l'Utilisateur projeté.....	56
III.3.2- Sources de Connaissance.....	57

III.3.3- Les applications possibles dans les installations de traitement des eaux	57
1- Le fonctionnement.....	57
2- Les réparations.....	58
3- L'entretien.....	58
4- Organisation et gestion.....	59
5- La Formation.....	59
6- Le Design.....	59
II.3.4- les principaux systèmes experts réalisés dans le domaine de l'eau.....	60
III.4- Profondeur de la Connaissance.....	63
III.5- Largeur de la Connaissance.....	65
III.6- L'interface utilisateur.....	65
III.7- Compatibilité avec les autres logiciels.....	65
III.8- Effet de la dimension de l'installation de traitement.....	65
III.9- Les considérations futures.....	66
III.10- Conclusion.....	67
 CHAPITRE IV : DÉVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE DE SYSTÈME EXPERT LE SEXTEAU	
IV.1- Introduction.....	68
IV.2- Description de la station.....	68
IV.2.1- Fonctionnement hydraulique de la station.....	72
IV.3- Justification technique du recours à l'intelligence artificielle et aux systèmes experts.....	73
IV.4- Développement du prototype de système expert d'aide au fonctionnement de la station de BOUDOUAOU : SEXTEAU.....	74
IV.5- Critères d'évaluation de la faisabilité de l'application.....	76
IV.6- Processus de développement du prototype SEXTEAU.....	80
IV.6.1- Acquisition de la connaissance.....	80
IV.6.2- Choix de l'outil de développement.....	86
IV.6.3- La représentation des connaissances du système SEXTEAU à l'aide de GURU.....	91
IV.6.4- Conceptualisation et représentation des connaissances.....	92
A.1- Sous base TURBIDITE.....	94
A.2- Sous base OXYDANT RESIDUEL.....	95
A.3- Sous base COULEUR.....	96
IV.7- Le module d'acquisition des connaissances.....	99

IV.8- L'incertain dans SEXTEAU.	100
IV.9- La démarche diagnostic du système SEXTEAU.	103
IV.10- Mise en œuvre de SEXTEAU.	105
IV.10.1- La stratégie de raisonnement.	105
a) La rigueur de raisonnement.	105
b) L'ordre de sélection des règles.	105
c) La stratégie d'évaluation de la prémisse.	106
IV.10.2- La capacité d'explication de son raisonnement	107
a- Explication au cours de la consultation.	107
b- Explication après une consultation.	107
IV.11- Vérification et validation du prototype de système expert SEXTEAU.	108
IV.12- méthodologie de développement d'un système expert en traitement des eaux.	110
IV.12.1- Conditions préliminaires	110
IV.12.2- conditions de mise en œuvre du processus	111
IV. 13- Conclusion.	118
CONCLUSION GÉNÉRALE.	119

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

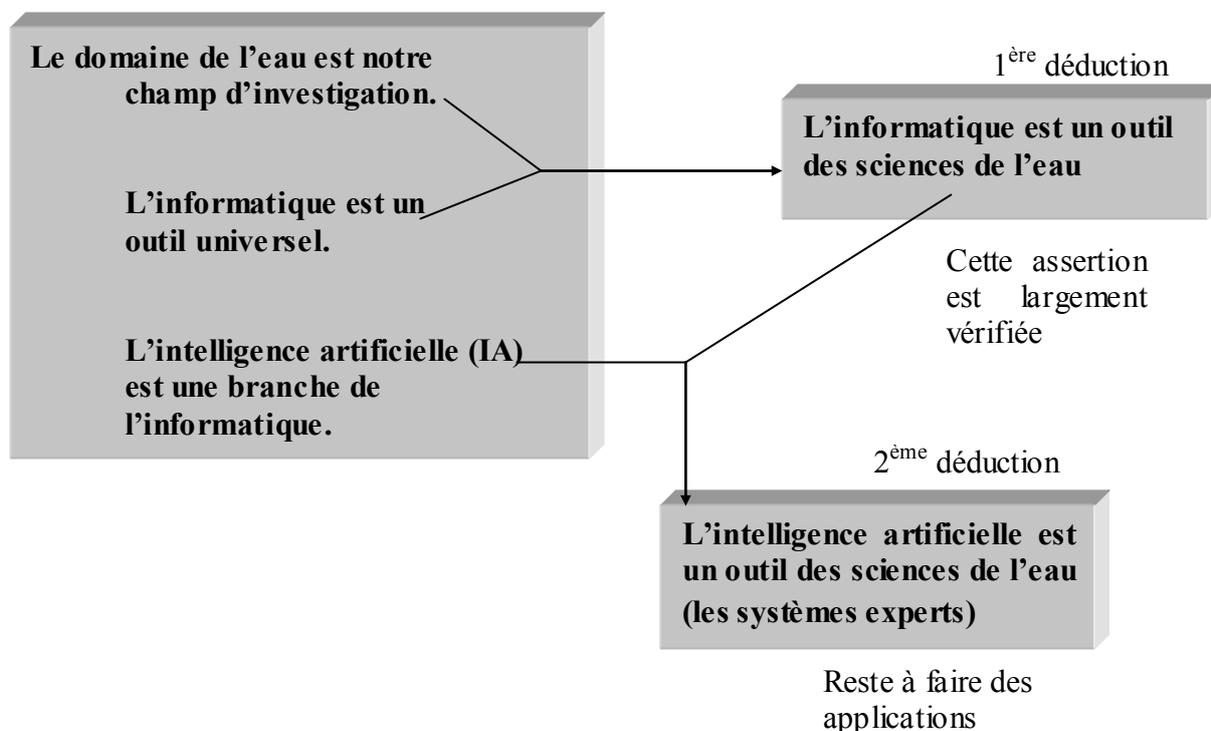
INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Le traitement de l'eau n'est pas une science fondamentale mais une science pluridisciplinaire. Elle fait appel à des notions de mathématiques, de physique, de chimie, de microbiologie...et...d'informatique. Ce dernier élément est devenu essentiel : quel spécialiste en traitement de l'eau ne s'est pas un jour tourné vers l'informatique pour l'aider à résoudre son problème ? [Cres, 1989].

L'intelligence artificielle étant une option de l'informatique, c'est de là qu'elle trouve un droit d'existence dans les sciences de l'eau.

Nous pouvons représenter sous forme de schéma l'organisation de notre travail :

Ce que l'on sait :



Pour simpliste que soit, ce schéma il n'en reste pas moins vrai et pertinent.

A l'heure actuelle, les systèmes experts s'imposent et, grâce à leur adaptabilité sur de nombreuses machines accessibles, ils sont une source d'exploitation pour les spécialistes en traitement de l'eau. Les systèmes experts s'appuient sur une représentation analytique de la connaissance et ouvrent la voie vers la programmation de problèmes non algorithmiques qui

se caractérisent par le fait qu'ils sont numériques ou non (chaîne de caractère), non décomposables et dont le résultat est une recommandation, un avis, ou une prise de décision. Ceci est la première propriété des systèmes experts. La deuxième est que le formalisme de représentation de la connaissance ne modélise pas seulement la connaissance mais aussi la manière de l'utiliser. Contenu dans la base de connaissance, ce formalisme est plus accessible que noyé dans un programme classique.

Ce sont ces deux propriétés, qui vont orienter une partie des applications des SE dans les sciences de l'eau.

La présente thèse est organisée en quatre grands chapitres :

Le domaine des systèmes experts étant un domaine relativement étranger au domaine de traitement des eaux et vice-versa, nous avons vu qu'il est important voire même indispensable de définir les deux concepts, celui des traitement des eaux pour les spécialistes en système expert et celui des systèmes experts pour les spécialistes en traitement des eaux, ce qui justifie les chapitres I et II.

En effet, le premier chapitre est consacré à des rappels bibliographiques concernant le traitement des eaux de consommation. Nous définissons les objectifs de traitement de l'eau, les indicateurs de qualité de ces eaux, et les différents procédés de traitements impliqués dans le processus de production de l'eau potable.

Le deuxième chapitre constitue une base théorique de la technologie des systèmes experts introduite pour la première fois dans le domaine de l'eau en Algérie. On y présente une discussion des systèmes experts, leurs buts et concepts, leurs architectures générales ainsi que quelques outils de développement. Nous citerons des exemples de systèmes experts dans différents domaines.

Dans le troisième chapitre nous avons tenté de présenter les applications existantes et potentielles des systèmes experts dans l'industrie de l'eau en définissant les critères d'évaluation de la faisabilité d'une application, l'intérêt d'une application, et les applications possibles dans ce secteur stratégique, tout en donnant une liste d'exemples de prototypes réalisés dans ce domaine.

Le quatrième et dernier chapitre est réparti en deux. Dans la première partie de ce chapitre, on définit la méthodologie suivie pour le développement du prototype de système expert SEXTEAU, les techniques d'acquisition de la connaissance utilisées, l'outil de développement choisi et la mise en œuvre du système expert SEXTEAU.

La structure générale du système sera donnée, accompagnée d'un schéma qui montrera les différents modules du système. On abordera également l'univers des connaissances et leurs structures

Nous évoquerons ensuite, le processus de vérification-validation. Dans le cadre de cette étude nous utiliserons la technique des arbres de décisions.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous présenterons une esquisse de méthodologie de développement d'un système expert dans le domaine de traitement des eaux.

La conclusion récapitulera les principaux points de notre étude, et portera sur les suggestions et les grands axes d'extension possible de notre travail.

PROBLÉMATIQUE :

Dans le domaine du génie, l'environnement a longtemps détenu un rôle ambigu. En effet, les notions véhiculées étant plus d'ordre qualitatif que quantitatif, les méthodes d'analyse du génie traditionnel étaient difficilement applicables. Mais l'avènement de l'intelligence artificielle et des systèmes experts, capables de traiter les connaissances aléatoires et les heuristiques, a offert au génie un cadre d'analyse lui permettant de se consacrer aux problèmes environnementaux avec une efficacité remarquable.

L'exploitation des usines de traitement d'eau potable est une tâche complexe et ardue. Un perpétuel défi est lancé aux exploitants de ces usines. La situation de l'exploitant d'une installation de traitement d'eau, en vue de la production d'eau destinée à la consommation, est importante. C'est en fait lui qui est à l'interface entre l'eau brute telle qu'on la trouve dans le milieu naturel, et l'eau traitée qui est envoyé dans le réseau de distribution.

Il dispose d'un outil de travail, constitué de l'installation de traitement des eaux avec les différentes filières de traitement qu'elle comporte, et a pour mission de l'utiliser pour la transformation eau brute-eau traitée [aghtm, 1987].

En effet, il doit :

- Produire une eau potable en quantité suffisante ;
- L'eau produite doit respecter les normes de qualité de l'eau potable qui sont de plus en plus rigoureuses ;
- Réduire le coût de traitement de l'eau [Beutler et Legrand, 1989].

Pour mener à bien cette tâche, les exploitants doivent viser constamment les conditions optimales de fonctionnement de la station. Cela demande une connaissance approfondie de la station de traitement, des conditions de fonctionnement pour lesquelles elle a été conçue, des conditions sous lesquelles elle doit fonctionner et des anomalies qui peuvent survenir tant dans le type d'eau à traiter que dans le fonctionnement des équipements. Les exploitants doivent être capables de diagnostiquer avec sûreté les modifications subites qui peuvent survenir à tout instant, nécessitant un ajustement à la station. Sans que la rapidité d'action soit une contrainte très pressante, il faut pouvoir rétablir une situation sans perdre de temps.

Que faire si, lors d'un contrôle de routine de l'eau traitée, l'exploitant constate que la valeur de l'un des paramètres s'écarte de la valeur fixée ?

De nos jours, où les automatismes locaux sont assez largement répandus, quelques techniques d'optimisation commencent à apparaître, mais force est de constater que l'exploitation et surtout l'identification des problèmes éventuels reposent encore en grande partie sur l'expérience et le savoir-faire des opérateurs. Acquérir cette expérience peut être difficile à cause du temps nécessaire et de la grande gamme de connaissances impliquée. En conséquence, un système d'aide au diagnostic des problèmes liés à l'exploitation de ces stations est plus que nécessaire. Parmi les outils de ce type, les systèmes experts semblent convenir le mieux comme on le verra plus loin [Gagnon et Serodes, 1993].

Il nous a paru indispensable d'aider les nouveaux opérateurs pour les guider dans une démarche à suivre vis-à-vis des paramètres les plus représentatifs à savoir la turbidité, l'oxydant résiduel et la couleur de l'eau traitée, en cas de dépassement de la valeur fixée par la norme.

Cette problématique faisant intervenir une connaissance diffuse, plus symbolique que numérique, de plus évolutive, les systèmes experts semblent être un outil de choix. En effet, un système expert capable de traiter les connaissances aléatoires et les heuristiques, offre un cadre d'analyse permettant de se consacrer à ce type de problème. Il constitue en fait un outil informatique capable de simuler les réponses d'un professionnel chevronné à une question concernant sa spécialité [Lévy, 1990]. Il s'agit de modéliser, d'inventorier et de classer la connaissance experte d'un spécialiste humain, et de la formaliser par des manipulations logiques et des propositions codées, proches d'une formulation verbale naturelle [Gagnon et Serodes 1993].

Un système expert capable de mettre en permanence à la disposition des opérateurs, qui peuvent se trouver dépasser par les événements, la connaissance de l'expert du domaine serait de nature à fiabiliser l'exploitation et à accroître le niveau moyen de compétences des opérateurs [Tassone, 1986].

Dans le cadre de cette étude, et vue la multitude des problèmes rencontrés dans le fonctionnement des stations de traitement d'eaux potables, nous avons, dans un premier

temps, orienté notre travail vers le développement d'un prototype de système expert généralisé d'aide au diagnostic des problèmes liés à l'exploitation des installations de traitement d'eaux potables. Mais suite au travail de recherche que nous avons entrepris, nous avons été dissuadé par cet objectif. En effet, la spécificité de chaque station et la multitude des paramètres qui rentrent en jeu (la qualité de l'eau brute, le débit d'eau à traiter, la dimension de la station, les processus de traitements impliqués, l'état des équipements, les produits utilisées, les normes de qualité visées, la compétence des opérateurs), font que cette application est très difficile à réaliser, voir impossible à l'heure actuelle et non rentable économiquement [Collins, 1990; Nix et Collins, 1991; Zhu et Simpson, 1996].

Probablement aucune base de connaissances seule ne sera capable de manier tous les aspects de fonctionnement des usines de traitement d'eaux potables. En contrepartie, plusieurs petites applications devraient être parfaites. Cette largeur dans la connaissance augmentera aussi la fréquence d'utilisation des systèmes experts dans le domaine de l'eau [Nix et Collins, 1991].

De ce fait, nous avons réorienté notre travail vers le développement d'un prototype de système expert d'aide au diagnostic des problèmes liés à l'exploitation de la station de traitement des eaux potables de BOUDOUAOU. Ce prototype est dénommé SEXTEAU (Système EXpert en Traitement des EAUx).

La réalisation de ce prototype est destinée à confirmer qu'on peut effectivement traiter le problème en utilisant la technique des systèmes experts. Les principaux objectifs de cette étude consistent à :

- ❖ Mettre en évidence le potentiel offert par les systèmes experts pour l'industrie de l'eau
- ❖ confirmer la faisabilité et l'aptitude des systèmes experts à aider dans le fonctionnement des usines de traitement d'eau potable ;
- ❖ Valider cette aptitude en construisant un prototype de système expert permettant d'assister les opérateurs peu ou pas expérimentés dans leurs missions en collectant les connaissances des opérateurs expérimentés impliqués dans le fonctionnement de l'usine de traitement des eaux de BOUDOUAOU;
- ❖ Proposer une méthodologie de développement d'un système expert opérationnel dans les stations de traitement d'eau potable.

Le prototype réalisé vise les opérateurs peu ou pas expérimentés en mettant à leurs dispositions une expertise pratique dans l'exploitation de leurs stations. C'est une version simple du système définitif. C'est la première itération du processus de développement du système expert. Il n'est pas projeté pour un usage général mais pour l'expérimentation. On s'est posé ce principe au début pour ne pas être tenté d'aboutir à un système final bancal dans ces résultats et peu performant dans son fonctionnement [Dominé, 1988; Nix et Collins, 1991; Nix et al., 1989].

CHAPITRE I : PRINCIPES GÉNÉRAUX DE TRAITEMENT DES EAUX POTABLES.

I.1- INTRODUCTION :

L'eau est la substance minérale la plus répandue à la surface du globe. Son volume est estimé à 1370 millions de km³.

L'eau est l'élément majeur du monde minéral et biologique, c'est aussi le vecteur privilégié de la vie et de l'activité humaine. À l'heure actuelle, l'utilisation globale, de l'eau en additionnant les usages domestiques, industriels et agricoles, représente le chiffre impressionnant de 250 m³ par an et par habitant. Et encore les disparités sont énormes : de 100 m³ pour les pays en voie de développement à 1500 m³ pour les États-unis. Il est donc certain que les besoins en eau de l'humanité ne cesseront de croître. Ceci implique la nécessité impérieuse de protéger l'eau. Il faut la traiter que ce soit pour produire une eau propre à la consommation ou à des usages spécifiques industriels, ou pour limiter les rejets de pollution dans le milieu naturel [Degremont, 1989].

Dans la mesure où les ressources souterraines traditionnelles ne suffisent plus à assurer la demande en eau potable, il s'est avéré nécessaire d'utiliser les eaux de surface.

Les eaux de surface contiennent des impuretés qui ont pour origine :

- la dissolution des encaissants (roche, terrains traversés...). Ces encaissants sont responsables du pH et de la conductivité.
- les colloïdes minéraux (argiles, gels de silice...) qui sont responsables de la turbidité.
- les matières organiques qui peuvent avoir deux origines :
 - Origine naturelle : produits de dégradation des végétaux, métabolites des algues et des micro-organismes.
 - Origine artificielle : due à la pollution urbaine, industrielle et agricole (pesticides, fongicides, herbicides...).

Les eaux de surfaces devraient donc subir des modifications physiques, chimiques et biologiques qui les rendent potables ; pour cela il faut les traiter par des moyens appropriés et qui demandent une main d'œuvre spécialisée [Degremont, 1989; Kettab, 1992; Nakache, 1995].

I.2- OBJECTIFS DE TRAITEMENT DES EAUX DE CONSOMMATION ET NORMES DE POTABILITÉ :

Les eaux brutes disponibles comprennent en quantités et proportions variables suivant les lieux, tout le spectre des composants naturels de la croûte terrestre, des produits de la vie végétale et animale ainsi que des constituants des rejets de l'activité humaine. Toutes ces substances, comme les produits de leurs dégradations ou transformations ultérieures dans le milieu, se trouvent soit en suspension, soit sous forme colloïdale, soit encore en solution. Les teneurs de ces paramètres dans le milieu naturel sont souvent incompatibles avec la réglementation sanitaire et la perception des consommateurs.

Le traitement des eaux pour la distribution à pour objet :

- de réduire ces teneurs pour les rendre inférieures à des valeurs (ou pour les amener à l'intérieur d'une fourchette de valeurs) fixées par des normes qui sont en fait des critères de qualité ;
- d'assurer une sécurité parfaite par désinfection [Godart, 1997].

Pour cela deux paramètres s'imposent :

a) la connaissance de l'eau à traiter :

- analyses complètes sur échantillons représentatifs ;
- méthodes d'analyses ;
- méthodes de prélèvements ;
- variations annuelles des caractéristiques de l'eau à traiter avec la connaissance de maxima et minima ;
- éventuellement prévision de changement de la qualité d'eau.

b) La définition des objectifs exacts du traitement : Ceux ci peuvent être repartis en trois groupes :

- La santé publique, qui implique que l'eau distribuée ne doit apporter aux consommateurs ni substances toxiques (organiques ou minérales), ni organismes pathogènes. Elle doit donc répondre aux normes physico-chimiques et bactériologiques.

- L'agrément du consommateur, qui est différent du premier point car une eau peut être agréable à boire tout en étant dangereuse (source polluée...), il s'agit des qualités organoleptiques, c'est-à-dire ce qui est perçu par les sens olfactifs de l'homme à savoir couleur, odeur, goût.

- La protection du réseau de distribution, et aussi des installations des usagers contre l'entartrage et /ou la corrosion [Kettab, 1992].

Dans tous les pays, ces objectifs se traduisent par une réglementation officielle.

Cette réglementation est fonction de critères de santé publique, du degré de développement du pays considéré et des progrès de la technologie [Degremont, 1989; Kettab, 1992].

La plupart des pays ont leurs propres normes de potabilité. Dans le cas des pays où des normes nationales ne seraient pas élaborées, on adopte en général celle de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Celles-ci sont relativement tolérantes pour certains critères (comme la turbidité) pour tenir compte des moyens limités des pays en voie de développement (Tableau I-1) [Godart, 1997].

L'Algérie dispose de sa propre norme de potabilité représentée dans le Tableau I-2.

I.3- LES INDICATEURS DE QUALITÉ DES EAUX DISTRIBUÉES :

Au fur et à mesure des progrès analytiques et sanitaires, les normes de qualité des eaux distribuées visent des paramètres de plus en plus nombreux, avec des exigences de précision dans les mesures de plus en plus grandes. On distingue deux types d'indicateurs :

- Les indicateurs physico-chimiques ;
- Les indicateurs bactériologiques.

I.3.1- Les indicateurs physico-chimiques :

a. La turbidité : La turbidité est le caractère trouble d'une eau qui traduit la présence de matières insolubles : colloïdes et/ou matières en suspension d'origine minérale, organique et biologique (limon, argile, plancton et autres micro-organismes). Elle est mesurée à l'aide d'un néphélomètre qui mesure la quantité de lumière réfractée à 90° par l'échantillon [Gomella, 1978].

La turbidité nuit à l'efficacité des agents désinfectants. Des corrélations significatives avec les gastro-entérites répertoriées dans les hôpitaux ont été mises en évidence dans des eaux non filtrées (Vancouver (Canada)) et filtrées (Philadelphie (USA)). À Vancouver par exemple, où l'eau de surface est simplement chlorée, il y a eu augmentation significative des hospitalisations pour gastro-entérites lorsque la turbidité dépassait 1 NTU. À Philadelphie, où l'eau est filtrée et chlorée, une faible augmentation de la turbidité qui n'a jamais dépassé la

norme de 0.5 NTU a conduit à une augmentation significative des hospitalisations pour gastro-entérites. Enfin l'épidémie de Milwaukee (USA) est associée à l'augmentation de la turbidité au dessus de 1 NTU à la sortie d'un des filtres.

Ces exemples illustrent l'importance de la turbidité comme indicateur du risque sanitaire lorsque l'eau brute est contaminée. La turbidité présente les caractéristiques suivantes en regard des micro-organismes :

(1) Les micro-organismes ont tendance à s'absorber sur un support plutôt que de rester en suspension libre dans l'eau. Les particules en suspension offrent ce support. En outre, les particules organiques fournissent une plus grande capacité d'adsorption en plus de fournir la nourriture nécessaire à la multiplication des bactéries [R. E. C., 2001].

(2) Les particules (surtout organiques) offrent une protection contre les agents désinfectants en particulier le chlore ;

(3) La turbidité interfère lors de l'énumération bactérienne ou virale en concentrant au même endroit un nombre important de micro-organismes qui seront perçus comme une seule unité lors du dénombrement sur le milieu de culture.

La nature organique probable de la turbidité peut être évaluée par une mesure du carbone organique total (COT). Les matières organiques augmentent la demande en chlore en plus de servir d'abri aux micro-organismes pathogènes [R. E. C., 2001].

b. La couleur : La couleur est due le plus souvent à la présence de matières organiques dissoutes ou colloïdales issues de la décomposition de la faune et de la flore. Ce sont, en général, les substances humiques (acides humiques et fulviques) qui confèrent à l'eau une forte coloration. La couleur doit donc être éliminée pour rendre l'eau agréable à boire.

c. Les M.E.S : Les matières en suspension sont des composés dont l'origine peut être minérale (sables, limons, argiles...) ou organique (produits de la décomposition des matières végétales et animales). À ces composés s'ajoutent les micro-organismes tels que les bactéries, les planctons, algues et virus. Elles sont responsables de la turbidité et de la couleur.

La connaissance du poids et du volume de ces substances dans l'eau est nécessaire pour la détermination des dimensions des ouvrages de traitement et d'adduction [Gomella, 1978].

Paramètres	France 1995	CE 1998	OMS	Etats-unis	Remarques
Aluminium..... [µg/L (Al)]	200	200 (1)	200 (1)	50 à 200	(1) paramètre indicateur (2) substance qui peut donner lieu à plainte
Bromures..... [µg/L (Br ⁻)]	10	25		
Cyanures..... [µg/L (CN ⁻)]	50	50	70	200	
Fluorures..... [mg/L (F ⁻)]	1,5	0,7 à 1,5 (1)	1,5	4	(1) suivant la température
Plomb..... [µg/L (Pb)]	50 → 25 → 10 (1)	50	10	10	(1) 50 µg/L → fin 2003 25 µg/L → fin 2013 10 µg/L à partir du 1/1/2014
Nitrates..... [mg/L (NO ₃ ⁻)]	50	50 (1)	50 (2)	10	(1) substance indésirable (2) ou 10 mg/L en N
Nitrites..... [mg/L (NO ₂ ⁻)]	0,5 (1)	0,1	3	1	(1) 0,1 mg/L au départ des installations de traitement
Pesticides (1)..... (µg/L)	0,1 (2)	0,1	1 à 30 (3)	selon produit (4)	(1) Aldrine, heptachlore... = 0,03 µg/L (2) pesticides, produits apparentés, métabolites (3) selon les produits: atrazine=2µg/L (4) atrazine = 3 µg/L
THM (Trihalométhanes) (1)..... (µg/L)	100	60 à 200 (2)		(1) somme des composés (2) selon les composés
pH.....	6,5 à 9,5	6,5 à 9	(1)	6,5 à 8,5	(1) éviter les pH > 8 pour que la désinfection par le chlore soit efficace
Chlorures (1)..... [mg/L (Cl ⁻)]	250	200	250	250	(1) paramètre indicateur
Sulfates (1)..... [µg/L (SO ₄ ²⁻)]	250	250	250		(1) paramètre indicateur
Fer..... [µg/L (Fe)]	200	200	300	300	
Manganèse..... [µg/L (Mn)]	50	50	50	50	
Sodium..... [mg/L (Na ⁺)]	200	200	200		
Ammonium..... [mg/L (NH ₄ ⁺)]	0,50	0,50	1,50		
Couleur (1)..... (UCV)	Acceptable Pour la consommation	15	15	15	(1) UCV : unité de couleur vraie
Turbidité (1)..... (NFU)	1 (2)	2	5	0,5 à 1	(1) NFU: nephelometric formazine unit (ou NTU) (2) Au départ des installations
Dureté..... °F		≥15 (1)			(1) pour les eaux adoucies

Tableau I-1 : Qualité des eaux distribuées. Réglementation suivant les pays [Godart, 1997].

Paramètres	Unité	Niveau guide	Conc. Max. Admissible	Méthodes	Observation
Odeur	Seuil de perception à 25°C	0	4	NA 6371	au bout de quatre dilutions successives aucune odeur ne doit être perçue.
Saveur	Seuil de perception à 25°C	0	4	NA 6346	au bout de quatre dilutions successives aucune saveur ne doit être perçue
Couleur	mg/l échelle pt/		25	NA 745	
Turbidité	NTU	1	5	NA 746	
pH		6.5-8.5		NA 751	
Conductivité	µs/cm à 20°C		2800	NA 749	en correspondance avec la minéralisation des eaux
Résidu sec Dureté totale	mg/l après séchage à 105°C	100	2000 500	NA 6356 NA 752	
Calcium	mg/l CaCO ₃	75	200	NA 1655	
Magnésium	mg/l		150	NA 752 et NA 1655	la teneur en mg est calculée à partir de la différence entre la teneur en (Ca+Mg) et la teneur en calcium.
Sodium	mg/l		200	NA 1652 ou NA 1653	
Potassium	mg/l		20	NA 1652 ou NA 1653	
Sulfates	mg/l	200	400	NA 6361	
Chlorures	mg/l	200	500	NA 6362	
Nitrates	mg/l		50	NA 1656	
Nitrites	mg/l		0.1	NA 1657	
Ammonium	mg/l	0.05	0.5	NA 1848 ou NA 1852	
Phosphates	mg/l		0.5	NA 2364	
Oxydabilité (KMnO ₄)	mg/l		3	NA 2064	mesure faite à chaud et en milieu acide
Oxygène dissous	mg/l	5	8	NA 1910	
Facteurs indésirables ou toxiques					
Argent	mg/l		0.05	NA 6873	
Arsenic	mg/l		0.05	NA 2363	
Baryum	mg/l		1	NA 6374	
Cadmium	mg/l		0.01	NA 2362	
Cyanures	mg/l		0.05	NA 1766	
Chrome	mg/l	0.05	0.05	NA 6375	
Cuivre	mg/l		1.5	NA 2362	
Fer	mg/l	0.3	0.3	NA 2422	
Fluor	mg/l		2	NA 6376	
Manganèse	mg/l		0.5	NA 6363	
Mercure	mg/l		0.001	NA 2762 ou NA 2763	
Plomb	mg/l		0.05	NA 2362	

Hydrogène sulfuré	mg/l		0.02	NA 6365	non décelable organoleptiquement.
Sélénium	mg/l		0.01	NA 6364	
Zinc	mg/l		5	NA 2362	
Hydrocarbure Polycyclique aromatique (H.P.A)	µg/l		0.2	NA 6366	substance de référence -fluranthène benzo3, 4 fluranthène benzo 11, 12 fluranthène benzo 3, 4 pyrène benzo1, 12 perylène indéno (1, 2,3) pyrène H.P.A totaux 4mg/l à titre indicatif.
Pesticides et produits apparentés au total	µg/l		0.5	NA 6368	on entend par pesticides et produits apparentés : -les insecticides organochlorés persistants, organophosphorés, carbamates -les herbicides ; -les fongicides ; -les PCB et PCT.
Par substance individualisées	µg/l		0.1	NA 6368	
Détergent	µg/l		0.2	NA 2423	
Phénol	µg/l		2	NA 2065	s'il y a chloration à l'exclusion des phénols naturels qui ne réagissent pas au chlore.
Phénol	µg/l		20	NA 2065	s'il n y a pas de chloration.
Hydrocarbures dissous ou en émulsion huile minérale	mg/l		10	NA 6367	
Facteurs bactériologiques					
Coliformes fécaux	nbre/100ml UFC		0	NA 746	
Coliformes totaux	nbre/100ml UFC		0	NA 764	
Streptocoques fécaux	nbre/100ml UFC		0	NA 765	
Clostridium sulfito-réducteurs	nbre/20ml UFC		0	NA 6369 ou NA 6370	

Tableau I-2 : Norme algérienne de potabilité des eaux de consommation [Journal officiel N° 57 du 20-08-1992].

d. Le pH : Le pH est un paramètre important dans le domaine de traitement des eaux. Il détermine la qualité de celles-ci vis-à-vis des ouvrages de traitement et d'adduction (agressivité, corrosivité et entartrage), ainsi que les traitements de correction apportés aux eaux avant et après traitement.

Pour les eaux de consommation, le pH doit être compris entre 6.5 et 8.5.

e. Les cations et les anions : Au cours de son ruissellement ou son cheminement au sein de la croûte terrestre, l'eau attaque les sols et les roches. Une grande partie de substances minérales se trouve dissoute dans l'eau suivant des processus complexes (hydrolyse, oxydation, carbonatation,...).

Les éléments présents dans l'eau en quantité importante sont :

Pour les cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+} , NH_4^+ .

Pour les anions: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- .

f. Demande biologique en oxygène (DBO₅) : C'est la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes lors de l'oxydation de la matière organique présente dans l'eau pendant cinq jours. La DBO₅ représente la pollution organique carbonée biodégradable. Elle doit avoir la plus faible valeur possible.

g. Demande chimique en oxygène (DCO) : La DCO est la quantité d'oxygène consommée par les matières oxydables présentes dans l'eau. Ce paramètre représente la majeure partie des composés organiques ainsi que celle des sels minéraux oxydables. Sa valeur doit être réduite le plus possible pour que l'eau soit apte à être consommée. Ce paramètre est souvent très faible voire négligeable dans les eaux naturelles.

h. Le carbone organique total : Le COT est la teneur en carbone liée à la matière organique. La mesure de la quantité du CO₂ dégagé après une oxydation complète de la matière organique donne la valeur du COT. La teneur en COT reste relativement faible dans les eaux naturelles.

i. Substances extractibles au chloroforme (SEC) : L'extraction liquide-liquide au chloroforme de certaines matières toxiques, colorantes et odoriférantes permet d'apprécier la pollution apportée aux eaux par ces matières. La méthode consiste en une extraction de ces matières par adsorption sur charbon actif puis élution au chloroforme. Cette méthode permet

de suivre la qualité de l'eau lors de différentes étapes de traitement, elle est aussi applicable pour un traitement d'affinage [Gomella, 1978].

j. Minéralisation totale (Résidu Sec) : Parmi les éléments présents dans l'eau en quantité notable, on trouve les ions : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+} , NH_4^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- . Ce sont ces éléments qui déterminent la minéralisation de l'eau. L'évaporation à 100-105° C d'une eau débarrassée de ses matières en suspension grossières ou colloïdales, conduit à un résidu sec dont le poids doit être presque égale à la somme des éléments déterminé par l'analyse complète. Le résidu sec donne donc une idée sur la teneur des sels minéraux présents dans l'eau. Sa valeur dans les eaux naturelles ne dépasse pas 1.5 g/l.

k. Résistivité : La résistivité (ou son inverse la conductivité) est liée à la quantité d'ions présents dans l'eau et à leurs mobilités en fonction de la température. Dans les solutions diluées, la résistivité est en relation linéaire avec l'inverse de la concentration ionique.

l. L'alcalinité : L'alcalinité exprime la teneur en ions hydroxyde, carbonate et bicarbonate présents dans l'eau. Elle représente respectivement l'alcalinité caustique, carbonatée et bicarbonatée [Gomella, 1978].

I.3.2- Les indicateurs de qualité bactériologiques : La qualité bactériologique d'une eau s'apprécie à partir de la recherche d'un certains nombre de germes faciles à isoler et à dénombrer appelés germes test de contamination fécale dont les principaux sont :

L'Escherichia Coli (*B. Coli*) ;

Les Streptocoques fécaux ;

Les Clostridium sulfito-réducteurs.

Ces micro-organismes et leurs sous produits toxiques représentent donc des cibles à haut risque sanitaire qu'une filière de traitement doit atteindre [Nakache, 1995].

La réglementation requiert l'absence de germes tests de contamination fécale dans tout échantillon de 100 ml analysé [Gatel, 1996].

À ces micro-organismes s'ajoutent les virus qui affectent la santé de l'homme, et de ce fait ils doivent être éliminés afin d'éviter toute maladie infectieuse.

I.4- TRAITEMENT DES EAUX DE CONSOMMATION :

Une installation de traitement d'eau destinée à la consommation doit produire, en toutes circonstances, une eau répondant aux normes (fixées dans chaque pays), il s'agira de ramener, en permanence, les valeurs des paramètres de qualité au-dessous (exceptionnellement au-dessus pour quelques paramètres) de la concentration maximale admissible ou à l'intérieur des fourchettes fixées par la réglementation. La valeur des paramètres des eaux brutes étant variable, surtout dans le cas des eaux superficielles, on pourra se fixer une hiérarchie des exigences : il serait inadmissible d'accepter volontairement la présence, ne serait-ce qu'une fois, de facteurs de maladies hydriques aiguës. À côté de cela, tout en ayant pour objectif strict de coller à la réglementation, des dépassements rares et faibles, dans des conditions extérieures exceptionnelles, peuvent être tolérés pour certains paramètres de confort notamment, voire pour certaines substances indésirables mais non toxiques en cas d'ingestion à faible dose occasionnelle [Godart, 1997].

Le dispositif de traitement doit assurer une correction respectant parfaitement la réglementation en période normale. Il doit aussi être conçu pour être renforcé en période de crise.

Le dispositif de traitement devra également pouvoir faire face à des périodes aléatoires de pollutions accidentelles dont l'éventualité et la gravité auront fait l'objet d'études préalables. Dans ces cas exceptionnels, des mesures ad hoc pourront être prévues : diminution du débit prélevé, éventuellement arrêt du puisage, mise en œuvre massive de produits de traitements stockés à cet effet.

I.4.1- Classement des traitements :

On procédait souvent au classement des traitements en processus unitaires en fonction de l'objectif principal visé par l'intervention de chacun d'eux, pris isolément : traitement de clarification, traitement de désinfection, etc.

Il est maintenant bien établi que, chaque processus unitaire de traitement influera sur un grand nombre de paramètres de qualité et que les effets des différents processus unitaires utilisés dans une filière ne doivent pas être considérés séparément. La filière de traitement constitue un ensemble ou chaque sous-ensemble amont intervient dans le rendement et les effets de tous les sous-ensembles situés en aval. Cela implique en retour que les caractéristiques d'un sous-ensemble amont doivent être déterminées en tenant compte de tout

ce qui se trouve en aval, il peut donc y avoir une véritable itération pour obtenir l'optimisation recherchée.

L'objet de la filière est généralement l'élimination totale ou partielle de certains corps existant dans l'eau brute de façon à ramener les paramètres aux niveaux fixés par la réglementation. Quelquefois, il s'agira au contraire d'**ajouter** quelques corps, au départ en quantité insuffisante (reminéralisation d'une eau trop douce). À l'exception de ce cas, il s'agira, par conséquent, de concevoir une suite de processus conduisant :

- à une **extraction**, c'est-à-dire à un transfert de masse solide-liquide, liquide-liquide ou gaz-liquide : dégrillage, tamisage, sédimentation, filtration, séparation par membranes, flottation, adsorption, dégazage, échange ionique, transfert ionique, centrifugation ;

- à une **modification d'état ou de structure** : précipitation de colloïdes, transformation des ions en sels solides ou en gaz, désagrégation de molécules en molécules plus simple, formation de molécules plus complexes, destruction des micro-organismes, inactivation des virus.

Une combinaison de deux ou plusieurs processus unitaires pourra se faire dans la même enceinte ; un processus unitaire peut quelquefois exiger, l'intervention d'un ou plusieurs autres processus.

Les processus pourront être de nature physique, physico-chimique, ou biologique. Ils peuvent être intensifs (obtenues en peu de temps dans un espace réduit) ou extensifs.

De toute façon, s'il est nécessaire d'examiner les possibilités de chaque processus unitaire séparément, il faudra toujours raisonner *in fine* en fonction de l'ensemble interactif des processus unitaires mis en œuvre dans la filière de traitement [Godart, 1997].

La Figure I-1 schématise les principales chaînes de traitement que l'on peut rencontrer, et qui doivent être complétées par des traitements spécifiques éventuellement rendus nécessaires par la présence d'un composé bien déterminé et indésirable (fluor, nitrate, calcium...). Un traitement de désinfection est obligatoire à la fin de chaque filière.

I.4.2- Les processus unitaires de traitement :

Même si on parle de moins en moins de processus unitaire en fonction du traitement principal visé, la notion de processus unitaire n'en reste pas moins valable quant aux principes auxquels il est fait appel : une oxydation reste une oxydation, une adsorption reste une adsorption, etc.

L'art du traiteur d'eau est de choisir les processus et de les intégrer dans une filière aussi performante et aussi économique que possible [Godart, 1997].

- 1. La pré-oxydation :** En traitement d'eau potable, on utilise l'oxydation pour transformer des molécules gênantes en molécules acceptables sous les angles sanitaire, organoleptique, voire visuel. Le traitement de pré-oxydation est à effectuer en tête de l'installation de traitement, il peut être physique ou chimique.

- **Traitement physique :**

L'aération : elle sert à oxyder certains éléments, tels que les métaux et les matières organiques d'une part, et conférer à l'eau un goût agréable d'autre part.

- **Traitement chimique :** On peut utiliser à cet effet le chlore et ses dérivés, l'ozone ou le permanganate de potassium.

La préchloration est le traitement de pré-oxydation chimique le plus utilisé. Elle permet d'obtenir une meilleure filtration en aidant la coagulation et par conséquent une meilleure qualité d'eau.

Elle a pour objectif :

- La destruction de microorganismes existants et susceptibles de se développer dans les ouvrages et dans les lits de boues. Elle assure alors la propreté des décanteurs et des filtres, aussi elle évite les remontés de boues dans ces décanteurs.

- L'oxydation des matières organiques qui pourraient former des complexes organo-solubles.

- L'oxydation des ions ferreux et manganés.

- L'oxydation de l'ammoniac.

- La diminution du seuil de goût et souvent l'amélioration de la décoloration de l'eau.

- La destruction de micro-organismes (algues, bactéries, planctons) existants et susceptibles de se développer dans les différents appareils de l'installation.

Pour rendre effective cette préchloration, il faut assurer la présence d'une petite quantité de chlore libre dans l'eau brute [Degremont, 1989].

Si l'eau possède un point critique, il faut appliquer une teneur légèrement supérieure à celui-ci.

Si l'eau ne possède pas de point critique, il faut appliquer une dose permettant d'obtenir 0,2 à 0,3 mg/l de chlore libre.

Le chlore est introduit sous forme d'eau chlorée à partir du chlore gazeux.

- 2. La clarification :** la clarification est l'ensemble des opérations permettant d'éliminer les MES d'une eau brute ainsi que les polluants (organiques et minéraux) associés à ces MES par adsorption, formation de complexes,... Parmi les techniques de clarification les plus utilisées, on distingue [Godart, 1997].

2-a) La coagulation–Floculation :

Les eaux contiennent des particules en suspension colloïdales ou pseudo colloïdales très fines qu'il est nécessaire d'agglutiner en un floc volumineux et lourd afin d'assurer leur sédimentation et de faciliter leur retenue par les décanteurs et les filtres.

Les colloïdes possèdent des charges électriques à l'interface qui empêchent les particules voisines de se rapprocher. L'action s'effectue en deux stades :

La coagulation qui permet de recharger les colloïdes afin de donner naissance à un précipité.

La floculation qui a pour but d'accroître le volume et la cohésion d'un floc formé pour la coagulation.

La coagulation : On utilise un sel métallique tel que le sulfate d'alumine.

La dose à utiliser dépend de la nature de l'eau à traiter. Elle est établie à la mise en service de l'installation par essai Jar-test.

Plus une eau est chargée de matières colloïdales et surtout de matières végétales, plus il faudra de réactif pour la clarifier.

La nature des matières organique influe sur la coagulation.

Le pH du milieu est prépondérant sur la coagulation et sur la dose du réactif. Il est nécessaire d'effectuer une neutralisation dans l'eau traitée de façon à obtenir son pH d'équilibre. L'ajustement du pH se fait avec du lait de chaux.

La floculation : elle est favorisée par la mise en contact de l'eau avec le maximum de floc déjà formés par le traitement antérieur. C'est la technique du lit de boues.

Elle est plus améliorée par l'ajout de produit appelé "adjuvant de floculation" tels que : les floculants synthétiques ou les poly-électrolytes.

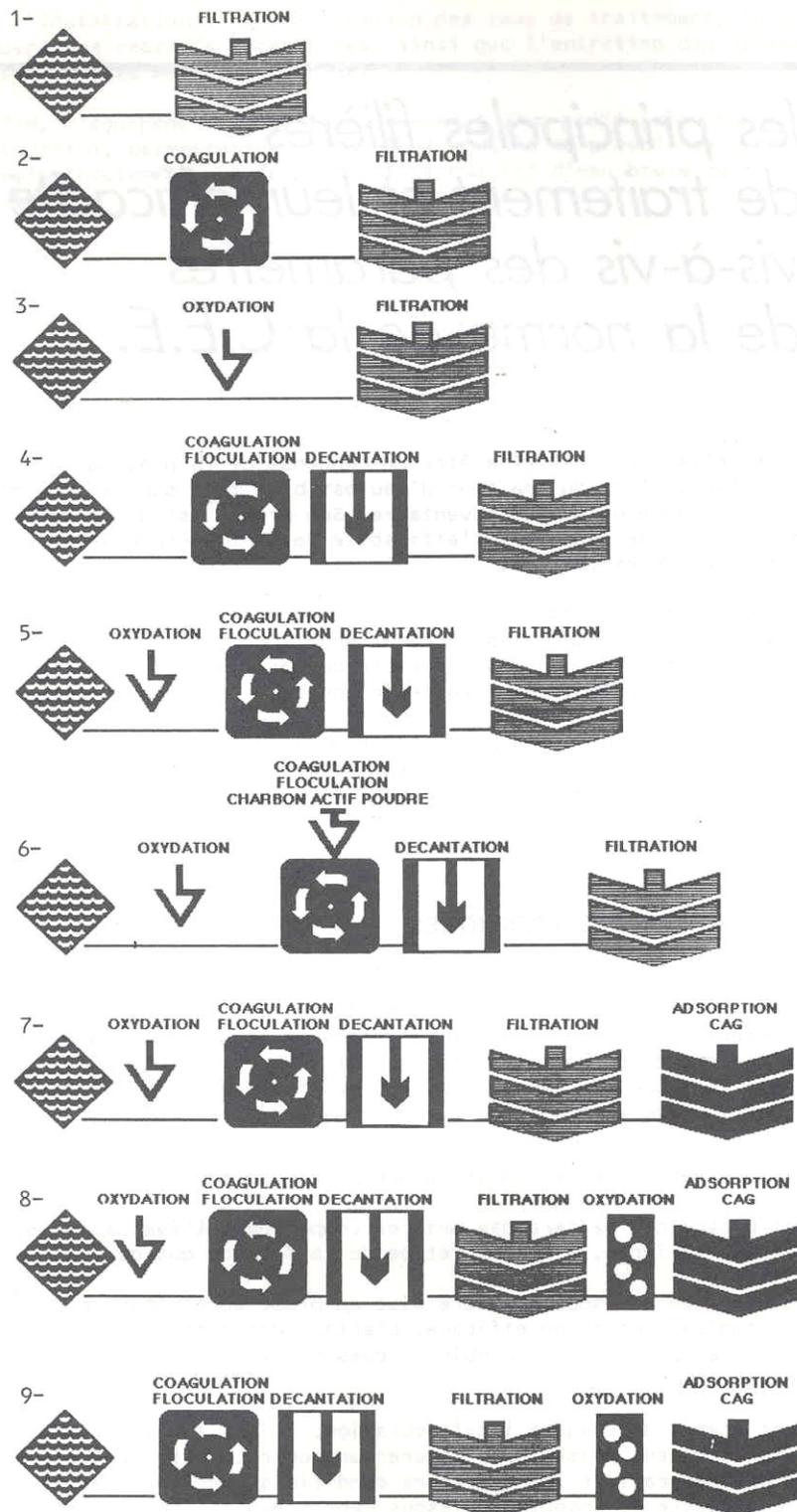


Figure I-1 : Les principales chaînes de traitement [aghtm, 1987].

2-b) La décantation : elle permet le dépôt des particules en suspension dans l'eau, sous l'influence de la pesanteur afin d'améliorer la qualité de l'eau.

Pour que cette décantation ait lieu, il faut que la vitesse de chute des particules soit supérieure à la vitesse ascensionnelle V_a de l'eau dans l'appareil :

$$V_a = \frac{\text{Débit horaire en m}^3/\text{h}}{\text{Surface en m}^2}$$

Ces particules existent dans l'eau brute et sont assemblées en flocons plus gros (et donc plus lourds) par l'adjonction de réactifs chimiques lors de la floculation.

Divers types de matières décantables sont à distinguer :

- *Les particules grenues* décantent indépendamment les unes des autres avec chacune une vitesse de chute constante ;

- *Les particules plus ou moins floculées* ont des tailles et des vitesses de décantation très variables.

- Lorsque la concentration est faible, la vitesse de chute augmente au fur et à mesure que les dimensions du floc s'accroissent par suite de rencontres avec d'autres particules c'est *la décantation diffuse*.

- Pour des concentrations plus élevées l'abondance des flocons crée une décantation d'ensemble freinée, le plus souvent caractérisée par une interface nettement marquée entre la masse boueuse et le liquide surnageant : c'est *la décantation piston* [Degremont, 1989; Godart, 1997; Gomella, 1978].

2-c) La flottation : Par opposition à la décantation, la flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique est inférieure à celle du liquide qui les contient.

- Si cette différence de masse volumique est naturellement suffisante pour une séparation, cette flottation est dite **naturelle**.

- La flottation est dite **assistée** si elle met en œuvre des moyens extérieurs pour améliorer la séparation de particules naturellement flottables.

- La flottation est dite **provoquée** lorsque la masse volumique de la particule est à l'origine supérieure à celle du liquide, et artificiellement réduite.

La flottation est à recommander pour :

- Les eaux peu chargées en MES.
- Les eaux produisant un floc léger, décantant mal ;
- Les eaux riches en plancton qui, en été, par suite de l'activité chlorophyllienne des algues ont tendance à être saturées en oxygène, empêche la décantation et provoque une remontée du floc [Degremont, 1989].

2-d) La filtration : Dans la recherche d'une clarification, la filtration est le processus de finition par excellence. La filtration est un procédé de séparation qui utilise le passage d'un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux (filtre) qui retient les particules solides et laisse passer le liquide (filtrat).

Au cours de la filtration un grand nombre de processus peuvent intervenir :

- La retenue mécanique dans la couche supérieure de la masse filtrante ;
- Floculation et sédimentation ;
- Adsorption et adhésion aux grains de la masse filtrante et aux matières déjà retenues.

La filtration conduit à l'élimination des particules ayant des dimensions largement supérieure aux pores du matériau de filtration.

On distingue :

- **La filtration lente :** c'est la première application historique. On cherche à y reproduire les phénomènes spontanés de la filtration naturelle par le sol. Les filtres lents doivent subir une période préalable de maturation au cours de laquelle se forme une membrane superficielle, dite membrane biologique, où se développent des colonies de micro-organismes. L'action du filtre lent est double : on y obtient une clarification mécanique ainsi qu'une purification par dégradation biologique accompagnée d'une adsorption-absorption par le complexe biologique de la membrane. Ils sont généralement utilisés pour des eaux de surface relativement claires. Ces filtres occupent un grand espace et travaillent à faible vitesse (0.1 à 0.4 m/h).
- **La filtration rapide :** la filtration à travers un milieu granuleux (de l'ordre de quelques $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) présente un double phénomène de blocage dimensionnel et d'adhésion à la surface des grains du lit filtrant [Degremont, 1989].

Colmatage et lavage du matériau filtrant : On appelle colmatage l'obstruction progressive des interstices du matériau filtrant. Le colmatage provoque une augmentation de la perte de charge.

La vitesse de colmatage dépend :

- Des matières à retenir : elle est d'autant plus grande que :
 - le liquide est plus chargé en MES,
 - ces matières ont une plus grande cohésion,
 - elles sont susceptibles, elles mêmes, de prolifération ;
- De la vitesse de filtration,
- Des caractéristiques de l'élément filtrant : dimension des pores, homogénéité, rugosité, forme du matériau.

Le filtre est colmaté lorsqu'il atteint la perte de charge maximale prévue par construction. Il importe de le ramener à son état initial par un lavage efficace et économique dont le mode est lié au type de filtre et à la nature des éléments retenus.

3. L'adsorption : L'adsorption est un traitement particulièrement efficace pour l'élimination des MO. Elle définit la propriété de certains matériaux de fixer à leurs surfaces des molécules (gaz, ions métalliques, molécules organiques, etc.) d'une manière plus ou moins réversible. L'efficacité est d'autant plus importante que leur masse molaire est élevée et leur polarité faible.

Dans la pratique du traitement de l'eau, lorsque l'on désire obtenir un effet net d'adsorption, on utilise le charbon actif, qui est un des adsorbant les plus utilisés, il permet l'élimination :

- de nombreux composés sapides,
- des phénols,
- des tensio-actifs,
- des hydrocarbures à chaînes saturées dont les molécules sont peu solubles et difficilement attaquables par l'ozone,
- des pesticides.

Le charbon actif se présente soit sous forme d'une poudre, soit sous celle d'un matériau granuleux [Godart, 1997].

4. La neutralisation au pH d'équilibre : À une concentration donnée de calcium et de magnésium correspond une concentration d'acide carbonique libre qui est la quantité nécessaire d'acide carbonique pour que les bicarbonates ne se découpent pas en laissant précipiter les carbonates correspondants.

Cette quantité nécessaire d'acide carbonique est désignée sous le nom "d'acide carbonique équilibrant".

Si l'eau contient une quantité d'acide carbonique supérieure à la dose d'acide équilibrant, son excès par rapport à cette dose constitue l'acide carbonique "agressif". La quantité de CO₂ semi-combiné (HCO₃ des bicarbonates) est égale à celle du CO₂ lié. Les eaux qui contiennent du CO₂ agressif attaquent le calcaire en solubilisant les carbonates sous forme de bicarbonates. Elles sont à fortiori incapables de provoquer la formation d'une couche carbonatée protectrice sur les surfaces avec lesquelles elles sont en contact.

Au contraire, les eaux qui contiennent une quantité de CO₂ libre inférieure à la quantité théorique équilibrant précipitent du calcaire. Elles sont incrustantes.

Le pH dépend du rapport : CO₂ libre/CO₂ des bicarbonates.

En conséquence, à chaque valeur de l'alcalinité correspond un pH dit "pH d'équilibre". Lorsque le pH d'une eau est inférieur au pH d'équilibre, elle doit être considérée comme agressive.

La mesure de l'agressivité s'effectue par la mesure du pH et du TAC après un temps de contact avec du marbre : "test au marbre".

5. La désinfection : la désinfection est l'étape ultime du traitement de l'eau de consommation avant distribution. Elle permet d'éliminer tous les micro-organismes pathogènes de l'eau. Il peut subsister dans l'eau quelques germes banals, car la désinfection n'est pas une stérilisation [Godart, 1997].

La désinfection de l'eau comporte deux étapes importantes, correspondant à deux effets différents d'un désinfectant donné.

- Effet bactéricide : capacité de détruire les germes en une étape donnée du traitement.
- Effet rémanent : c'est un effet du désinfectant qui se maintient dans le réseau de distribution et qui permet de garantir la qualité bactériologique de l'eau. C'est à la fois un effet bactériostatique contre les reviviscences bactériennes et un effet bactéricide contre des pollutions faibles et ponctuelles survenant dans le réseau.

Le chlore, par sa grande efficacité à l'état de traces et par sa facilité d'emploi, est le réactif le plus utilisé pour assurer la désinfection de l'eau.

L'action microbicide, à faible dose s'explique par la destruction des diastases indispensables à la vie de germes microbiens.

En outre, le chlore est doté d'un pouvoir oxydant important favorable à la destruction des matières organiques [Degremont, 1989].

On introduit dans l'eau une dose de chlore légèrement supérieure au "test" si la température est inférieure à 10°C, et légèrement inférieure au test si la température est supérieure à 15°C. Pour être efficace la désinfection doit être effectuée sur une eau de bonne qualité. La teneur en MES doit être aussi réduite que possible, et au maximum égal à 1 mg/l.

La teneur en MO, en COT, et surtout en carbone organique assimilable (COA) doit être la plus faible que possible. S'il subsiste une teneur trop importante de ces paramètres, l'eau va consommer le résiduel du désinfectant ce qui permet la reviviscence éventuelle de bactéries [Degremont, 1989].

I.5- CONCLUSION :

L'objet d'une filière de traitement d'eau potable est généralement l'élimination totale ou partielle de certains corps existant dans l'eau brute de façon à ramener les paramètres aux niveaux fixés par la réglementation.

Une filière de traitement est constituée d'un ensemble de processus unitaire. Chaque processus unitaire de traitement influera sur un grand nombre de paramètres de qualité. Les effets des différents processus unitaires utilisés dans une filière ne doivent pas être considérés séparément, chaque sous ensemble en amont intervient dans le rendement et les effets de tous les sous ensembles situés en aval. , il peut donc y avoir un véritable processus itératif pour obtenir l'optimisation recherchée.

C'est du fait de cette interactivité et de cette complexité lors de l'exploitation des usines de traitement des eaux que l'utilisation des systèmes experts est plus que recommandée.

Le chapitre suivant décrit les fondements théoriques des systèmes experts.

CHAPITRE II : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET SYSTÈMES EXPERTS

II.1- INTRODUCTION :

Les systèmes experts émergent dans les années soixante-dix dans les laboratoires américains de recherche en informatique au sein des équipes d'une discipline intitulée « Intelligence Artificielle ».

L'Intelligence Artificielle est définie comme étant un domaine de l'informatique qui vise à conférer à l'ordinateur un comportement reconnu comme intelligent par l'homme. Cette intelligence sera reconnue principalement par la manipulation d'informations de nature symbolique (d'où l'autre appellation : informatique symbolique) [Feigenbaum, 1985].

II.2- SYSTÈMES EXPERTS [SE]

II.2.1- Définition :

Les systèmes experts sont à l'origine du succès médiatique et industriel de l'IA. Il existe de nombreuses définitions dans une littérature désormais abondante sur ce sujet. Nous retiendrons celle de H. Farreny [Farreny, 1985].

Un système expert est un programme informatique interactif qui utilise des connaissances et des procédures d'inférences dans le but de résoudre des problèmes dont l'expertise est :

- Insuffisamment explicite pour être ramenée à une méthode algorithmique.
- Sujette à évolution.

II.2.2- Objectifs communs aux systèmes experts :

Un système expert doit répondre aux impératifs fondamentaux suivants :

Objectif 1 : Permettre l'expression la plus aisée des connaissances.

Objectif 2 : Supporter l'ensemble des connaissances et prévoir leur évolution.

Objectif 3 : Reasonner sur l'ensemble de ces connaissances pour en déduire d'autres et rendre compte de la manière de procéder [Djouadi, 1997; Farreny, 1985].

II.2.3- Principales différences entre programmation classique et systèmes experts :

Contrairement aux programmes classiques qui intègrent en un seul ensemble données et méthodes de résolution, les systèmes experts séparent les connaissances propres aux domaines d'expertise des mécanismes de raisonnement qui les utilisent et les interprètent.

Ces mécanismes sont indépendants du domaine d'expertise et peuvent être utilisés d'un domaine à un autre, d'où la notion de moteur d'inférences.

L'expertise humaine étant essentiellement évolutive, une structuration spécifique des connaissances permet dans les systèmes experts l'ajout, la suppression et la modification des règles de raisonnement [Benabdelouaheb, 1992].

Un parallèle avec un système classique fera mieux ressortir les différences essentielles (Tableau II-1).

Programmes classiques Traitement de données	Systèmes experts Traitement ou ingénierie des connaissances
<p><u>Données :</u> En général : valeurs numériques</p> <p><u>Programme :</u> Algorithme de résolution séquentiel (transformation du problème)</p> <p><u>Remarque :</u> l'ordre et la nature des opérations effectuées sont prédéterminés (→ impose l'ordre d'acquisition des données).</p>	<p><u>Faits :</u> Structures de données complexes chargées de sens</p> <p><u>Connaissances :</u> Opérateurs « élémentaires de transformations des faits</p> <p><u>Contrôle :</u> - Détection du but - Détermination des opérateurs applicables - Décision sur sélection de celui qui va être appliqué.</p> <p style="text-align: right;">} Représentation des connaissances</p>

Tableau II-1 : Comparaison des structures des programmes classiques et des systèmes experts.

II.2.4- Typologie des systèmes experts :

Les caractéristiques des systèmes experts ouvrent de nombreux domaines d'application. Une liste d'applications génériques des systèmes experts a été développée par Gevarter (1987) [Cres, 1989] que nous résumons dans la Figure II-1.

Cette liste inclut :

Interprétation : déduire la situation d'un système en se basant sur des données empiriques.

Diagnostic : déduire les pannes d'un système par l'observation des défauts de fonctionnement (symptômes).

Réparations : recommandations des mesures à prendre pour corriger des situations adverses.

Design ou conception : d'un objet, en respectant des contraintes, et éventuellement en optimisant une certaine fonction-objectif. En d'autres termes, c'est la configuration d'un système sur la base de possibilités alternatives.

Prédiction : déduire ce qui se passera dans le futur en se basant sur les informations actuelles et passées.

Suivi de processus (ou monitoring) : observation d'une situation progressive pour son progrès prédit ou projeté, et entreprise des modifications si elle dévie des objectifs attendus.

Planification : sélection d'une série d'actions d'une matrice d'alternatives pour réaliser un ou plusieurs buts.

Contrôle : s'assurer des conditions d'exécution d'actions appropriées nécessaires pour accomplir des buts.

Instruction : utilisation pour apprendre ou former.

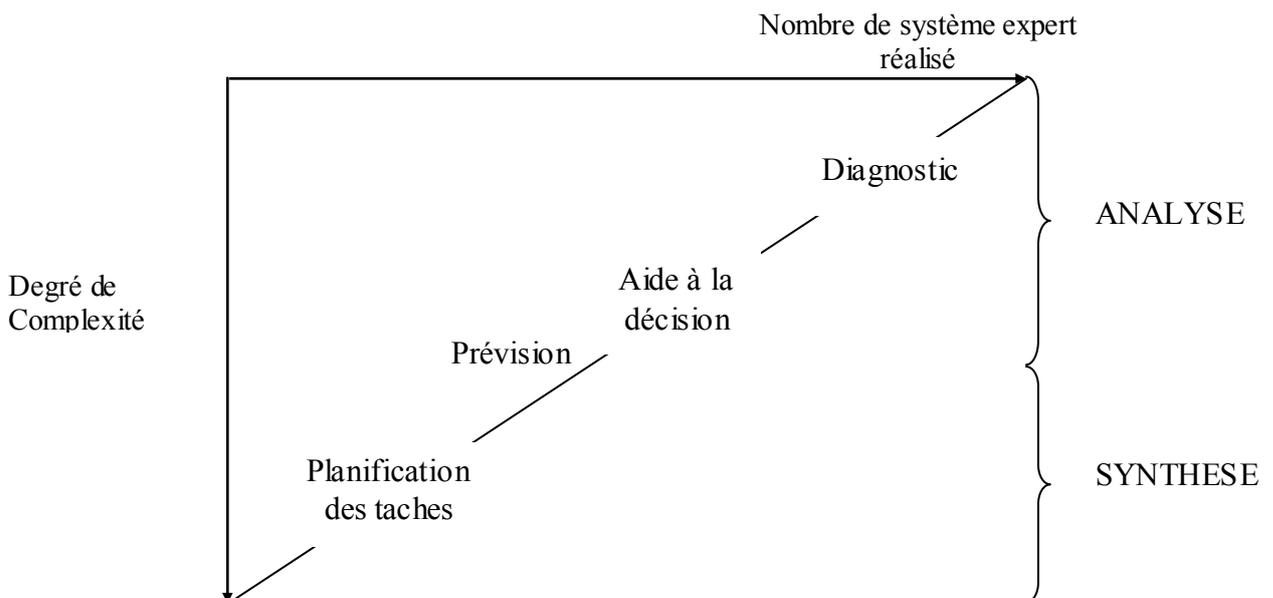


Figure II-1 : Typologie des systèmes experts [Cres, 1989].

La différence entre le diagnostic et l'interprétation se situe dans l'interaction entre le programme et le problème. En effet, un problème d'interprétation de données est entièrement posé au départ, tous les éléments à analyser sont contenus dans les données à interpréter, alors que dans un système de diagnostic, une grande part est réservée à l'interaction, le système pouvant requérir des informations complémentaires non disponibles au départ [Collins, 1990; Dominé, 1988; Nix et al., 1989].

II.2.5- Structure de base d'un système expert :

La structure de base d'un système expert peut se décomposer en deux grandes parties :

- Une base de connaissance;
- Un moteur d'inférences (Figure II-2.).

II.2.5.1- Base de « connaissances » : Elle contient la connaissance spécifique du domaine. Elle doit être organisée de façon dynamique et évolutive. Cette base est en fait constituée de deux bases distinctes :

- Une base de faits;
- Une base de règles

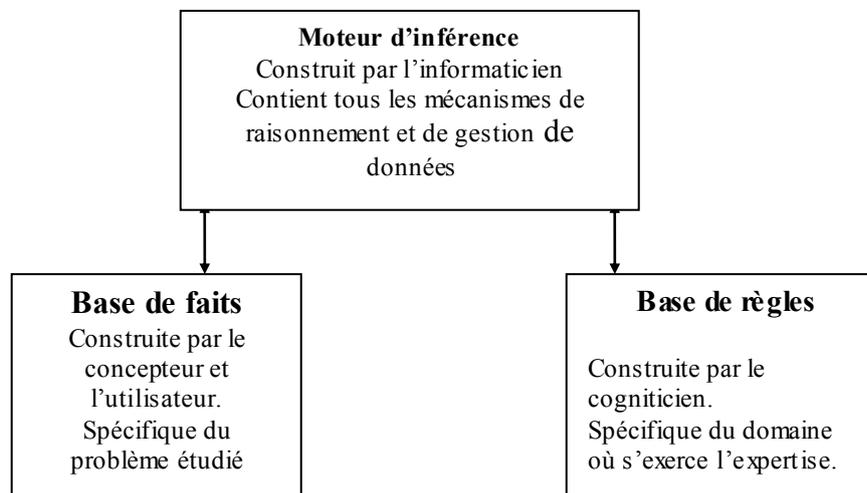


Figure II-2 : Structure de base d'un système expert [Valiron, 1988].

a- Base de « faits » : c'est la mémoire de travail du système expert, elle est construite par l'utilisateur, chaque fois qu'il veut résoudre un problème particulier, il expose des faits et pose des questions [Valiron, 1989].

Les faits sont des granules de connaissances assertionnelles pouvant être créés ou détruits par l'exploitation des règles.

Les faits peuvent être de deux types : [Bonnet, 1984].

-Les faits permanents du domaine qui sont toujours présents dans la base de fait.

-Les faits propres à une situation particulière, lesquels sont observés et introduit par l'utilisateur dans la base de faits.

b- Base de "règles" : elle contient l'expertise collectée dans le domaine traité par le cogniticien, qui est en fait l'ingénieur de la connaissance.

Elle permet, à partir des faits connus, de tirer des conclusions qui s'ajoutent à la base des faits. Elle doit représenter la connaissance dans un formalisme adéquat utilisable par le "moteur d'inférences" [Bonnet, 1984].

II.2.5.2. Moteur d'inférences : Le moteur d'inférences est la partie créative du système. À partir de règles et de faits, il génère de nouveaux faits afin de réaliser la résolution effective du problème [Alliot, 1994].

Un moteur d'inférences travaille suivant un cycle dit cycle de fonctionnement de base [Farreny, 1985]. Il est constitué de deux phases :

- La phase d'évaluation ;
- La phase d'exécution.

Schématiquement (Figure II-3) en phase d'évaluation, le moteur détermine s'il existe dans la base de règles, des règles à déclencher au vu de l'état courant de la base des faits, et si oui quelles sont ces règles ? En phase d'exécution le moteur déclenche les règles retenues par l'évaluation.

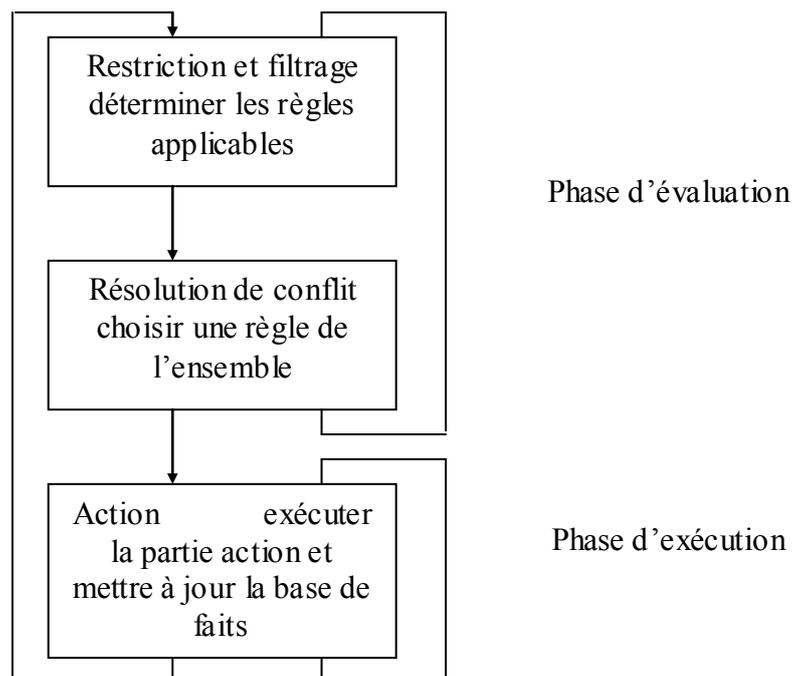


Figure II-3 : Cycle élémentaire de fonctionnement d'un moteur d'inférences [Farreny, 1985].

L'arrêt du moteur est recommandé soit en phase d'évaluation, soit en phase d'exécution. Un arrêt en phase d'évaluation proviendra de l'absence de règles déclençables au vu de l'état courant des bases de faits et de règles. Un arrêt en phase d'exécution résultera d'un ordre donné par l'une des règles déclenchées.

II.2.6. Critères de différenciation des moteurs d'inférences :

Les moteurs d'inférences peuvent être différenciés par certains critères qui déterminent leur fonctionnement et leurs aptitudes.

II.2.6.1. Classement par modes d'invocation des règles :

Il existe deux modes de déclenchements des règles. Le système peut établir un raisonnement soit en cherchant à déduire de nouveaux faits des règles qu'il connaît, soit en cherchant à trouver la valeur de vérité d'un fait, c'est-à-dire vérifier une hypothèse.

Les deux modes de raisonnement sont dits respectivement chaînage avant et chaînage arrière [Bonnet, 1984; Farreny, 1985; Gondran, 1986].

A-1) Le chaînage arrière :

Dans ce mode, le raisonnement est guidé par les buts. Étant donné un but fixé, il s'agit d'examiner les règles concluant ce but. Le processus est répété en prenant pour nouveaux buts les faits introduits non établis par le déclenchement de règles de l'étape précédente. Le moteur s'arrête lorsqu'il atteint des faits connus ou en échouant sur un fait nécessaire qui ne peut être prouvé (Figure II-4).

Exemple de chaînage arrière :

Soit la base de connaissance suivante :

Règle R1 :	SI Z et L	alors S
Règle R2 :	SI A et N	alors E
Règle R3 :	SI D ou M	alors Z
Règle R4 :	SI A	alors M
Règle R5 :	SI Q et (non W)	alors N
Règle R6 :	SI L et M	alors E
Règle R7 :	SI B et C	alors Q

Faits connus = (A, L) / but à prouver E

Raisonnement en chaînage arrière pour prouver le fait E.

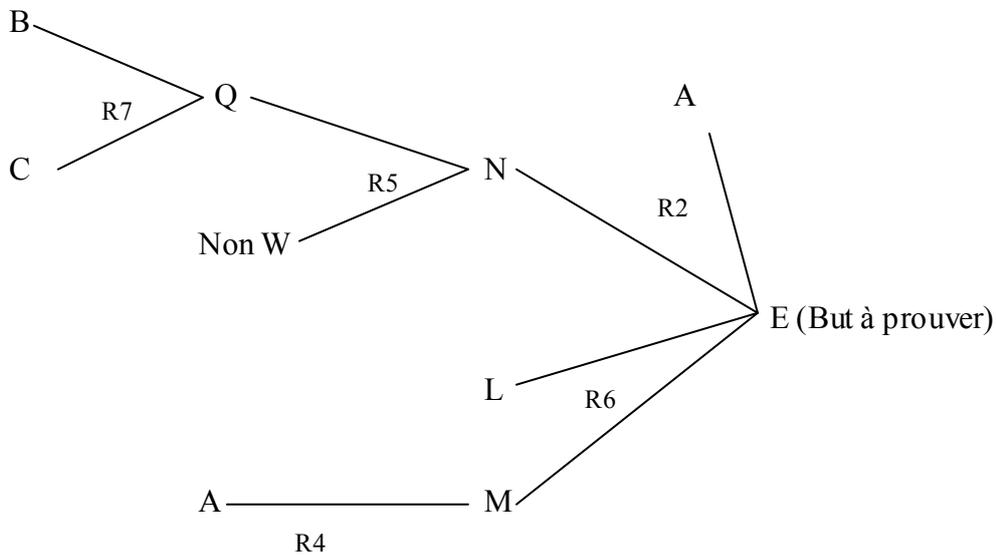


Figure II-4 : Chaînage arrière.

Explication :

E -----> est le but à prouver, il peut être prouvé par R2 ou R6

On essaye la première règle R2 :

A et N -----> à prouver, A est connu,

N est le nouveau sous but, il peut être prouvé par R5.

On applique R5 pour prouver N,

Q et (NON W) -----> à prouver

Q est le nouveau sous but, il n'est prouvé que si B et C le sont.

Or B n'est pas prouvable ----> **ÉCHEC**

Cet échec se répercute sur Q et N, d'où R2 ne peut être tirée.

On essaye alors la règle suivante R6 :

L et M -----> à prouver, L connu (donné dans la base de fait initiale),
donc M nouveau sous but, il peut être prouvé par R4.

On applique R4 pour prouver M,

A -----> à prouver, or A est connu (par hypothèse) donc **SUCCÈS**.

Conclusion : E est prouvé par la règle R6

A-2) Le chaînage avant :

Ce type de raisonnement est guidé par les faits du problème. Il consiste à analyser continuellement la partie gauche des règles (prémisse) et à appliquer celles-ci chaque fois que c'est possible jusqu'à ce qu'un nouveau passage par toutes les règles ne donne plus de faits nouveaux (Figure II-5) [Tali-maamar, 1992].

Exemple :

On travaille sur la même base que l'exemple précédent.

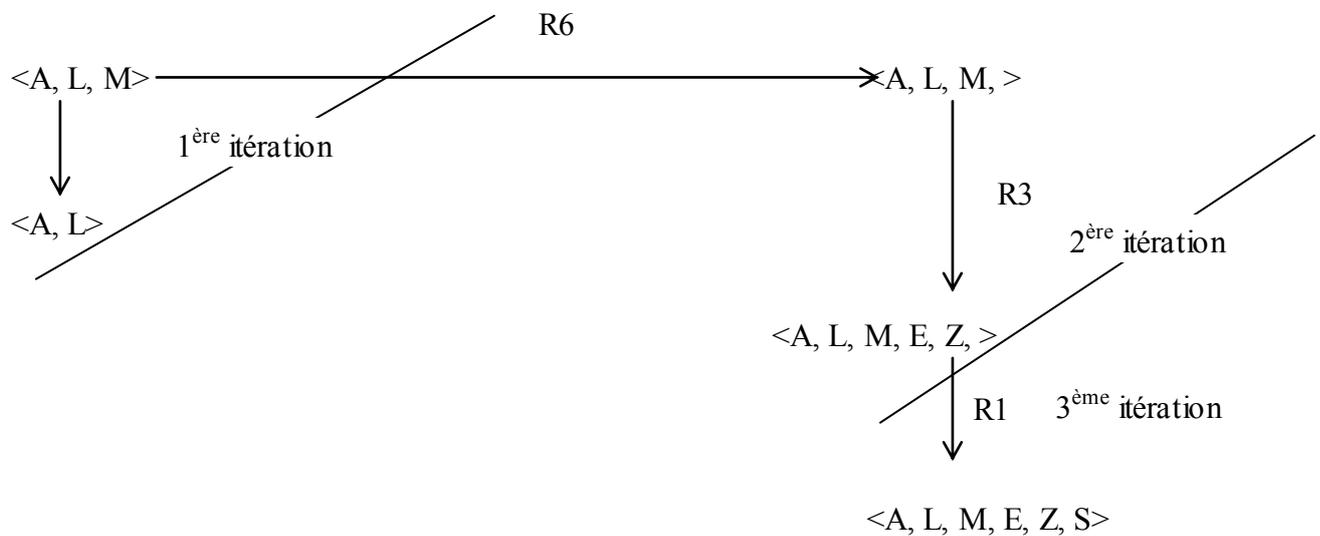


Figure II-5 : Chaînage avant.

Explication :

Le moteur examine l'ensemble des règles dont la partie gauche est vérifiée et apporte une nouvelle information :

- | | |
|----------------------------|---|
| 1 ^{ère} itération | On déclenche R4 et R6. |
| 2 ^{ème} itération | On déclenche R3
(Ce qui ne pouvait avoir lieu à la 1 ^{ère} itération car M n'était pas encore connu). |
| 3 ^{ème} itération | On déclenche R1.
(Ce qui ne pouvait s'effectuer avant car Z n'était pas connu). |
| 4 ^{ème} itération | plus de règle à appliquer. |

Le choix de l'un des deux raisonnements dépend de la nature du problème à résoudre. Généralement, le chaînage avant est utilisé dans la réalisation du problème dont le but n'est pas connu, dans le cas contraire, le chaînage arrière est conseillé car il limite l'explosion combinatoire.

Dans le cas de manque d'information que le système expert peut demander en cours du raisonnement, le chaînage arrière est aussi conseillé. En fait, les chaînages avant et arrière sont beaucoup plus complémentaires que concurrents.

Lorsque ces deux modes sont utilisés dans un même traitement, le raisonnement est alors dit à :

a- Chaînage mixte : lorsque les conditions des règles portent sur des faits établis ou des faits non établis.

b- Chaînage bidirectionnel : lorsqu'il y a une alternance de cycle utilisant le chaînage avant et le chaînage arrière [Farreny, 1985].

II.2.6.2. Classement par type de stratégies de résolution :

Trois grands types de stratégie existent :

A- Stratégie (1) : Recherche sans mémorisation et sans retour ou contrôle irrévocable :

Le principe est de choisir à chaque instant une règle applicable en fonction d'un certain critère, et de ne jamais revenir en arrière. Cela revient donc à avancer d'un pas à chaque fois, en « espérant » que le chemin choisi mène à la solution recherchée.

En réalité, lorsque certaines conditions sont satisfaites, ce mécanisme est applicable. Principalement, deux types de problèmes peuvent relever d'une telle stratégie de recherche.

D'une part, tout problème dans lequel le processus de résolution consiste à accumuler des résultats sans qu'il soit jamais nécessaire de les remettre en cause : processus purement déductif, d'autre part, tout problème dans lequel l'obtention d'un élément ne bloque jamais la possibilité d'en obtenir ultérieurement un autre complémentaire ou simplement différent (système commutatif).

B- Stratégie (2) : Recherche avec « retour arrière » (backtrack) :

Le principe du retour arrière consiste à :

- Explorer un chemin jusqu'à rencontrer une butée (succès ou échec) ;
- Dans ce cas, remonter au dernier choix effectué, et prendre une autre voie.

Le retour arrière est plus souple que le contrôle irrévocable car il autorise les échecs. Le prix à payer est la conservation en mémoire du chemin parcouru. Le backtrack est donc un processus à mémoire.

En contre partie il présente les inconvénients suivants :

-Le retour arrière n'offre pas de garantie de terminaison. En particulier, si l'espace de recherche n'est pas borné en profondeur, le processus poursuit l'exploration du chemin entamé indéfiniment.

-Le programme ne « voit » pas quand il repasse deux fois au même endroit. Il lui faudrait donc une mémoire explicite du chemin parcouru.

C- Stratégie (3) : Recherche en graphe :

Un graphe est un ensemble de nœuds dont certaines paires sont connectées par des arcs. Le principe de cette recherche est de conserver la trace de tous les nœuds qui ont été rencontrés.

On distingue :

- Stratégie « En largeur d'abord » :

Cette stratégie explore toutes les possibilités d'un même niveau avant de passer au niveau supérieur (Figure II-6) [Châtain, 1988].

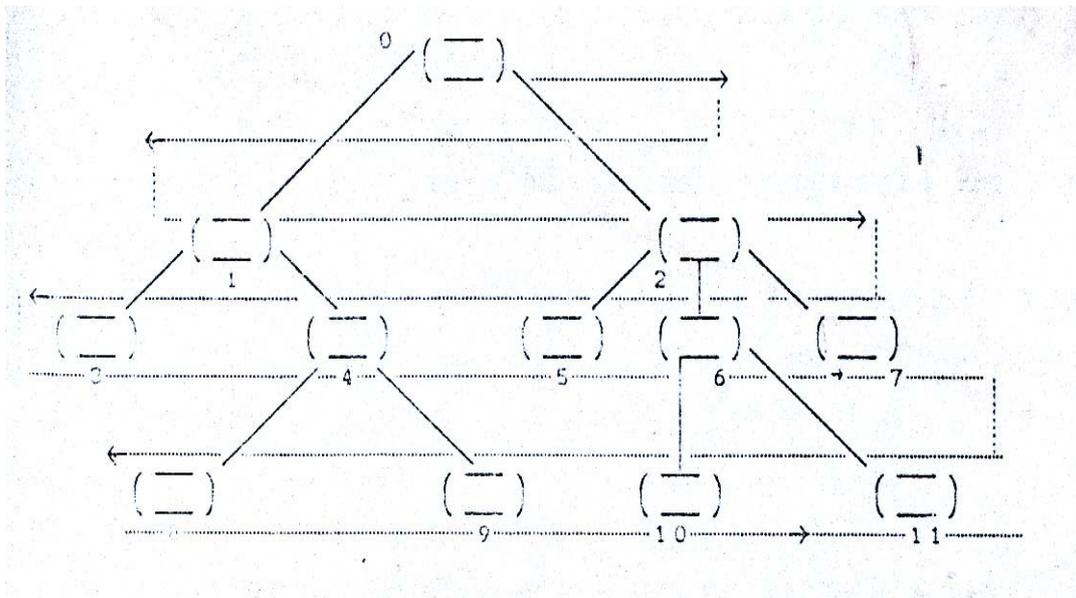


Figure II-6 : Exploitation d'arbre en largeur d'abord.

- Stratégie « En profondeur d'abord » :

Celle-ci explore une possibilité jusqu'à son aboutissement final avant de s'occuper des autres possibilités existantes à chaque niveau (Figure II-7) [Tali-Maamar, 1992].

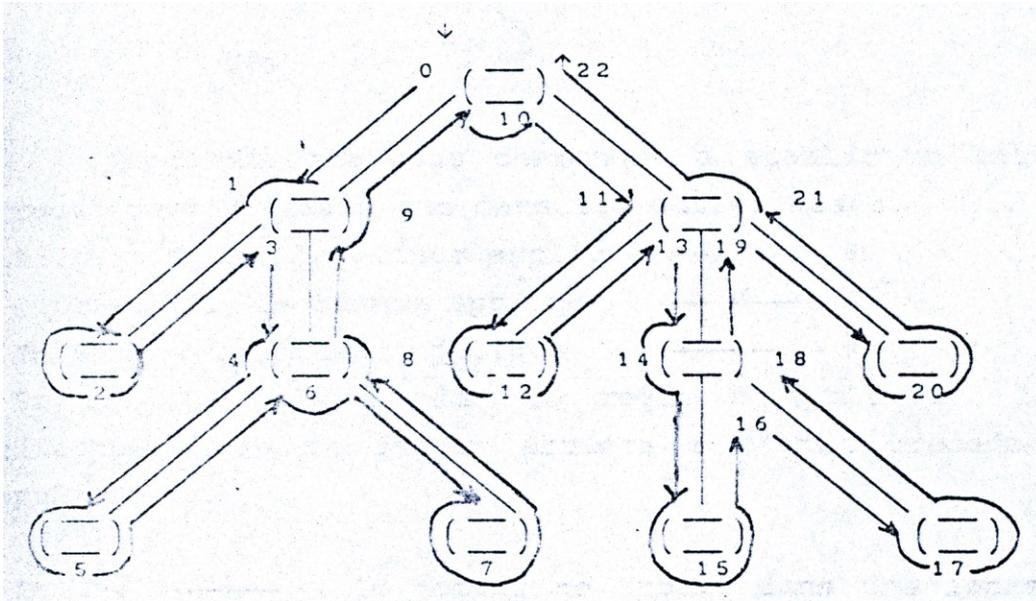


Figure II-7 : Exploitation d'arbre en profondeur d'abord.

II.2.6.3. Classement par ordre du moteur :

Le type de connaissance à représenter détermine l'ordre du moteur à utiliser.

Un moteur d'ordre 0 utilise la logique des propositions. Il n'inclut aucune variable dans les faits ou les règles. Cependant, un moteur d'ordre 1 utilise des variables dans les règles (logique des prédicats) [Farreny, 1985].

II.2.7. Les interfaces :

Un système expert peut contenir, en plus des deux éléments de base cités précédemment, d'autres éléments essentiels appelés interfaces, le rendant plus convivial et plus facile d'utilisation tels que (Figure II-8) :

- Un module d'interaction avec l'utilisateur : composé par exemple de différents types de menus.

- Un module d'explication et de trace de raisonnement tenu lors d'une consultation du système : le système est capable de justifier la conclusion à laquelle il a abouti.

-Un module d'aide à l'acquisition des connaissances : aide le concepteur lors de l'élaboration de la base de connaissance (génération automatique de la connaissance, vérification de sa cohérence, etc.)

-Une interface avec des applications extérieures : base de données, programmes externes, etc.

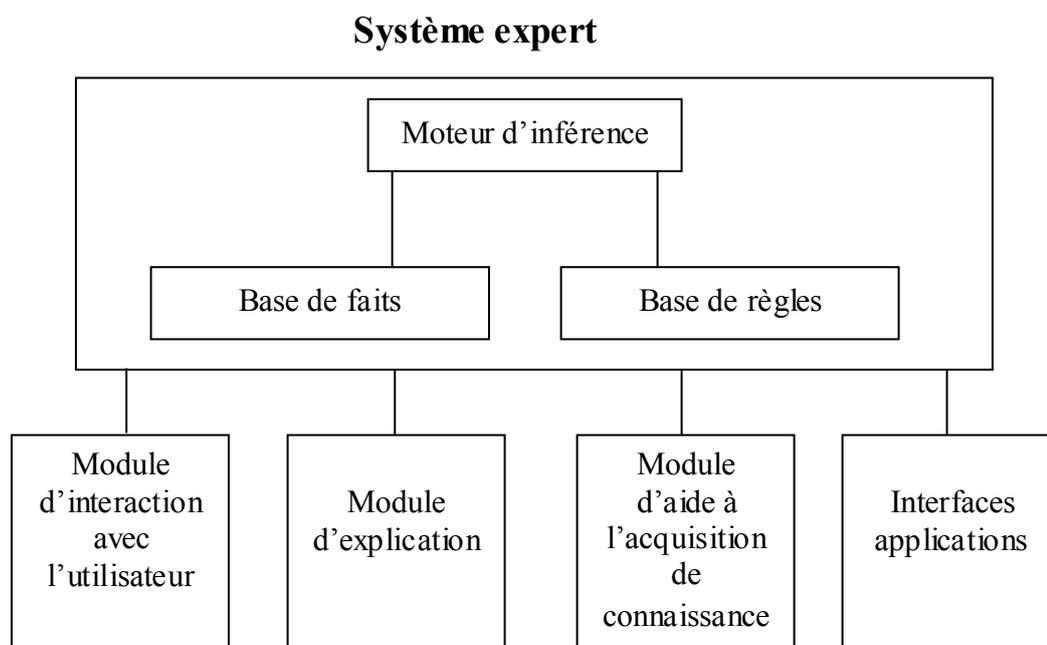


Figure II-8 : Le système expert et ses interfaces.

II.2.8- Les outils de développement d'un système expert :

Pour construire un système expert, on dispose de plusieurs langages.

A-1) Les langages de programmation classique :

Les langages de programmation classique tels que : Basic, C, C⁺⁺ et ADA, peuvent être utilisés pour la réalisation d'un système expert. Cependant, ces langages présentent plusieurs inconvénients parmi lesquels on peut citer :

- Difficulté de la représentation des connaissances ;
- Pas d'outils spécifiques au développement du système expert ;
- Le développement des algorithmes est lent et lourd (tout est à écrire).

A-2) Les langages de programmation de l'IA :

Les langages de l'IA permettent de manipuler des informations essentiellement de nature symbolique. Cet aspect correspond à l'approche système expert qui traite une information symbolique plutôt que numérique. Il existe plusieurs langages de programmation spécifique à l'IA. Les deux représentants les plus célèbres de cette famille sont sans conteste LISP, pour LISt Processing, et PROLOG pour PROgrammation en LOGique, qui est également un moteur d'inférences.

A-3) Les langages orientés objets :

La programmation orientée objet date des années 70. C'est une méthode qui vise à améliorer la conception et la maintenance d'application informatique. Il existe plusieurs langages à objets dont les principales caractéristiques résident dans l'encapsulation, le polymorphisme, l'héritage et la notion de message. Parmi les langages orientés objets on distingue le CLOS.

A-4) Les générateurs de systèmes experts (Shell) :

Ce sont des outils de développement de systèmes experts commercialisés. Un générateur de système expert (G.S.E) est une coquille vide qu'il faut remplir, il rassemble, en plus du moteur d'inférences, des utilitaires de développement et d'exploitation indispensables. C'est un ensemble de logiciel (S.G.B.D, traceurs, ...etc.) prêts à recevoir des connaissances afin de devenir un SE [Farreny, 1985; Bonnet et Truong-Ngoc, 1986].

Il existe de nos jours, plusieurs générateurs de systèmes experts développés pour des domaines qui manipulent un même type de connaissance (Logique des prédicats, réseaux sémantiques, ...etc.) tels que :

EMYCIN, AGE, SMECI, PERSOAL CONSULTANT, NEXPERT OBJECT, GENESE, etc.

❖ Le générateur de système expert *EMYCIN* [VAN MELLE, 1979] :

Le générateur de système expert EMYCIN est dérivé du SE MYCIN. Cet outil de développement de SE est particulièrement approprié aux problèmes de diagnostic. Il incorpore le raisonnement approximatif en manipulant l'incertain ; son régime est irrévocable et son raisonnement est monotone.

Ce générateur comprend :

- Un système de consultation constitué :
 - d'un moteur d'inférences ;

- d'un module de dialogue avec l'utilisateur ;
- d'un module d'explication du raisonnement.
- Un système d'aide à l'acquisition et à la formalisation d'une base de connaissance.

❖ ***Le générateur de système expert AGE [N II et AIELLO 1979] :***

Ce générateur constitue un cadre de développement plus général que celui proposé par MYCIN [Bonnet, 1986 ; Benchimiol et al., 1990].

C'est effectivement un outil très évolué permettant au concepteur de préciser le cadre du système expert à développer.

Il comprend essentiellement :

- Un système de conception pour l'aide au développement du système expert.
- Un ensemble d'éditeurs pour entrer les informations sur la commande du système.
- Un interpréteur assurant l'essai du système expert.
- Un module d'explication du raisonnement.

❖ ***Le générateur de système expert GURU [MDBS, 1986] :***

Leader mondial des outils de développement de SE sur micro ordinateurs, Le générateur de systèmes experts GURU a été conçu par la société MICRO DATA BASE SYSTEM (MDBS 1980). Il est écrit en langage C. C'est un logiciel intégré qui, en plus de son pseudo compilateur et de son éditeur comprend un système de gestion de base de données (SGBD), un tableur, un grapheur et un traitement de texte [Holsapple, 1987; Fredouet, 1989].

II.2.9. Les étapes de développement d'un système expert :

Le développement d'un système expert est un processus complexe et itératif. Il comprend quatre étapes :

- Acquisition des connaissances
- Représentation et implémentation des connaissances
- Vérification
- Validation.

II.2.9.1. Étape d'acquisition des connaissances :

C'est l'étape la plus décisive et la plus prenante [Nix et Collins, 1991].

L'acquisition ou le transfert des connaissances implique : identifier, analyser et interpréter la connaissance qu'un expert humain utilise lorsqu'il résout un problème particulier [Kidd, 1987].

En effet, les experts disposent généralement d'une capacité inestimable de raisonnement et de bon sens qu'ils ne peuvent exprimer formellement. Dans la pratique, beaucoup d'experts se comportent comme de véritables « boîtes noires » qui savent très bien résoudre un problème posé, mais sont quelques fois incapables d'expliquer comment ils procèdent.

Lors de l'étape d'acquisition des connaissances, on est confronté à deux obstacles, [Fredouet, 1989] qui ont trait d'une part à la difficulté du savoir faire de l'expert, et d'autre part à la méthodologie d'acquisition à mettre en œuvre.

La qualité du système final dépend largement de l'énergie et du temps investis lors de cette étape [Gagnon et Sérodes, 1993].

II.2.9.2. Étape de représentation et implémentation des connaissances

La formalisation des connaissances consiste à traduire informatiquement les concepts et relations d'un domaine de façon à ce que le moteur d'inférences puisse les utiliser.

Le premier critère à considérer lors du choix d'un outil est le pouvoir expressif du formalisme proposé, c'est-à-dire l'étendue de la représentation des connaissances comprises et interprétables par le moteur d'inférences. Il y a toujours un compromis à trouver entre un formalisme riche mais qui peut être difficile à maîtriser et un formalisme simple qui oblige le concepteur du système à développer lui-même des possibilités nouvelles pouvant se greffer sur l'existant [Bonnet et Truong-Ngoc, 1986].

II.2.9.2.1. Les techniques de représentation des connaissances :

La diversité des méthodes de représentation des connaissances est au moins égale à celle des définitions de la connaissance.

A- Représentation procédurale :

Les connaissances procédurales englobent la programmation dite classique. Ces connaissances indiquent explicitement comment elles sont utilisées. Elles se présentent sous forme d'automates finis représentant des protocoles ou planning d'actions ou des programmes décrivant une série d'actions à exécuter en séquence. Dans ce cas, les connaissances et leurs traitements sont confondus.

B- Représentation déclarative :

Contrairement aux connaissances procédurales, les connaissances déclaratives n'indiquent pas explicitement comment elles sont utilisées. Ces connaissances sont pour le moteur ce qu'est une donnée pour un programme. Une connaissance déclarative ne peut fonctionner seule, elle a besoin d'un complément procédural qui l'interprète. Un système ne peut donc être complètement déclaratif (nécessité de la présence d'un moteur d'inférences), par contre il peut être complètement procédurale [Benabdouaheb, 1992 ; Tali maamar, 1992].

C- Règles de production :

Les systèmes à base de règle de production forment la plupart des systèmes experts opérationnels. Ils ont une allure comparable à celle des systèmes logiques.

Une règle de production est un couple (situation, action), à chaque fois que la situation (prémisse) est reconnue, l'action est exécutée.

Si prémisse **Alors** action.

Exemple : RULE : RCT0

IF :(quale="mauvaise")

THEN :diagtur= {vturet>vnturet}.

REASON : **si** l'eau traitée est de mauvaise qualité, **alors** :- la valeur de la turbidité de l'eau traitée est supérieure à la valeur normative.

Chaque règle est un morceau indépendant de connaissances elle contient toutes les conditions de son application.

Les règles ne s'appellent pas entre elles ; elles sont écrites en vrac sans savoir à l'avance comment elles seront utilisées.

Cette modularité facilite l'ajout, la suppression et la modification des règles. Cependant, une masse importante des connaissances peut induire un problème d'incohérence de la base [Bonnet, 1984].

Les systèmes à base de règles de production présentent plusieurs aspects dont :

- L'aspect procédural se traduisant par l'interaction du système avec l'utilisateur.
- L'aspect logique se résume à tirer des conclusions, supposer, vérifier ou infirmer des faits.
- L'aspect stratégique consiste à faire des choix du parcours de la base de connaissances.

Les règles de production sont donc potentiellement aptes à traiter tous les problèmes [Bonnet, 1984].

Les principaux avantages des systèmes à base de règle de production se résument à :

- La modularité : les connaissances étant donné en vrac, chaque unité d'information peut être changée ou ajoutée sans modifier les autres informations.
- La lisibilité : facilité de consultation et d'écriture de la connaissance par un expert et simplicité de la vérification automatique de la base de connaissance par machine.
- La facilité d'auto explication.
- L'efficacité du raisonnement en fournissant des solutions multiples [Laurière, 1982].

En contre partie, les inconvénients de ce formalisme de représentation sont :

- La difficulté de concevoir une règle de production correspondant à un élément de connaissance (dépendance des éléments d'une prémisse).
- La difficulté d'écriture de toutes les règles sous un format unique de la forme :
Si "condition" Alors "action".
- La difficulté d'utilisation des règles, celles-ci ne s'appellent pas entre elles, ce qui peut causer une lourdeur dans le déroulement du raisonnement.

-Les règles de production ne permettent pas une représentation aisée des connaissances et de leurs inter-relations.

D- Les réseaux sémantiques (la structure objets-relations) :

Un réseau sémantique est un graphe composé de nœuds reliés par des arcs. Les nœuds et les arcs sont en général étiquetés, aux premiers sont associés les objets (concepts, événements, situations, ...), aux seconds, les relations entre ces objets : d'où la désignation de « structure objets-relations » adopté pour ce formalisme.

Les réseaux sémantiques ont une structure hiérarchique qui permet la transmission de propriétés à travers les relations entre concepts. Cette structure évite, ainsi, la répétition des représentations de certaines informations.

Ils peuvent être représentés sur machine par des relations de la forme :

REL (a1, a2, a3, a4, ...) REL= relation ; ai = concept.

Un de leurs avantages essentiels réside dans le regroupement « physique » autour d'un concept, de tous les éléments qui lui sont associés. Malheureusement, les limites techniques du procédé sont importantes. Lourdeur de la représentation, qui devient très difficile à gérer dès que la base de connaissance prend une taille significative et le manque de rigueur du formalisme [Bonnet, 1984].

E- Représentation mixte (la structure modèle) :

Vu que les représentations procédurales et déclaratives présentent certains inconvénients, la représentation mixte a été proposée pour y remédier, en combinant les avantages des deux précédentes. La représentation mixte est un formalisme objet.

Un objet est une structure qui décrit un élément de l'univers de la connaissance. Il peut représenter une chose concrète (une chaise, un arbre) ou une entité abstraite (un concept, une hypothèse).

E-1) FRAMES :

Les frames ont pour origine les travaux menés en I. A., par Minsky en 1975, pour la compréhension des images et du langage naturel (analyse des formes, de la parole et de l'écriture).

Un frame est une structure de données permettant de représenter un objet ou une situation stéréotypée. Les frames peuvent être considérés comme une génération de réseaux sémantiques [Benabdelouaheb, 1992].

E-2) SCRIPTS :

La notion de scripts (schéma) a été introduite sur le modèle des frames, par Schauk et Abelson (1977) pour décrire une séquence stéréotypée d'événements dans un contexte particulier [Alliot, 1994 ; Dominé, 1988].

Une comparaison entre les différentes techniques de représentation des connaissances a été réalisé par certains auteurs et que nous récapitulons dans le **Tableau II-2** :

	Auto- mate	Programme	Prédicat	Production	Réseau	Frame	Script
Connaissances déclaratives	2	1	3	3	3	3	3
connaissances procédurales	3	3	1	2	1	3	3
Coeff. de crédibilité	2	2	1	3	2	3	3
Méta-règles	1	3	2	3	2	3	3
Connaissance ad hoc	2	3	1	2	2	3	3
Taille du fragment	gros	gros	petit	moyen	petit	gros	gros
Explication	1	1	2	3	2	1	1
Facilité d'utilisation	2	1	2	3	2	1	2
Modularité	2	1	3	3	3	2	2
Facilité d'extension	2	1	3	3	3	2	2
Efficacité temps d'exécution	2	3	1	2	1	2	2
Tolère les inconsistances	2	2	1	3	1	3	3
Théorie disponible	3	2	3	2	3	1	1

1=Mauvais 2=Moyen 3=Bon

Tableau II-2 : Comparaison des méthodes de représentation de connaissances.

F- Les méta-connaissances :

Les méta-connaissances sont des connaissances sur la façon d'utiliser les connaissances. En effet, un système qui comporte une méta-connaissance possède en lui deux sous systèmes, l'un relatif au domaine traité, et l'autre à la stratégie de raisonnement opérée sur les connaissances du premier, indiquant ainsi les règles qu'il convient de déclencher en priorité lorsque certains faits sont connus [Bonnet et Truong-Ngoc, 1986].

Un système qui utilise des méta-connaissances est un système à deux niveaux de connaissances. Aussi, il est possible d'augmenter encore le nombre de niveaux de connaissance ; on parle alors de méta-métaconnaissances.

Dans un système expert basé sur les règles de production, les méta-connaissances se représentent par des règles dites méta-règles. Cette façon d'organiser la connaissance en niveaux possède un avantage et un inconvénient. L'avantage est d'avoir le contrôle dans le corps même de la règle (chaque règle véhiculant ses propres raisons d'application). L'inconvénient est que la partie prémisse des règles (dans un système basé sur les règles de production) risque de s'alourdir.

G- La représentation de l'incertain :

Le savoir humain qu'on cherche à représenter dans une base de connaissances d'un système expert est souvent entaché d'incertitudes et d'imprécisions. Il est donc très important de quantifier et de manipuler l'incertain, de façon à tenir compte de l'indéterminisme des problèmes traités et à le propager tout au long des raisonnements [Bonnet et Truong-Ngoc, 1986 ; Ernst, 1988; Farreny, 1985].

Un fait est incertain lorsqu'il contient une assertion dont on ne peut pas affirmer ou infirmer la véracité. La règle est incertaine lorsqu'elle produit des conclusions incertaines même à partir de prémisses certaines.

Un fait est imprécis s'il implique des objectifs incomplètement identifiés. Une règle est imprécise si elle implique des faits imprécis en prémisse ou en conclusion. Mise à part l'incertitude de l'imprécision inhérente aux connaissances lors de leurs manipulations. Le raisonnement effectué sur ces connaissances est susceptible d'être valide ou plausible.

Un raisonnement est dit valide quand il donne une conclusion certaine à partir de prémisses certaines.

Un raisonnement est dit plausible si la conclusion inférée à partir de prémisses, peut être incertaines.

La façon la plus classique de traiter l'incertain est essentiellement fondée sur l'utilisation du calcul des probabilités et de la logique floue (voir Annexe 3).

II.2.9.3. Étape de vérification :

C'est une étape qui débute dès l'implémentation et ne se termine que lorsque le système répond parfaitement aux objectifs définis au départ et satisfait les experts de l'équipe de développement.

Ce processus est donc itératif et demande une attention accrue ainsi qu'une vision globale de tout le système. On doit d'abord s'assurer que toute la connaissance entrée effectue les tâches prévues et aboutit aux résultats escomptés. Ensuite, il faut vérifier la similitude entre la logique suivie par le système et celle suivie par les experts. Au cours de cette étape, on peut s'apercevoir des lacunes ou erreurs provenant de toutes les étapes précédentes, et des réorientations importantes peuvent survenir dans le système.

Lorsque le système satisfait les objectifs initiaux, il peut être soumis à une validation par d'autres experts du domaine [Alliot, 1994].

II.2.9.4. Étape de validation :

Lors de cette validation, il est important que le système arrive aux mêmes conclusions que les validateurs, mais le processus de prise de décisions peut différer de celui suivi par le système, chaque expert raisonnant selon un patron qui lui est propre.

Un système est rarement, si ce n'est jamais développé par un processus précis de pas à pas ; les étapes décrites ci-dessus sont interactives et chevauchantes.

Un système expert n'est jamais achevé, chaque fois que de nouvelles connaissances sont acquises, la base de connaissance doit être mise à jour [Dominé, 1988].

II.2.10- Prototypage :

Le prototype d'un système expert est une version préliminaire, relativement simple d'un système expert. Il n'est pas projeté pour un usage général mais pour l'expérimentation. Les prototypes sont généralement construits pour établir la faisabilité et l'utilité d'un système grandeur nature. Le prototype est rapidement modifié par interaction avec l'expert.

Un système définitif est développé à partir d'un processus de construction de prototype et de validation.

Les systèmes de grandeur nature exigent généralement un investissement substantiel en capital et en temps [Collins, 1990; Nix et Collins, 1991].

II.2.11-Critères d'évaluation de la faisabilité d'une application :

Comme pour toute autre technologie, c'est important d'évaluer avec soin la faisabilité, l'utilité et l'efficacité des systèmes experts avant d'engager et de consacrer des ressources considérables. Quelques chercheurs ont développé des directives et des conditions pour décider à quels tâches ou type de tâches les systèmes experts devraient être appliqués [Hayes Roth et al. 1983 ; Ortolano et Perman, 1987]. Les questions suivantes se présentent comme un guide pour une telle évaluation [Allot, 2000; Dominé, 1988].

1. Critères concernant l'expert :

- **Est-ce que l'application exige un expert ?**

Un expert est une personne qu'est devenue familière avec un domaine spécifique sur une longue période de temps et peut faire un jugement correct.

- **Est-ce qu'un expert coopératif est disponible ?**

Il est important que l'expert soit motivé et affirme sa motivation, car le processus de constitution d'un système expert sur la base de sa connaissance est un exercice psychologiquement difficile.

L'acquisition de la connaissance requiert une participation très active et intense de l'expert. La disponibilité de celui-ci est donc une condition impérative.

2. Critères sur la complexité du problème :

- **Le domaine technique est il homogène et bien délimité ?**

Le mélange de compétences diverses est source de difficultés, notamment s'il faut raccorder entre elles des expertises plus ou moins bien en phase. La gestion de très grands volumes de connaissances n'est pas toujours bien maîtrisée, notamment sur le plan des performances.

- **Le problème est il décomposable en sous problèmes distincts ?**

La décomposition du problème en un certain nombre de sous problèmes distincts est un argument favorable. Il garantit notamment qu'on pourra fournir, au cours de la réalisation du système final des prototypes intermédiaires qui permettront de valider la démarche, et de maintenir l'intérêt des utilisateurs et des experts.

- **Est-ce que le développement du système expert permet l'utilisation des données dans un chemin productif pas possible auparavant ?**

Une donnée n'est pas une connaissance. La connaissance est extraite d'une base de données par étude et interprétation. En effet, le système expert conserve la connaissance qui lui permet d'agir en l'absence de l'expert humain.

3. Critères concernant l'utilisateur :

- **Est-ce que l'utilisateur projeté est un expert ou un non expert ?**

La réponse à cette question affectera la nature du système expert et ses avantages. Les avantages d'un système, dont le but est de capturer la connaissance d'un expert pour la mettre à la disposition des novices, sont complètement différents de ceux d'un système conçu pour aider l'expert. Pour un premier prototype, même une mise en oeuvre partiellement prospère peut être salutaire, mais pour le système définitif, seulement un système hautement évolué capable de fournir un support à une décision rapide serait jugé comme salutaire.

- **Est-ce que l'application proposée sera adoptée par ceux qu'il est projeté d'aider ?**

Certains se sentent menacés par le système expert; d'autres n'ont pas confiance. Ce sont des considérations importantes qui doivent être prises en considération.

4. Critères sur les objectifs visés :

- **Quels sont les avantages potentiels de l'application ?**

- Les avantages sont souvent difficiles à évaluer. Du moins, les avantages potentiels devraient être identifiés en les comparant avec l'effort exigé pour développer le système expert. L'analyse devrait prendre en considération l'engagement à long terme du système expert. Si l'engagement existe, un rapport intérêt/coût faible pour un premier prototype, et donc une première itération du processus de développement du système définitif est considéré comme bon [Nix et al., 1989].

Ces questions permettent d'évaluer la faisabilité et le succès possible d'une application de système expert.

II.3- LES SYSTÈMES EXPERTS RÉALISÉS DANS LES DIFFÉRENTS DOMAINES AUTRES QUE LE TRAITEMENT DES EAUX :

Des systèmes experts ont été développés dans différents domaines où une solution algorithmique est quasiment impossible.

Il est impossible de donner une liste exhaustive des systèmes experts écrits. Le Tableau II-3 donne un bon nombre de systèmes experts réalisés dans différents domaines.

Domaine	Thème	Nom	Auteurs
Chimie	- Interprétation de données de spectrographe de masse ; - Aide à la conception de plan de synthèse de molécules complexes ; - Recherche la structure de protéine à partir des résultats cristallographiques	DENDRAL	Feigenbaum
		SECS	Wipke
		CRISALYS	
Biologie	- Aide à la réalisation d'un plan de manipulation génétique pour construire des entités biologiques	MOLGEN	
Physique	- Résolution de problème de mécanique ; - Analyse de circuits électrique ; - Electronique ; - Découverte de lois ; - Résistance des matériaux	MECHO	Bundy
		SOPHIE	Brown
		EL	Brown
		BACON	Langley
		SACON	Bennett

Géologie	<ul style="list-style-type: none"> - Minérale : prospection minière ; - Pétrolière : détermination des lithofaciès - Pétrolière - Pétrolière 	PROSPECTOR LITHO DIPMETER ADVISOR	Duda Bonnet Davis Davis
Mathématiques	<ul style="list-style-type: none"> - Découverte de concepts ; - Résolution des : intégrales, équations différentielles ; etc. ; - Résolution d'intégrale 	AM MACSYSMA SNARK- INTEGRATION	Lenat Moses Laurière
Informatique	<ul style="list-style-type: none"> - Configuration de VAX ; - Diagnostic de panne. 	R1, XSEL, XCON ; DART	McDermott Bennet
Fabrication	<ul style="list-style-type: none"> - Conseil en conception de gamme d'usinage 	CARI	Descotte
Militaire	<ul style="list-style-type: none"> - Interprétation des signaux 	HASP/SIAP	Nii
Médecine	<ul style="list-style-type: none"> - Infection du sang et méningite ; - Médecine interne ; - Médecine interne ; - Cancer ; - Glaucome ; - Maladies rénales ; - Infection pulmonaire ; - Hypertension artérielle ; - Régulation du pH ; - Cardiologie - Ophtalmologie 	MYCIN INTERNIST CADUCEUS ONCOCIN CASNET PIP PUFF SAM ABEL DIGITALIS IRIS	Shortliffe Pople Pople Shortliffe Weiss Pauker Kunz Gascuel Patil Gory Trigoboff
Gestion et Administration	<ul style="list-style-type: none"> - analyse financière. - gestion du personnel 	PEGASE MANAGER	

Tableau II-3 : Les systèmes experts existants dans les différents domaines.
[Niar-dinedane, 1995; Nibouche, 1996; Tali maamar, 1992].

Cependant, les principaux systèmes experts réalisés dans le domaine de l'eau seront présentés dans le chapitre III.

II.4- CONCLUSION :

Un système expert est un programme informatique interactif qui utilise des connaissances et des procédures d'inférences dans le but de résoudre des problèmes en imitant un expert humain.

C'est un outil performant d'aide à la décision, il est capable de fournir un avis, un conseil, une recommandation, ou une décision.

L'utilisation de générateurs de systèmes est plus que recommandée pour le développement de systèmes experts, principalement lorsque le développeur est un novice dans ce domaine.

La réalisation d'un système expert se fait en quatre étapes qui sont : l'acquisition des connaissances, la formalisation et l'implémentation des connaissances acquises, la vérification et la validation. L'étape de l'acquisition des connaissances est une des étapes les plus prenantes, les plus décisives et les plus importantes dans le processus de développement d'un système expert.

Aucune méthode formalisée n'existe pour identifier correctement les domaines pour lesquels le développement d'une application de système expert serait profitable. Plusieurs critères conditionnent l'applicabilité et la faisabilité d'un système expert. Il est important de noter que les systèmes experts peuvent être des outils très utiles pour l'industrie en général, et l'industrie de l'eau en particulier. Cependant, et comme pour toute autre technologie, il est indispensable d'évaluer avec soin la faisabilité de l'application et de son intérêt avant d'engager des ressources considérables.

Étant donné, qu'un système expert générique dans le domaine de traitement de l'eau n'existe pas et qu'actuellement il est impossible de le réaliser, et que les systèmes experts développés se limitent à des applications spécifiques réalisées par les entreprises, le chapitre suivant traitera des applications existantes et potentielles des systèmes experts dans le domaine de l'eau.

CHAPITRE III. LES APPLICATIONS EXISTANTES ET POTENTIELLES DES SYSTÈMES EXPERTS DANS L'INDUSTRIE DE L'EAU :

III.1- INTRODUCTION

Un des problèmes les plus difficiles dans le développement de système expert est de justifier l'application. Il y a quelques années, on pensait que tous les problèmes peuvent être résolus par les systèmes experts. Mais tel n'est pas nécessairement le cas, et un examen prudent est toujours recommandé. Wolfgram et al. ont énoncé que « Beaucoup d'entreprises, excitées par le potentiel des systèmes experts, ont sauté, prématurément, dans le développement de système expert, ils ont aboutit à des résultats décevants et des surcharges financières » [Wolfgram et al., 1987].

Il y a juste quelques années, les micro-ordinateurs accompagnés de logiciels, tels que les systèmes de gestion de base de données (S. G. B. D.), les tableurs, et les systèmes de traitements de texte, sont entrés dans le domaine de l'eau. Aujourd'hui, ils sont bien acceptés. Les systèmes experts ont la possibilité d'influencer tous les aspects de fonctionnement des usines de traitement des eaux, pas seulement quelques applications isolées, comme c'est le cas pour les systèmes de gestion de base de données. Pour que ce potentiel puisse être réalisé, un passage régulier des systèmes expert dans l'industrie de l'eau a besoin d'être considéré avec soin.

L'expérience et les études entreprises ont montré que les systèmes experts peuvent être développés virtuellement pour toute situation où une expertise est exigée. Le degré avec lequel le système représente réellement ou imite l'expert est proportionnel au temps consacré au cycle d'acquisition de la connaissance, la formalisation, l'implémentation, la vérification, et la validation. Cependant, il existe une relation étroite entre la dimension de la station considérée et le niveau de sophistication du système expert à développer. Le niveau de détail est fonction du niveau de performance désiré, du temps et des ressources disponibles pour le développement. La question fondamentale est, par conséquent, si le système expert en projet est utile et mérite d'être développé ou pas. C'est une question clé et qui exige une évaluation personnelle [Nix et al., 1989].

III.2- ÉVALUATION DE L'INTÉRÊT D'UNE APPLICATION DE SYSTÈMES EXPERTS EN TRAITEMENT DES EAUX :

Un des critères qui détermine la convenance d'une application donnée de système expert est la question expansive d'avantages contre coûts. Un système expert peut être utilisé profitablement par une usine de traitement d'eau dans un ou plusieurs cas de figure [Kelleher, 1987] selon que le système expert développé soit destiné à l'expert décideur lui-même, ou alors à la suppléance de cet expert.

Dans le cas où le système expert est destiné à l'assistance technique de l'expert lui-même, il apporte trois bénéfices principaux :

- accroître la rapidité de traitement du problème ;
- améliorer la stabilité du traitement du problème ;
- améliorer la compétence de l'expert lui-même.

Alors que dans le cas d'un système expert destiné à la suppléance de l'expert, c'est à dire l'assistance technique des non experts, et c'est le cas de la majorité des applications réalisées de par le monde, et c'est le cas de notre application comme nous le verrons plus loin, il présente les avantages suivants :

- *La conservation* de la connaissance et de l'expertise même après le départ de l'expert : l'entreprise souhaitera naturellement, par le biais de la constitution de système à base de connaissances, préserver le capital technologique que constitue la présence d'experts. et étant donné que le capital technologique d'une entreprise en traitement des eaux relève de sa performance et donc fait parti du domaine de la confidentialité, chaque usine se voit obliger de développer son propre système expert, ce qui justifie notre application comme nous le verrons plus loin.
- *La distribution* des compétences sur logiciel est moins chère que le déplacement des experts. Ceci est due à la rareté des experts (exemple : spécialiste de la maintenance et du diagnostic des incidents), le caractère crucial des décisions qu'ils ont à prendre, et la multiplicité des sites sur lesquels l'intervention des experts est souhaitée. Ceci fait que la suppléance par un système expert est avantageuse

- Avec un système expert qui offre l'assistance technique, on peut *réduire les réaffectations* du personnel de l'assistance technique.
- Les systèmes experts peuvent aussi être utilisés pour *former* du personnel qui soulagera la tâche du personnel aîné. Le processus de réalisation d'un système expert permet effectivement de recueillir des règles sous une forme plus appropriée à l'enseignement que lorsqu'elles sont diffusées et non formalisées dans le cerveau de l'expert. Un système expert permet la transmission des connaissances de génération à génération, il peut être utilisé pour améliorer les compétences existantes, en vérifiant les propres jugements de l'utilisateur.

Ainsi, un système expert offre aux entreprises de production d'eau potable de nouvelles occasions pour produire des revenus supplémentaires et leur donne un avantage concurrentiel dans le marché.

Cependant, la mise en œuvre d'un système expert implique des dépenses considérables. C'est difficile d'évaluer "des coûts unitaires" sur les différents aspects de développement et d'entretien de système expert à cause des différents environnements de développement utilisés dans les différentes applications individuelles. Cependant, il y a des catégories générales de coûts qui vraisemblablement seront rencontrés, en incluant [Allen, 1986; Alquiart et Tignal, 2000] :

1. *l'adaptation initiale à la technologie ;*
2. *le développement nécessitant ;*
 - a. du matériel : des ordinateurs;
 - b. des logiciels : -des générateurs de systèmes experts ;
-des S.G.B.D;
-des utilitaires;
 - c. réseau ;
 - d. main-d'oeuvre existante, et ou supplémentaire ;
3. *intégration avec le système existant ;*
4. *Formation ;*
 - a. des développeurs ;
 - b. des utilisateurs ;

- c. des Directeurs d'entreprise ;
- d. du personnel System ;
- 5. *L'administration* ;
- 6. *L'entretien*.

Il est important d'utiliser des ressources internes pour le développement de système expert par opposition à l'usage des ressources externes, ceci permet des économies considérables [Abderaouf-Ahmed et al; Kelleher, 1987].

III.3- LES APPLICATIONS DES SYSTÈMES EXPERTS DANS LE DOMAINE DE L'EAU :

Les études et les expériences décrites dans la littérature des systèmes experts constituent une base pour le développement des systèmes experts dans l'industrie de l'eau. En effet pour qu'une application soit profitable elle doit prendre en considération :

III.3.1- l'Utilisateur projeté :

Pour toute application d'automatisation l'acceptation de l'utilisateur est une considération importante de réussite, et il en est de même pour les systèmes experts. Par conséquent, l'application de système expert envisagée devrait visée les utilisateurs projetés après avoir étudié leurs exigences avec soin.

Dans le cas d'une usine de traitement des eaux, le choix le plus naturel pour un utilisateur est l'opérateur ou l'exploitant de la station. Le rôle de l'opérateur dans le fonctionnement effectif de l'usine reste incontestable. Il est également largement reconnu que l'opérateur de la station est sous pression croissante pour s'adapter aux nouvelles technologies afin de satisfaire des niveaux de qualité de l'eau de plus en plus stricts.

Les systèmes experts peuvent être d'une grande aide aux opérateurs à condition que les applications soient bien visées. Ils devraient fournir des solutions à des problèmes qui intéressent vraiment les opérateurs. Les systèmes experts peuvent utiliser la connaissance disponible au sujet du fonctionnement de la station et la disséminer dans un format commode et productif pour l'opérateur [Ladiges et Kayser, 1994 ; Ladiges et Mennerick, 1996].

III.3.2- Sources de Connaissance

Il y a deux types de connaissances dans le domaine de traitement des eaux qui peuvent être utilisés pour construire un système expert. On distingue la connaissance rassemblée par expérience au fil des années par l'expert. Cette connaissance est généralement non documentée et non structurée. Elle peut être extraite par les différentes techniques d'acquisition des connaissances, et peut être traduite dans un système expert. Il y a peu de chemins alternatifs autre que les systèmes experts pour collecter cette connaissance.

En revanche, une vaste connaissance existe dans les livres, journaux, magazines, monde universitaire. Beaucoup de programmes informatiques sont aussi disponibles. Les systèmes experts offrent une alternative pour que cette connaissance qui est souvent inaccessible aux exploitants et autres personnels de l'usine puisse être placée à leur portée.

III.3.3- Les applications possibles dans les installations de traitement des eaux

La majorité du personnel des stations de traitement des eaux est passionnée par la résolution des problèmes qui leurs font face, mais peu d'entre eux s'intéressent vraiment aux questions théoriques. Par conséquent, les applications qui font bénéficier directement l'utilisateur devraient être entreprises, initialement. De nombreuses applications sont possibles dans toutes les facettes du fonctionnement des usines de traitement de l'eau. Elles peuvent être classées en différentes catégories comme suit :

1. **Le fonctionnement** : le fonctionnement quotidien d'une installation de traitement de l'eau paraît être un des secteurs les plus attractifs pour le développement de système expert. Ceci est dû au fait que :
 - a) le fonctionnement est une interaction complexe de plusieurs processus pour lequel une simulation mathématique complète est difficile;
 - b) le personnel utilise des données différentes (sons, odeurs, et informations visuelles) pour faire fonctionner efficacement la station;
 - c) les composants de traitement de la station se comportent souvent différemment de ce qui a été prévu lors de la conception;
 - d) l'usine de traitement change son comportement avec la vétusté et/ou la défectuosité de son matériel;

- e) la prise de décisions opérationnelles exige souvent une connaissance acquise sur beaucoup d'années d'expérience;
- f) les caractéristiques opérationnelles de l'usine de traitement de l'eau changent avec les saisons de l'année.

Toutes ces raisons, qui, rendent la connaissance heuristique cruciale pour un fonctionnement effectif d'une usine de traitement de l'eau, nous ont largement influencés dans l'orientation de notre travail

2. **Les réparations** : Le besoin de faire un diagnostic rapide des causes d'un dysfonctionnement et leurs réparations subséquentes est crucial pour assurer le bon fonctionnement d'une usine de traitement de l'eau. La panne d'un des composants du processus de traitement ou une conduite d'eau défectueuse peut interrompre la distribution d'eau à beaucoup de clients.

Parce que beaucoup de fonctionnements défectueux sont rémanents et leurs réparations ne dépendent pas seulement des manuels d'exploitation mais aussi de la connaissance de ce qui a été fait pour les cas similaires antérieures, les systèmes experts pourraient être utilisés efficacement. En effet, L'usine bénéficierait d'une diminution de temps d'interruption des appareils, d'une réduction des interventions des spécialistes de réparation, et d'une meilleure distribution de la connaissance de réparation aux personnels opérateurs.

3. **L'entretien** : Comme pour la réparation, l'entretien ou la maintenance des équipements dans un système de traitement des eaux est crucial. Les équipements doivent être inspectés, testés, et entretenus pour éviter des pannes qui pourraient interrompre le traitement ou la distribution de l'eau.

Du fait de l'absence de programmes préétablis pour ces activités, les systèmes experts, associés à des bases de données, pourraient fournir un moyen efficace pour l'entretien et la maintenance, et donnent une flexibilité avantageuse aux plans de maintenance.

4. **Organisation et Gestion** : L'organisation et la gestion dans une usine de traitement des eaux sont très prenantes. Automatiser ce processus avec un système expert associé à un système de gestion de base de données "SGBD" pourrait permettre une gestion efficace. Deux domaines pour lesquels les systèmes experts pourraient être profitables, l'organisation de la sécurité et la planification du personnel. Pour le plan de la sécurité, une base de connaissances pourrait inclure des procédures pour traiter les dangers des produits chimiques, les gaz toxiques et les vapeurs, les chocs électriques, et les incendies, des procédures de secours en cas d'accidents pourraient aussi être inclus. Pour la planification et la gestion du personnel, la base de connaissances pourrait inclure les profils professionnels pour l'aide au recrutement.

5. **La Formation** : Une des applications potentiellement importante des systèmes experts dans une usine de traitement des eaux est la formation. La formation progressive est particulièrement importante dans un environnement qui change régulièrement. Un système expert peut être utilisé pour collecter la connaissance pertinente et la présenter dans un format instructif pour la formation du personnel. Dans sa forme la plus utile, un tel système construirait des scénarios hypothétiques interactifs pour que le stagiaire fournisse une réponse. Le système expert fournirait une évaluation de la réponse et peut mettre en doute le stagiaire dans les parties perçues par le système.

6. **Le Design** : La conception d'une installation de traitement des eaux, et d'un système de distribution utilise des compétences multiples de disciplines séparées. Le Design est une science contrainte-orientée. Les systèmes experts ont la possibilité de faire ceci en aidant dans la sélection d'une source en effectuant une comparaison entre les sources disponibles et les besoins envisageables, l'emplacement de la station, l'interconnexion entre les procédés unitaires en définissant la filière de traitement la plus apte à satisfaire les normes de qualité tout en faisant une estimation du coût [Santoni et al., 1988].

III.3.4-Les principaux systèmes experts réalisés dans le domaine de l'eau :

Dans le domaine du traitement des eaux plusieurs prototypes ont été développés, nous citerons les plus célèbres d'entre eux :

- **Hydro-expert** ; réalisé par M. Detay et M. Poyet. Il a pour but de fournir une aide à la décision en matière d'implantation de forages en Afrique de l'ouest.

La démarche de l'hydrogéologue qui veut implanter un forage avec succès doit prendre en compte un grand nombre d'informations hydrologiques, géologiques, météorologiques et sociales. Cette démarche est typiquement celle d'un expert qui doit relier et corrélérer ces informations afin d'en tirer des conclusions sur les capacités du forage. De plus, les auteurs ont voulu faire d'hydro-expert un outil de formation.

L'hydro-expert a été développé en utilisant le langage turbo-prolog. Le développement de ce prototype a été réalisé par une équipe pluridisciplinaire, pendant une durée de trois années [Crés, 1989].

- **Pilote** [J.I.M.L, 1986] : Développé par CERGRENE (Centre d'Enseignement et de Recherche, Gestion des Ressources Naturelles et de l'Environnement). Il a pour but d'optimiser le fonctionnement d'un groupe de pompage dans la Marne (France) pour l'alimentation en eau potable.

Ce système, en utilisant le générateur de systèmes experts NEXPERT OBJECT, fournit une aide à l'opérateur chargé de la marche de l'usine. Ce système propose un planning de marche des équipements compte tenu du matériel en service et de la demande prévisionnelle (objectif quantité) pour les prochaines 24 heures.

- **Suivi de la qualité du traitement d'eau potable** [Cres, 1989] : Réalisé par la Compagnie Générale des Eaux (France), sur compatible AT, et en utilisant le générateur de système expert GURU. Ce système a pour but de suivre en temps réel la qualité du traitement de l'eau potable et déclencher une alerte en cas d'anomalie ; diagnostiquer alors la cause la plus probable de mauvais fonctionnement.

La raison invoquée par les auteurs est la facilité de développement et de mise à jour du logiciel. En fait, il est probable que le diagnostic de la cause de mauvais fonctionnement du traitement fournisse un bon support à la mise en œuvre de la technique des systèmes experts.

- **Ophélie** [Tassone, 1986; Giqueau, 1986] : développée conjointement par la Compagnie des Eaux et de l'Ozone (France) et sa filiale G. Line systèmes. Ophélie repose sur la capitalisation des connaissances, l'augmentation de la compétence moyenne et la formation. Il permet de concentrer en mémoire de la machine l'essentiel des connaissances de la société en matière de traitement des eaux. Ceci a entraîné un accroissement de la sécurité du fonctionnement de l'usine, une plus grande homogénéité du comportement, un gain de temps (possibilité d'agir sans attendre l'expert) et un allègement de la charge financière de formation des nouveaux opérateurs.

Les principales caractéristiques d'Ophélie sont les suivantes :

- La structure des données est enregistrée sous forme de frames (utilisation d'un mode de représentation "objet").
- L'incertitude pour les faits et sur les règles (vraisemblance) est prise en compte.
- La manipulation des calculs s'effectue aussi bien que celles des concepts.
- La notion d'objectif est introduite dans la recherche déductive en permettant un meilleur couplage entre l'utilisateur et le système.

- **CLARIF** [Godard, 1986] : le système "CLARIF" assiste l'utilisateur lors de la conception d'une usine de clarification de l'eau potable.

À partir des caractéristiques de l'eau brute, d'un cahier des charges, des contraintes commerciales, le système détermine les traitements à effectuer, les appareils à utiliser, les réactifs à ajouter. Il dimensionne l'installation et fournit une enveloppe budgétaire. Ce système a été développé en utilisant le générateur de système expert ART.

- **Système expert goût et odeur (G.E.O.S.E)** [Davagnier et al., 1988; Anselme et al., 1989] : est un outil d'aide à la décision pour tenter de résoudre des problèmes liés à l'apparition de goûts et odeurs indésirables dans les installations de production et de distribution d'eau potable.

Des modèles non déterministes (dits de régressions stochastiques) permettent d'estimer, d'une part les caractéristiques organoleptiques d'une eau à partir de son contenu chromatographique et d'autre part, le chromatogramme à partir du profil de dégustation. De tels modèles peuvent être utilisés pour réaliser des simulations afin d'identifier les composés chimiques liés aux

goûts et odeurs considérés. La fonction du système expert est d'une part de choisir le modèle adéquat à appliquer pour la modélisation, d'autre part de piloter les simulations et d'interpréter les résultats obtenus. Au terme de pilotage, le système fournit donc une liste de composés susceptibles d'être responsables des goûts et odeurs indésirables. Ces composés étant identifiés, le système a une fonction de diagnostic de solution de traitement pour les éliminer.

- **OCMWB et POTSDAM prototypes** [Collins, 1990; Nix et Collins, 1991] : Ces deux prototypes de systèmes experts développés par Nix et Collins en 1991 portent sur l'opération quotidienne de deux stations de traitement des eaux de l'état de New York (USA).

Les deux prototypes ont été développés en utilisant un générateur de système expert PC plus. Le prototype OCMWB a été organisé en 3 modules.

- Un module de diagnostic qui a pour but de suggérer une solution à un problème opérationnel particulier en donnant les symptômes.
- Un module STATUT qui a pour but de donner une mise à jour des caractéristiques de l'eau brute et traitée à l'opérateur.
- Un module Guide d'initiation ; qui agit comme un outil d'enseignement simple pour les nouveaux opérateurs.

Le prototype POTSDAM est plus sophistiqué, il prend en considération l'incertitude dans la décision. Le prototype est constitué de deux parties, une partie Diagnostic et une partie Conseil.

- **Le prototype de la station d'Anstey Hill** [Zhu et Simpson, 1992; Zhu et Simpson, 1996] : Ce prototype a été développé en 1996, par X. X. Zhu et A. R. Simpson, en utilisant un générateur de système expert "Crystal Expert System Builder". Il est basé sur une combinaison de chaînage avant, chaînage arrière et méta-règles, pour éviter le problème de redondances. Des arbres de décisions, et des arborescences de défaillances ont été utilisés pour permettre d'accélérer le développement du système expert.

Le système expert est capable d'accomplir deux principales fonctions :

- Conseiller en matière de fonctionnement de l'usine de traitement de l'eau et en particulier le dosage de l'aluminium.

-Diagnostiquer les pannes dans l'usine.

Le système est constitué de deux modules, le premier est le module de traitement de la turbidité, il aide l'exploitant à décider d'un changement dans la dose de l'aluminium en réponse à un changement de la qualité de l'eau brute ; le deuxième est un module de diagnostic de panne pour détecter la cause de panne de l'équipement dans l'usine.

En traitement des eaux usées, la majorité des applications de système expert se sont intéressées à l'opération ou au contrôle des procédés d'épuration par boues activées. Gall et Patry (1989) présentent une revue de plusieurs de ces systèmes. Ils indiquent comment, à partir des règles de contrôle de Beck et al. (1978), Jenkins et Jowitt (1987) puis Berthouex et al. (1987) ont développé leurs systèmes experts spécifiques. Une des particularités du système de Berthouex et al. est qu'il peut s'appliquer à différents procédés de traitement. Berthouex (1987), Maeda (1985) et Gaselbracht et al. (1986) présentent également des systèmes s'intéressant au diagnostic de boues activées. L'apport de Gall et Patry a été de développer une base de connaissance intégrant des observations pouvant être effectuées directement par les opérateurs de stations [Berthouex, 1987 ; Gallet et Patry, 1989].

Beck et al. (1990) ont aussi développé et amélioré un système à base de règles étudiant les dysfonctionnements des procédés à boues activées. Serodes et al. (1993) ont développé un prototype de système expert ayant comme objectif de faciliter et d'améliorer l'exploitation des stations de traitement des eaux par étangs aérés facultatifs [Gagnon et Serodes, 1993 ; Abderaouf Ahmed et al., 2002].

III.4- PROFONDEUR DE LA CONNAISSANCE :

Tel que mentionné plus haut, certains problèmes rencontrés dans les entreprises de l'eau sont non structurés et mal définis. Par conséquent, ces problèmes ne peuvent être facilement traduits dans un système expert performant. La profondeur des connaissances de chaque problème augmentera pendant les itérations à travers le processus de construction de prototypes et de validation.

Un premier prototype réalisé est une première itération du processus de développement d'un système expert opérationnel, plusieurs autres itérations permettront l'enrichissement progressif de la base de connaissance, et ainsi du système expert, d'où la spirale de développement représentée par la Figure III-1.

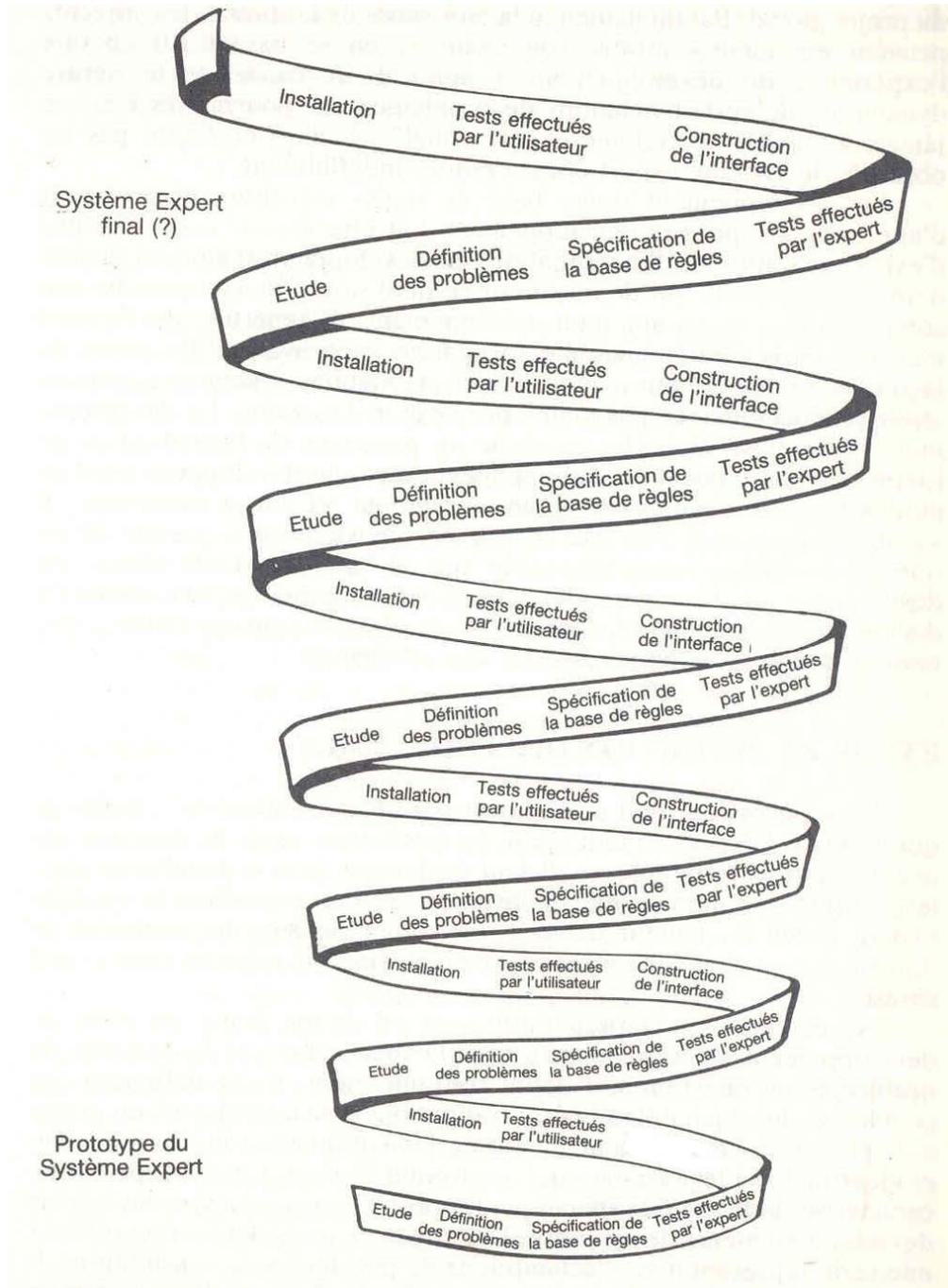


Figure III-1 : Spirale de développement [Holsapple, 1987].

III.5- LARGEUR DE LA CONNAISSANCE :

Probablement aucune base de connaissances seule ne sera capable de prendre en charge tous les aspects de fonctionnement d'une usine de traitement d'eaux potables. En contrepartie, plusieurs petites applications devraient être parfaites. Cette largeur dans la connaissance augmentera aussi la fréquence d'utilisation des systèmes experts dans le domaine de l'eau.

III.6- L'INTERFACE UTILISATEUR :

Une bonne interface utilisateur est critique pour le succès des applications de système expert. Celle-ci constitue un critère de performance des nouveaux générateurs de systèmes experts ce qui permet d'effectuer le travail plus facilement.

Une bonne interface utilisateur dépend aussi du nombre d'actions entreprises pour illustrer le problème dans l'explication des règles avec des "pourquoi" et des "comment".

En plus des caractéristiques avancées, tel que les graphiques, et les affichages menu, le soin devrait être pris pour que l'explication soit significative, exacte dans son contenu, et correspondant bien à la règle en question.

Une bonne interface utilisateur se doit d'être intuitive et interactive.

III.7- COMPATIBILITÉ AVEC LES AUTRES LOGICIELS :

Une tendance récente dans l'utilisation des systèmes experts est celle de réagir réciproquement avec les autres logiciels disponibles au niveau de l'usine, tels que les systèmes de gestion de base de données "SGBD" les feuilles de calcul, les tableurs et les graphiques. Donc, l'appel du système expert à partir des autres programmes, et l'appel de ces programmes à partir du système expert devient de plus en plus important. La philosophie est d'accepter la technologie des systèmes experts comme juste un autre outil logiciel et faire un usage judicieux de cet outil dans les tâches qui lui conviennent le mieux.

III.8- EFFET DE LA DIMENSION DE L'INSTALLATION DE TRAITEMENT :

Les applications effectuées dans les différentes stations de part le monde, ont permis de conclure qu'il y a un impact direct de la dimension de l'installation sur l'applicabilité des systèmes experts. En effet les petites stations peuvent avoir la plupart du temps besoin de connaissances expertes, mais ce serait difficile pour elles d'allouer des ressources et de la main-d'oeuvre pour collecter ces connaissances.

Aussi, beaucoup d'applications de systèmes experts peuvent devenir insignifiantes du fait de la réduction de la complexité des opérations dans une petite usine.

Or, une grande station peut et doit faire un effort en développant des applications convenables de systèmes experts. Les grandes installations présentent plusieurs facteurs favorables au développement des systèmes experts, en incluant un personnel mieux formé et plus spécialisé avec une plus grande utilisation des ordinateurs. Aussi, les techniques modernes de suivi des processus, de contrôle, et des systèmes d'acquisition de données peuvent conduire à des applications sophistiquées.

III.9- LES CONSIDÉRATIONS FUTURES :

En utilisant les informations précédentes, il devrait être possible de sélectionner des domaines productifs et appropriés pour le développement des systèmes experts dans une usine de traitement des eaux. À part les avantages les plus proéminents des systèmes experts il y a quatre aspects supplémentaires qui recommandent leur usage dans le futur. Ces traits renforcent la question de l'applicabilité des systèmes experts.

1. Modélisation : la capacité de modéliser le fonctionnement d'une installation de traitement des eaux, d'anticiper sur les problèmes qui peuvent surgir et de suivre le processus de fonctionnement semble être un but attirant. Peu a été fait, dans ce domaine, en effet, les modèles mathématiques actuels (algorithmiques) ne permettent pas une simulation complète du processus de fonctionnement. De plus, la nature numérique des modèles est souvent un moyen qui bloque leurs utilisations par les opérateurs. La bienveillance de l'utilisateur et la transparence d'un système expert bien structuré devraient éviter ce problème et, par conséquent, mener l'industrie de l'eau dans le champ de la simulation, du monitoring en temps réel et du diagnostic.

2. analyse des données: l'utilisation effective de la grande masse de données collectée au niveau des installations de traitement des eaux par un système expert au lieu de systèmes de gestion de bases de données (S.G.B.D.) est une bonne application à envisager.

3. automatisation : les installations de traitements des eaux tendent de plus en plus vers l'automatisation. Comme la plupart des processus sont vaguement suivis et contrôlés, une information en temps réel donnée par un système expert rend cette possibilité d'application très attractive.

4. fonctionnement et maintenance : les manuels d'exploitation et de maintenance pourraient être potentiellement documentés dans un système expert, avec les avantages ajoutés d'un environnement interactif.

III.10- CONCLUSION :

Pour que l'utilisation de système expert soit rentable, elle doit bien viser les futurs utilisateurs. Dans le domaine du traitement des eaux, plusieurs types d'applications peuvent être réalisées pour assister l'opérateur, on distingue : le fonctionnement, les réparations, l'entretien, l'organisation et la gestion, la formation, et le design.

La technologie des systèmes experts étant une technique d'entreprise, et du fait que la réalisation d'un système expert générique dans le domaine de traitement des eaux est actuellement impossible, plusieurs applications spécifiques ont été réalisées par différentes entreprises de par le monde. Ces systèmes renferment l'expertise interne de ces entreprises qui les exploitent à leurs profits.

De ce fait, nous avons tenté de développer, pour la première fois en Algérie, dans une entreprise de traitement de l'eau, un prototype de système expert d'aide au diagnostic des problèmes liés au fonctionnement de la station de BOUDOUAOU, en cas de dépassement de valeurs fixées par la norme pour les paramètres turbidité, chlore résiduel et couleur. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV. DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE DE SYSTÈME EXPERT, LE SIXTEAU :

IV.1- INTRODUCTION :

La station de traitement des eaux de BOUDOUAOU est une station qui doit assurer l'alimentation en eau potable pour un grand nombre de clients. Une tentative d'amélioration de son fonctionnement quotidien est réalisée dans ce travail en développant un prototype de système expert permettant d'aider au diagnostic des causes d'un dépassement de la norme de certains paramètres indicateurs de la qualité.

IV.2- DESCRIPTION DE LA STATION :

La station de traitement des eaux potables se situe à 3 Km environ au sud de la ville de BOUDOUAOU (Figure IV-2). Elle reçoit de l'eau brute provenant du barrage de Keddara (Figure IV-1) lequel est alimenté à partir des :

- Affluences propres des oueds BOUDOUAOU et Keddara : 3%
- Eaux de trop plein de la retenue d'El Hamiz : 22%
- Eaux pompées à partir de la retenue de Beni-Amrane : 75%.



Figure IV-1 : Photo d'une vue sur le barrage de Keddara.

Avec ces capacités de production maximale de 540 000 m³/j, elle constitue un ouvrage essentiel dans la chaîne de production à partir des eaux de surface [Aroua, 1993].

Les caractéristiques de l'eau brute à traiter sont les suivantes :

Analyse physico-chimique :

Couleur vraie :	5 hazen.
T° :	6,5 à 24 °C.
Turbidité :	1,4 à 10,5 NTU.
MES :	35 à 100 mg/l.
MO en milieu alcalin :	2,1 à 2,6 ppm.
pH :	7,7 à 8,4.
TH :	27 à 48°F.
Tca :	18 à 56 ppm.
Tmg :	22 à 58 ppm.
TAC :	40 à 114 ppm.
Sulfates :	50 à 180 ppm (mg/l de SO ₄).
Chlorures :	10 à 54 ppm (mg/l de Cl).
Fer :	0,02 à 0,05 ppm.
Manganèse :	0,02 à 0,24 ppm.
Nitrite :	0
Nitrate :	0,5 à 6 ppm.

Le but du fonctionnement de l'usine de traitement des eaux de BOUDOUAOU est de :

- satisfaire la demande journalière en eau potable de la communauté,
- satisfaire aux normes exigées de la qualité de l'eau traitée.

Par son processus de traitement approprié, elle élimine tous les éléments indésirables contenus dans l'eau brute. Cela se matérialise par l'injection de produits chimiques dans l'eau selon un protocole de différentes phases de traitement (Figure IV-3) :

- **L'aération** : elle sert à oxyder certains éléments, tels que les métaux, les matières organiques d'une part et conférer à l'eau un goût agréable d'autre part.

- **La préchloration** : elle sert à éliminer les matières organiques et l'ammoniaque contenues dans l'eau.

Le chlore est introduit sous forme d'eau chlorée à partir du chlore gazeux.

-**La coagulation–floculation** : elle sert à agglomérer les matières colloïdales contenues dans l'eau par la formation de floes.

- **La décantation** : elle sert à faire précipiter les floes au fond des décanteurs.

- **La filtration** : elle sert à éliminer les matières encore en suspension dans l'eau.

- **La désinfection** : elle sert à détruire les bactéries et germes contenus dans l'eau.

Le chlore est, pour cette installation, introduit sous forme d'eau chlorée.

- **La neutralisation** : elle sert à protéger les conduites contre l'agressivité et/ou l'entartrage.

La neutralisation peut s'effectuer par différents procédés, en particulier pour l'installation en question. On opère au dosage du lait de chaux pour obtenir le pH d'équilibre [Kettab, 1992].



Figure IV-2 : Photo d'une vue aérienne sur la station de traitement des eaux potables de Boudouaou.

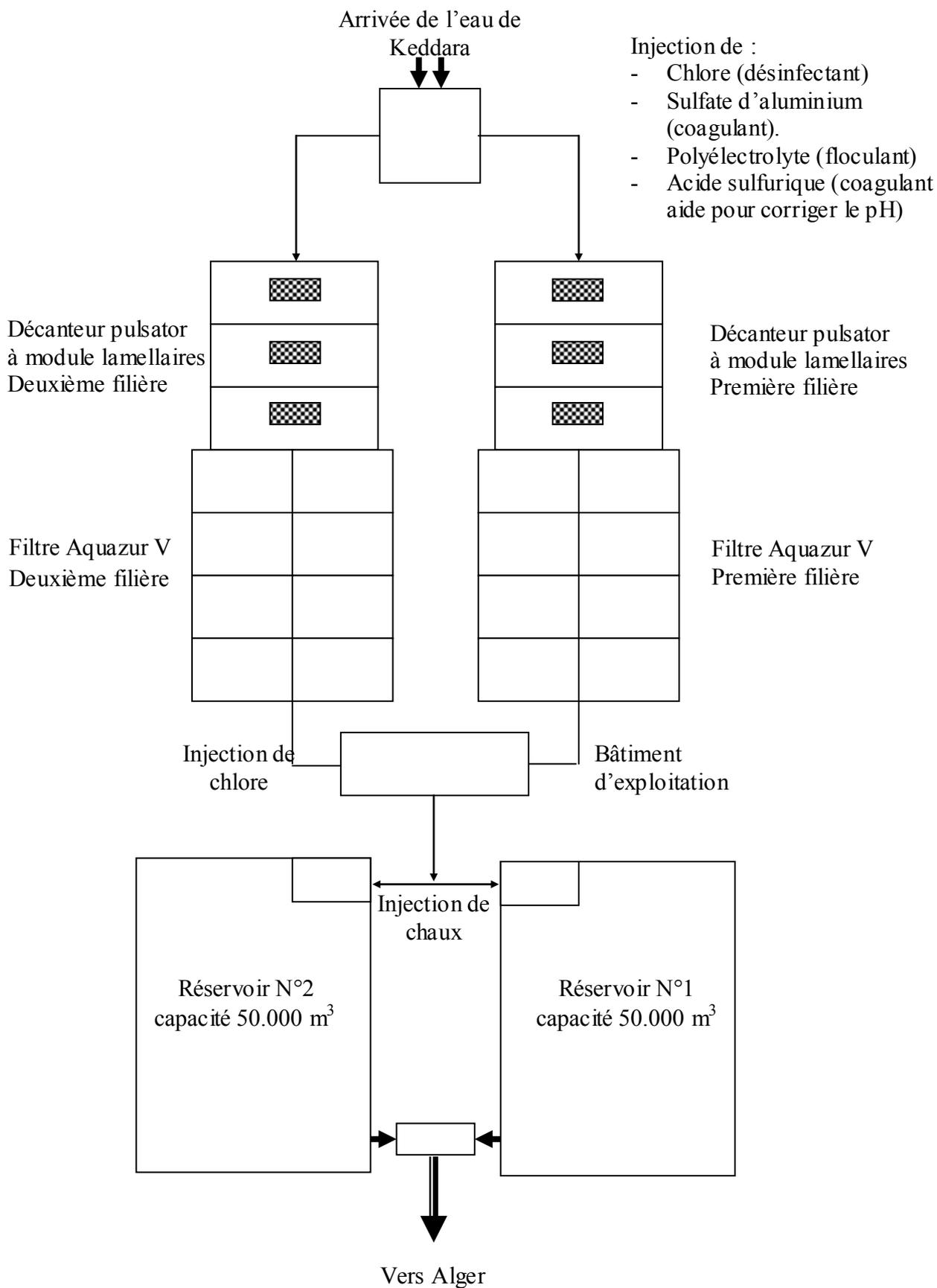


Figure IV-3 : Diagramme fonctionnel de la station de traitement BOUDOUAOU.

IV.2.1- Fonctionnement hydraulique de la station :

La station est alimentée en eau à partir de la retenue de Keddara. L'arrivée d'eau brute se fait par ouverture de 4 obturateurs à disques NEYTREC, dont le positionnement est contrôlé par un moteur. Ces obturateurs réalisent à la fois une bonne régulation car ils sont bien asservis à des régulateurs de débits "Moduvar" ainsi qu'une excellente aération de l'eau brute.

L'eau ainsi admise alimente une chambre de mélange où se fait successivement la préchloration, la coagulation par injection de sulfate d'alumine puis la correction du pH par injection d'acide sulfurique. L'eau se déverse ensuite dans la chambre de répartition entre les filières 1 et 2 (les eaux de lavage sont régulées dans la chambre de mélange, en amont des injections de produits chimiques).

Chaque départ de chaque filière vers chaque pulsator peut être isolé par une vanne murale. Les pulsators peuvent aussi être "By-passés" et isolés séparément pour que l'eau puisse être directement filtrée.

En fonctionnement le plus courant, l'eau est admise dans un pulsator par la base de celui-ci, elle est pulsée pour rentrer en contact avec le lit de boue et est clarifiée dans la partie décantation lamellaire de l'appareil avant de se diriger vers le canal d'eau filtrée commun à l'ensemble des filtres de chaque filière.

Les orifices situés dans la goulotte de reprise d'eau clarifiée sont tels qu'ils maintiennent un débit reparti également sur l'ensemble de la surface de décantation.

Les boues qui se déversent à chaque pulsation du lit de boues dans les concentrateurs sont extraites gravitairement par l'ouverture automatique de 4 vannes d'extraction par pulsators.

Le débit d'eau sur chaque filtre est régulé par l'asservissement de la vanne de sortie d'eau filtrée à un régulateur électronique qui maintient constant le niveau d'eau sur chaque filtre et assure donc l'équipartition. Le niveau d'eau au dessus du matériau filtrant est maintenu en permanence à 1,2 m quelque soit l'encrassement du filtre.

L'eau filtrée se déverse gravitairement dans les deux réservoirs d'eau traitée où elle est désinfectée et neutralisée. Chaque filtre peut être entièrement isolé si nécessaire.

IV.3- JUSTIFICATION TECHNIQUE DU RECOURS À L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET AUX SYSTÈMES EXPERTS :

Les problèmes associés au fonctionnement de l'usine de traitement des eaux de BOUDOUAOU peuvent être résumés comme suit :

- Généralement la connaissance est documentée dans un manuel d'exploitation (qui n'est souvent pas aisé à aborder et qui ne se tient pas facilement à jour), dans des tableaux graphiques et des feuilles de route; cependant le fonctionnement quotidien de l'usine est souvent non documenté. Par exemple, il y a peu ou pas de documentation au sujet du dosage de l'aluminium nécessaire pour les paramètres courants de l'eau tels que la turbidité de l'eau brute, turbidité de l'eau traitée, couleur de l'eau brute et le débit de l'eau courante.
- Le fonctionnement de l'usine de traitement de l'eau nécessite des connaissances dans divers domaines : chimie, mécanique, électrique.... L'ajustement du dosage chimique par exemple est généralement le résultat de discussions entre le chimiste, le chef mécanique et le chef de service exploitation de l'usine. La connaissance nécessaire n'existe donc pas chez un expert, mais souvent chez un groupe d'experts qui possèdent des compétences dans leurs disciplines particulières.
- Les connaissances et les données manipulées sont :

-Des informations plus qualitatives que quantitatives.

Exemple : turbidité élevée, moyenne ou basse.

-Des informations incomplètes : les données disponibles lors de la résolution d'un problème ne sont pas toujours les mêmes. L'ensemble des éléments utilisés pour la résolution est donc fragmentaire et l'on ne sait pas à l'avance de quelles connaissances on pourra disposer, ni éventuellement dans quel ordre.

-Des informations imprécises : les descriptions qualitatives mentionnées peuvent paraître déjà relativement imprécises; mais dans certains cas, on devra considérer des réponses à cheval sur plusieurs possibilités.

-Des connaissances heuristiques: à côté des connaissances solides, décrivant les lois connues, d'autres éléments du raisonnement s'appuient sur des règles expérimentales, non nécessairement validées avec certitude, mais construites sur une longue pratique.

Exemple: RULE: RCT1

IF :(vturet>vnturet)

THEN :diagtur= {(fontur="mauvais") or (tcpHefd="mauvais") or (vturef>vnturef)}.

REASON : si la turbidité de l'eau traitée est élevée alors c'est soit le turbidimètre qui ne fonctionne pas bien,

ou,

- le traitement de correction du pH de l'eau filtrée désinfectée est mauvais

ou,

- la turbidité de l'eau filtrée est élevée.

- L'expert exploitant n'a souvent pas généralisé son processus de prise de décision et sa procédure de résolution du problème en une structure systématique. De ce fait, les experts ont beaucoup de difficultés à décrire les étapes du processus de raisonnement permettant la prise de décision.

Ces aspects du problème faisant face au fonctionnement quotidien de l'usine de traitement des eaux, ne peuvent pas être résolus en utilisant la programmation conventionnelle, mais l'informatique symbolique et la technique des systèmes experts s'y prête bien.

IV.4- DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE DE SYSTÈME EXPERT D'AIDE AU FONCTIONNEMENT DE LA STATION DE BOUDOUAOU : SEXTEAU

Un prototype de système expert est une version relativement simple du système expert définitif. Il n'est pas projeté pour un usage général mais pour l'expérimentation. Nous avons adopté ce principe au début de notre travail pour ne pas être tenté d'aboutir à un système final bancal dans ces résultats et peu performant dans son fonctionnement.

Le prototype réalisé doit :

- Permettre d'effectuer le choix d'une technique.
- Constituer une ultime validation de l'approche système expert.

La réalisation de ce prototype est donc destinée à vérifier qu'on peut effectivement traiter le problème de dysfonctionnement au niveau des usines de traitement d'eaux potables et ceci avec la technique des systèmes experts. En conséquence :

- L'attention sera polarisée vers l'utilisation de cette technique.
- Les engagements seront limités au minimum strictement nécessaire.

Trois caractéristiques en découlent :

1- Le prototype réalisé ne traite qu'une partie du problème : cette limitation est souhaitable, compte tenu du caractère probatoire du travail entrepris, pour en limiter l'envergure.

2- Le sous problème choisi doit répondre au besoin de sélection des techniques, et constituer une validation probante. Il devra :

- Etre de taille suffisante pour faire apparaître d'éventuels problèmes de performances;
- Présenter une complexité représentative de l'ensemble de la question à traiter;

3- Si possible, mettre en jeu les différents types de raisonnement et de connaissances considérées.

Compte tenu de ces caractéristiques, nous avons décidé de diagnostiquer la station de Boudouaou dans le cas où la turbidité de l'eau traitée est différente de celle fixée. Par la suite nous avons pensé à élargir notre champs d'application en diagnostiquant les problèmes liés au dépassement de la norme pour les paramètres : chlore résiduel, et couleur dans l'eau traitée.

- Le prototype a été réalisé en faisant abstraction de l'effet biologique dans le diagnostic des causes de dépassement de la norme des paramètres considérés, et ceci quelque soit l'étape de la filière.
- Le prototype a été réalisé en faisant abstraction des contraintes opérationnelles : Nous n'avons pas cherché à résoudre les problèmes d'optimisation de performances et de minimisation des besoins en ressources.
- Le prototype n'a pas fait appel à des investissements :

Concrètement ce point se traduit :

- Sur le plan matériel, par l'utilisation des machines déjà disponibles;

- Sur le plan logiciel, par le recours systématique aux outils disponibles sur le marché. Là

encore, la raison en est claire : le problème c'est l'extraction et la formalisation de la connaissance. Tout l'effort doit tendre vers ce but. La réalisation d'un moteur d'inférences ou de système vide déboucherait inévitablement sur un produit très inférieur à ceux qui sont disponibles sur le marché (surtout que notre formation de base est en génie de l'environnement et pas en informatique).

IV.5-CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA FAISABILITÉ DE L'APPLICATION :

Avant d'entamer le processus de développement du prototype de système expert SEXTEAU, nous avons commencé par évaluer la faisabilité de cette application, selon les critères arrêtés précédemment.

1- Critères concernant l'expert :

- **Est-ce que l'application exige un expert ?**

Le développement du prototype de système expert d'aide au diagnostic des problèmes liés au fonctionnement quotidien de l'usine de traitement des eaux potables de Boudouaou, exige la collaboration d'un ou plusieurs experts, puisqu'ils constituent notre principale source de connaissance, et les premiers validateurs de notre application.

- **Est-ce qu'un expert coopératif est disponible ?**

Dans le cadre de cette application, le Directeur de la station de Boudouaou (M. Boudjenoune) et le chef de service exploitation (M. Dellala) que nous avons sollicité, ont été très motivé par ce travail, et de ce fait ont fourni un effort considérable pour nous permettre de collecter l'expertise nécessaire à la résolution de ce problème.

2- Critères sur la complexité du problème :

- **Le domaine technique est il homogène et bien délimité ?**

Le domaine du diagnostic des problèmes liés au dysfonctionnement de la station de traitement des eaux de BOUDOUAOU est un problème complexe. En effet, on ne s'intéresse dans le cadre de cette application qu'aux problèmes liés aux dépassements de normes des paramètres les plus représentatifs de la qualité de l'eau traitée à savoir la turbidité, le chlore résiduel et la couleur.

- **Le problème est il décomposable en sous problèmes distincts ?**

Pour le diagnostic des problèmes liés au fonctionnement de la station de BOUDOUAOU, nous n'avons pris en considération que les problèmes liés aux dépassement de normes des principaux paramètres indiquant la qualité de l'eau à la sortie de la station. Ces paramètres ont été représentés séparément dans le système par des sous bases, chacune d'entre elles traite le cas d'un seul paramètre. D'autres paramètres n'ont pas été représentés et laissent

le champ d'application ouvert en prenant en considération les remarques et les corrections apportées à ces sous bases lors des prochaines itérations, vérifications et validations.

- **Est- ce que le développement du système expert permet l'utilisation des données dans un chemin productif pas possible auparavant ?**

En effet, nous avons tenté de collecter la connaissance experte permettant la résolution des problèmes liés au fonctionnement de la station de Boudouaou et essentiellement du problème de turbidité, pour permettre aux opérateurs peu ou pas expérimenté d'agir correctement et rapidement lors de l'absence de l'expert en utilisant sa connaissance d'où la diminution du risque d'erreur. C'est un chemin productif pas possible auparavant.

3- Critères concernant l'utilisateur :

- **Est-ce que l'utilisateur projeté est un expert ou un non expert ?**

Comme nous l'avons expliqué précédemment, dans le cas d'une usine de traitement des eaux, le choix le plus naturel pour un utilisateur est l'opérateur ou l'exploitant de la station. De ce fait, nous avons choisi de destiner ce prototype à l'opérateur peu ou pas expérimenté de la station.

- **Est-ce que l'application proposée sera adoptée par ceux à qui elle est destinée ?**

Certains se sentent menacés par le système expert; d'autres n'ont pas confiance, d'autres sont impressionnés par ce nouvel outil qui pourra les assister lors de leurs interventions quotidiennes.

Toute fois, pour un premier prototype qui a seulement pour objectif d'évaluer la faisabilité des systèmes experts dans le domaine de traitement des eaux nous n'avons pas pris ce critère en considération. Toujours est-il, et avant toute tentative de développement d'un système définitif, un travail de formation et de sensibilisation doit être fait à tous les niveaux, pour permettre l'adoption du projet en toute confiance.

4- Critères sur les objectifs visés :

- **Quels sont les avantages potentiels de l'application ?** La réalisation de ce prototype est destinée à confirmer qu'on peut effectivement traiter le problème en développant un prototype de système expert d'aide au diagnostic des problèmes liés au dysfonctionnement de la station en cas de dépassement de norme de potabilité de certains paramètres. Les principaux objectifs de cette application consistent en :
 - a) Une sauvegarde du savoir faire de l'expert et son enrichissement continu ;
 - b) Une prise de décision plus rapide et plus pertinente.

De ce fait, la réalisation d'un système expert opérationnel, si elle a lieu, aura pour avantages de mieux gérer la station et d'améliorer la compétence du personnel opérateur. Ceci à pour conséquence directe l'amélioration de la qualité de l'eau, en uniformisant les interventions (l'intervention se fait selon l'expertise de ou des experts représentés dans la base de connaissance). Aussi, il y aura moins de coupures dues au mauvais fonctionnement de la station, d'où un gain de temps et en conséquence un gain en productivité.

L'application développée semble pertinente au vu des critères arrêtés ci-dessus (cf. Tableau IV-1).

Critères	Évaluation
<p>1. Critères concernant l'expert :</p> <p>-Est-ce que l'application exige un expert ?</p> <p>-Est-ce qu'un expert coopératif est disponible ?</p> <p>2. Critères sur la complexité du problème :</p> <p>-Le domaine est-il homogène et bien délimité ?</p> <p>-Le problème est-il décomposable en sous problèmes distincts ?</p> <p>-Est-ce que le développement du système permet l'utilisation des données dans un chemin productif pas possible au par avant ?</p> <p>3. Critères concernant l'utilisateur :</p> <p>-Est-ce que l'utilisateur projeté est un expert ou un non expert ?</p> <p>-Est-ce que l'application proposée sera adoptée par ceux qu'il est projeté d'aider ?</p> <p>4. Critères sur les objectifs visés ?</p> <p>-Quels sont les avantages potentiels de l'application ?</p>	<p>Oui</p> <p>Oui</p> <p>Oui</p> <p>Oui</p> <p>Oui</p> <p>Un non expert</p> <p>Oui</p> <p>-Sauvegarde du savoir-faire des experts et son enrichissement continu ;</p> <p>-Amélioration de la compétence des opérateurs ;</p> <p>-Décision plus rapide et plus pertinente.</p>

Tableau IV-1 : Évaluation de l'application en cours de développement.

IV.6- PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE SEXTEAU :

Pour développer notre prototype de système expert SEXTEAU, nous avons suivi les étapes suivantes :

La première étape est *l'acquisition de la connaissance* qui a été décrite par Nix et Collins comme étant la plus prenante et la plus décisive [Nix et Collins, 1991].

L'acquisition des connaissances implique l'identification, l'analyse et l'interprétation de la connaissance que les experts humains utilisent quand ils ont à résoudre un problème particulier [Gagnon et Serodes, 1993].

La deuxième étape consiste en *une formalisation de la connaissance* acquise dans une forme convenable pour le logiciel choisi et de son implémentation sur ordinateur.

La troisième et la quatrième étapes sont respectivement *la vérification* et *la validation* du système. Pendant l'étape de vérification, l'expert doit vérifier si la connaissance transférée a été formulée, implémentée et exécutée correctement, autrement les erreurs ont besoin d'être identifiées et corrigées. À l'étape de validation, en posant les mêmes problèmes au système et à l'expert ou aux experts, les résultats sont comparés. De cette manière, le système est testé et complètement validé.

IV.6.1- Acquisition de la connaissance :

Le succès d'un système expert dépend grandement de l'ampleur et de la pertinence de la connaissance extraite [Gall et Patry, 1989; Nix et al., 1989; Nix et Collins, 1991; Welbank, 1985]. Pour cela tout les moyens sont bons : dessins, graphiques, écriture, magnétophone, etc....Ce qui est important de noter, ce sont ses retours arrières et ses hésitations, car derrière eux peut se cacher une représentation évolutive du problème que l'on doit prendre en considération [Anguel et Sellami, 2003 ; Seys et al., 1989]. La Figure IV-4 schématise le processus d'extraction des connaissances afin de préparer l'étape de représentation des connaissances. Plusieurs techniques pour le recueil des connaissances héritées principalement du travail en acquisition des connaissances (AC) existent. Nous avons utilisés essentiellement trois de ces techniques : les entretiens semi-structurés, l'observation et l'analyse des documents [Gross, 1988; Grundstein, 1995; Martin, 1994].

En premier lieu, l'analyse des documents nous a permis d'avoir une vision formelle de l'activité de diagnostic étudiée. Il s'agit principalement des explications textuelles des composants des schémas descriptifs de la station, des schémas pour la localisation des pannes ainsi que des propriétés de fonctionnement du matériel. La lecture et l'exploitation des

documents n'étaient pas bénéfiques sans les experts du domaine qui détiennent une masse plus importante des connaissances. Il s'agit, comme nous l'avons cité précédemment, du Directeur de la station de Boudouaou représenté par la personne de M. Boudjenoune qui a occupé plusieurs postes au sein de cette station et qui détient ainsi une bonne connaissance des problèmes opérationnels de la station, de leurs causes et de leurs solutions. Nous avons également sollicité le chef de service d'exploitation représenté par la personne de M. Dellala qui possède une grande connaissance et qui a été très disponible pour nous. Nous avons également recueilli une connaissance d'origine livresque dans les livres de traitements des eaux [aghtm, 1987], les articles sur les différents systèmes réalisés ainsi que le manuel d'exploitation de la station, les feuilles de routes, les rapports annuels, et les historiques des accidents.

Plusieurs interviews ont été réalisées avec le Directeur de la station, le chef de service exploitation et bien d'autres personnels experts de la station de Boudouaou de manière semi structurée. Lors des premières rencontres, il a été établi que le système s'adresserait aux opérateurs peu ou pas expérimentés. C'était important pour nous de déterminer clairement dès le départ quels sont les usagers cibles, car la connaissance entrée de même que la manière d'aborder le problème doivent directement tenir compte de l'utilisateur. Ensuite les entrevues ont été conduites en se concentrant sur quelques facettes du fonctionnement de l'usine dans une session donnée, et en guidant la discussion vers l'élaboration du processus de prise de décision.

La majorité du temps a été consacrée au problème de la turbidité de l'eau, du fait que les experts opérateurs considèrent que c'est le paramètre le plus représentatif qui affecte toutes les étapes du traitement.

L'observation des experts opérateurs pendant leur activité nous a permis d'identifier les concepts de base manipulés dans le domaine, de déterminer quelques règles de travail et de se rendre compte de l'activité en temps réel.

Une connaissance résultant des travaux de recherches a également été recueillie pour compléter la base de connaissance.

Basée sur la connaissance collectée, un travail d'analyse a été effectué, permettant de définir les causes et effets d'un mauvais fonctionnement, et ainsi une structuration de la connaissance a été obtenue.

Pour représenter cette connaissance, des arbres de décisions ont été établis pour représenter le but, ses valeurs possibles, et les relations entre les règles. Ils nous ont permis de visualiser les relations entre les variables. Les nœuds de l'arbre contiennent les variables pertinentes, ils sont connectés entre eux par des flèches montrant les dépendances existantes entre les variables.

Les arbres de décision ont été présentés à l'ensemble du personnel de l'usine pour les commenter en vue d'extraire une connaissance supplémentaire dans les entrevues tardives. La méthodologie de l'arbre de décision présentée dans ce travail est semblable à la méthode d'égalité heuristique [Zhu et Simpson, 1992; Zhu et Simpson, 1996], qui est une approche hiérarchique avec décomposition.

Des règles dans un langage naturel formulé en terme de règles de production SI - ALORS ont été déterminées à partir des arbres de décision. Ces règles ont été alors montrées au personnel de l'usine pour permettre de les affiner, et pour s'assurer d'une représentation exacte de la connaissance du domaine.

Cette analyse nous a permis de constater l'existence de deux catégories de connaissances qu'on vise à formaliser :

1- les connaissances du domaine : ce sont les connaissances de base dénuées de toute interprétation particulière;

Exemple : RULE : RCT0

IF :(quale="mauvaise")

THEN :diagtur= {vturet>vnturet}.

REASON : si l'eau traitée est de mauvaise qualité, alors :

- La valeur de la turbidité de l'eau traitée est supérieure à la valeur normative.

2- les connaissances de contrôle : cette catégorie recouvre toutes les connaissances permettant d'effectuer des raisonnements dans le domaine. Elles décrivent les tâches et les inférences relatives au processus de diagnostic étudié. L'analyse de ces connaissances nous a permis de voir qu'il existe deux types de connaissances combinées :

a- Les connaissances pragmatiques : ces connaissances décrivent des réflexes issus de l'expérience, il s'agit de connaissances procédurales représentées sous la forme type "situation ---action".

C'est le cas des règles de recommandations.

Exemple : RULE : RCT2

IF : (vturet>vnturet) & (fontur="mauvais")

THEN : diagtur= {"mauvais fonctionnement du turbidimètre"}.

recom= {"réparer le turbidimètre"}.

REASON : si le turbidimètre ne fonctionne pas bien alors :

- C'est lui la cause du problème, et on recommande de le réparer.

b- Les connaissances causales : elles décrivent des relations de cause à effet plus ou moins complexes entre phénomènes du domaine.

Exemple: RULE: RCT17

IF : (filtr="mauvaise") & (vtured>vntured)

THEN : diagtur= {dec="mauvaise"}.

REASON : si la turbidité de l'eau décantée est élevée, alors :

- La décantation est mauvaise.

RULE : RCT18

IF :(dec="mauvaise")

THEN : diagtur= {(fondec="mauvais") or (coaflo="mauvaise")}.

REASON : si la décantation est mauvaise, alors :

- C'est soit les décanteurs qui ne fonctionnent pas bien,

ou,

- Le processus de coagulation - floculation c'est mal déroulé.

RULE : RCT19

IF :(dec="mauvaise") & (fondec="mauvais")

THEN: diagtur={{(Q>Q0)or(flib=false) or (regpuls="mauvais") or (rlib=true)or(rllib=true)}}.

REASON : si les décanteurs ne fonctionnent pas bien, alors :

- c'est soit dû au débit d'eau à traiter qui est supérieure au débit prévu,

ou,

- au lit de boues qui s'est mal formé ou qui ne s'est pas formé du tout,

ou,

- alors à un mauvais réglage des pulsators,

ou,

- à une remontée du lit de boues en nuage,

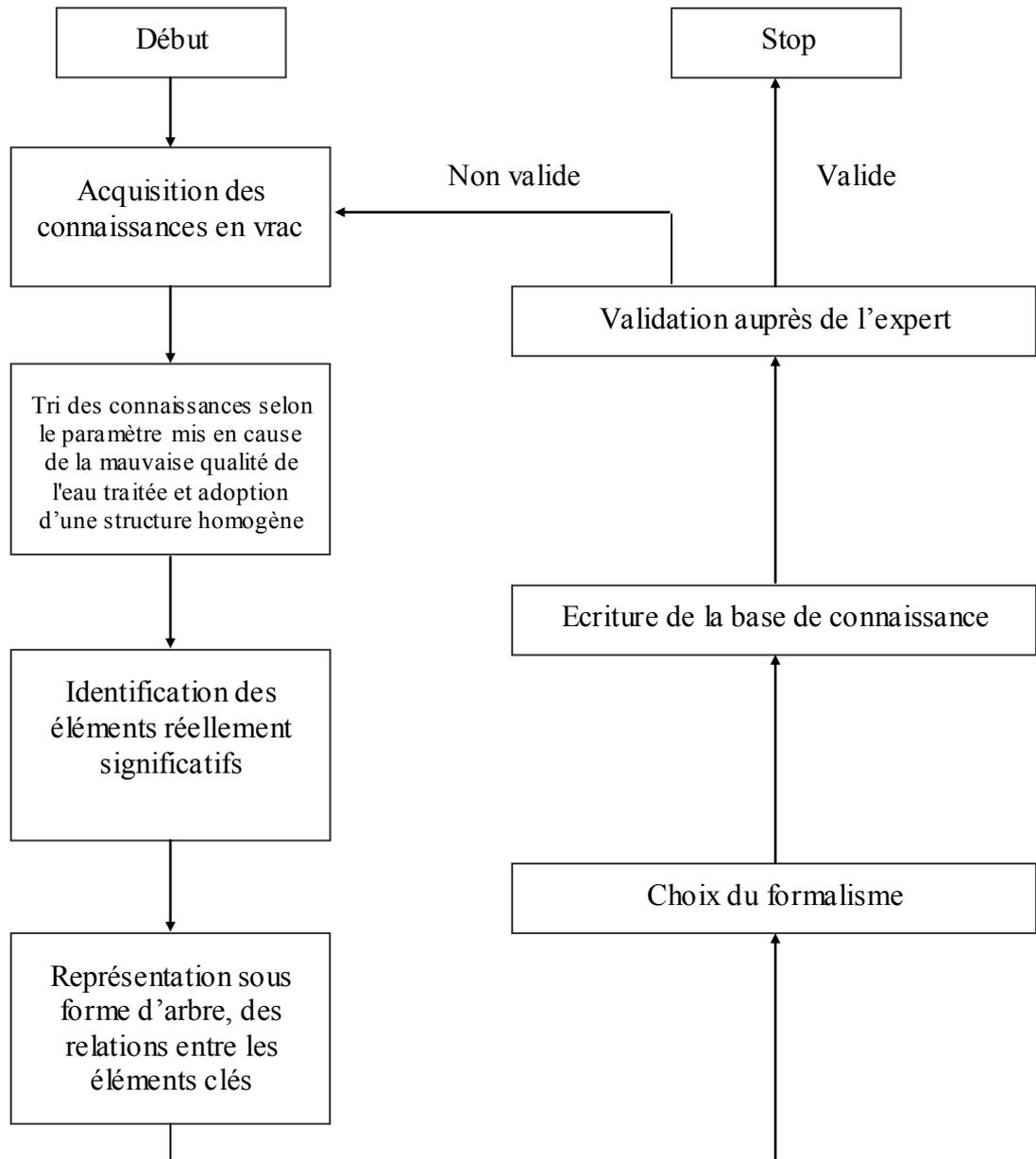
ou,

- à une remontée de tout le lit de boues.

Les formalismes nécessaires à la représentation, sur ordinateur de ces connaissances sont :

- La programmation procédurale.
- Les règles de production.
- La représentation de l'incertain à l'aide de facteurs de certitude.

Plusieurs logiciels peuvent être sollicités pour transcrire ces trois types de formalisme. Par conséquent, le choix d'un outil de programmation propice s'impose. Cet outil doit avant tout permettre l'implémentation entière et la traduction fidèle de l'expertise recueillie. Il doit au moins permettre la représentation des trois formalismes.



FigureIV-4 : Le processus d'extraction de connaissances.

IV.6.2- Choix de l'outil de développement :

1) Introduction :

Dans leurs premières applications, le développement des systèmes experts nécessitait des machines dédiées à l'intelligence artificielle employant des langages spécialisés tels que LISP,.... Ces langages permettaient la réalisation du moteur du système expert par des informaticiens chevronnés.

L'acharnement a permis de développer des techniques qui reproduisent le raisonnement humain, ce qui a abouti à la création de nombreux prototypes de système expert utilisant des moteurs universels.

Ces moteurs, par leur universalité, peuvent être utilisés dans différents domaines comportant un même type de connaissances. D'où l'émergence de la notion de système expert à vide ou noyaux.

En conséquence, au lieu d'écrire complètement un nouveau moteur d'inférences avec tout son environnement d'exploitation pour chaque domaine d'application, il est recommandé d'utiliser ces outils universels qui, d'une part déchargent le concepteur de l'écriture de certains modules du système, et d'autre part facilitent grandement sa mise en service [Bonnet, 1984; Benabdelouaheb, 1991].

Actuellement, les recherches se concentrent de plus en plus sur les aspects cognitifs des systèmes experts. En effet, l'extraction, la mise en forme, la cohérence, la validation et la complétude d'une base de connaissance constituent la part prépondérante du développement d'un système expert [Lep, 1990].

2) Choix de l'outil de développement :

Un générateur de système expert (GSE) est une coquille vide qu'il faut remplir, il rassemble, en plus du moteur d'inférences, des utilitaires de développement et d'exploitation indispensables. C'est un ensemble de logiciels (éditeur, S.G.B.D, traceur, ...etc.) prêts à recevoir des connaissances afin de devenir un système expert.

Les générateurs du système expert ont été les premiers produits appliqués au développement d'application en traitement de l'eau, car ils permettent au concepteur néophyte en matière d'intelligence artificielle de créer sa propre base de connaissance sans avoir à se fondre dans

une programmation technique généralement difficile et nécessitant l'intervention d'informaticiens.

C'est pourquoi nous avons décidé d'utiliser un générateur de système expert commercialisé pour pouvoir consacrer la plupart du temps aux problèmes de design de la base de connaissances ainsi qu'à l'acquisition de celles-ci (c'est-à-dire formalisation des expertises).

La diversité des connaissances et des modes de raisonnement dans le domaine de l'eau fait que l'outil choisi doit répondre aux caractéristiques suivantes :

- Permettre la représentation des différents types de connaissances.
- Avoir des interfaces entre concepteurs et utilisateurs du système expert de bonne qualité.
- Offrir une portabilité du système.

Le travail de recherche que nous avons effectué sur l'ensemble des progiciels disponibles sur le marché des générateurs de systèmes experts, (Tableau IV-2) nous a permis de constater que plusieurs d'entre eux se prêtent bien à notre application. Cependant, GURU est le seul que nous ayons pu nous procurer.

GURU offre un cadre de développement de système expert favorable aux applications de diagnostic dans le domaine de traitement de l'eau, par la puissance de son moteur d'inférences, et par la qualité de son environnement de développement [Benabdelouaheb, 1992; Holsapple, 1988; Lep1990; Tali-maamar, 1992].

En plus de son moteur d'inférences et de son éditeur de base de connaissances, il propose un ensemble de logiciels intégrés composé d'un gestionnaire de fichier, d'un tableur, d'un traitement de texte, d'un logiciel graphique et d'un logiciel de traitement de langage naturel.

GURU possède un environnement de développement complètement autonome grâce auquel un système expert peut être construit sans avoir besoin de recourir à un langage ou progiciel complémentaire.

Comme un expert humain, GURU a l'aptitude d'expliquer son raisonnement à la demande de l'utilisateur. Des interruptions peuvent être effectuées par le moteur :

- Pendant une consultation, pour savoir pourquoi une question a été posée.
- À la fin d'une consultation pour montrer comment le moteur est parvenu au but.

	REPRÉSENTATION DE LA CONNAISSANCE					MOTEUR D'INFÉRENCE				INTERFACES				
	Faits		Relations			Chainage		méta-règles	contrôle de stratégie	traces et preuves	fenêtres	ouverture procédure externe		explication
	Paire	Triplet	Règles variables		coef.	AV.	AR.					pré-misse	conclusion	
	A - V	O-A-V	sans	avec										
MAC EXPERT	+		+		+	+	+	▼		+				
EXPERT-KIT	+			-		-		-		+	+	○	○	○
INTELLIGENCE SERVICE	+		+			-	+			+	+	+		
MP LRO		+		*	○	▲		▼		+	○	○	○	
PERSONAL CONSULTANT PLUS		□		+	+		+		+	+	+	+		+
GURU	Contenues dans des bases de données relationnelles		+		+	-	+	+	+	+	+	◇		+
GOLEM	+		+			-	+			+		+	+	
MI	+			+	+		+			+	+	+		+
SNARK		+		+	+	▲		+	+	+	○		+	+
S1		□		+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
		□ Avec frames		* Variables locales		▲ Avec gestion d'hypothèses : backtrack		▼ Classement par coef. d'importance				◇ par procédures intégrées		

+ : la disposition indiquée existe d'emblée sur le moteur d'inférence
 ○ : la disposition indiquée peut être ajoutée.

Tableau IV-2 : Comparaison des différents générateurs de systèmes experts.

La structure de GURU est celle de tout progiciel de développement de systèmes expert. Il est constitué de deux modules : un gestionnaire de la base de connaissance et un moteur d'inférences comme présenté en Figure IV-5.

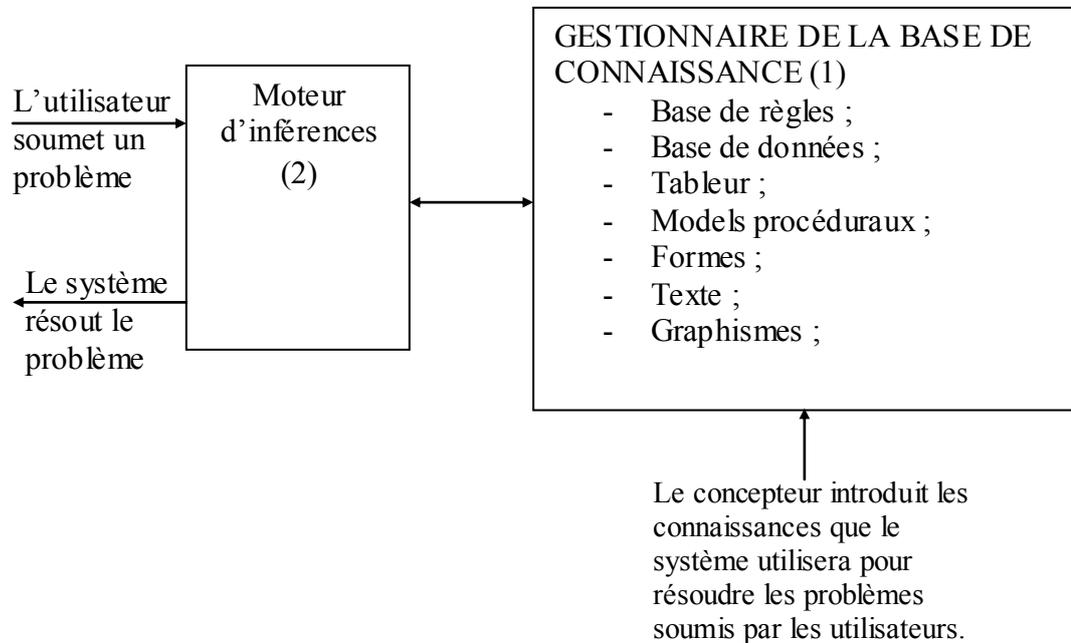


Figure IV-5 : Structure du générateur GURU [Holsapple, 1988].

▪ **Le gestionnaire de base de connaissances :**

C'est un logiciel pour construire, entretenir et compiler la base de connaissances. La construction d'une base consiste à énoncer les règles de production et les métarègles; celles-ci représentent les connaissances.

Par ailleurs, différents types de représentations de connaissances sont possibles. En effet, les connaissances procédurales peuvent être écrites dans n'importe quel langage de programmation, lesquelles sont exécutées à partir de GURU par simple appel. La représentation sous forme de réseaux sémantiques est modélisée par le gestionnaire de base de données relationnelle intégré à GURU. D'autre part, la représentation en formes (frame) est simulée par des tableurs.

- **Le moteur d'inférences :** Le moteur de GURU est écrit en C, il peut être invoqué à tout moment, en chaînage avant ou en chaînage arrière, de manière interactive. Le moteur peut être invoqué pour tester une base de règles, une règle ou une variable.

GURU dispose de plusieurs stratégies de sélection des règles et méthodes de calcul des facteurs de certitude (noté CF). Afin que le concepteur puisse donner un sens aux situations qui lui paraissent floues, GURU nous donne la possibilité de travailler avec des ensembles flous.

GURU utilise un système d'exploitation MS-DOS.

Mais quelque soit la qualité du moteur d'inférences et des supports techniques employés, l'opérationnalité d'un système expert dépend surtout de la qualité des connaissances et la justesse des appréciations que le système va apporter.

C'est donc aux contenus respectifs de la base de connaissances et de la base des faits qu'il importe de porter attention, en détaillant successivement l'univers des connaissances, la démarche diagnostic et la validation du système conçu.

IV.6.3- La représentation des connaissances du système SEXTEAU à l'aide de GURU :

La connaissance du SEXTEAU est exprimée sous forme de règles de production propres à GURU :

Une règle de production de GURU est de la forme :

RULE :<nom de la règle>

COMMENT :<commentaire> (il est en option)

READY :<instructions>

(Elle spécifie les actions à exécuter avant l'évaluation de sa condition)

IF :<prémisse>

NEEDS :<Vars>

(Cette clause, reliée à la prémisse, est en option. Vars est une collection d'une ou de plusieurs variables qui sont nécessaires à l'évaluation de la prémisse).

TEST :<code>

(Cette clause est en option, elle indique la stratégie à employer pour tester la prémisse)

THEN :<action>

CHANGES :<vars>

(Cette clause est en option et reliée à la clause THEN. "Vars" est un ensemble d'une ou de plusieurs variables dont les valeurs changent, si la règle est tirée).

PRIORITY :<num>

(Elle est en option. L'entier "num" prend des valeurs entre 1 et 100. Il indique la priorité de la règle. Il sert à fixer l'ordre des parcours).

COST :< num>

(Comme la clause précédente, l'entier "num" indique le coût relatif de la règle).

Exemple : temps d'exécution :

REASON :<Texte>

(Elle est en option. "text" est la raison qui sera affichée pendant ou après la consultation).

D'une manière générale, une règle GURU a la forme d'une règle classique :

SI < PREMISSE > ALORS < ACTION >

Chaque prémisse est une conjonction de variables exprimant une condition à la réalisation des actions figurant dans la règle.

Exemple : RULE : RCT141

IF : (fonfil="mauvais") & (fco=true) & (MES="élevée")

THEN : diagtur= {dec="mauvaise"}.

REASON : si les filtres sont colmatés et le taux de [MES] est élevée, alors :

-la décantation est mauvaise.

Une variable est un fait qui peut être une donnée de l'interrogatoire, un symptôme déduit au cours du raisonnement, un diagnostic établi, ou encore une recommandation. Au cours du dialogue de saisie, les valeurs des variables sont fixées afin de permettre au système de mener son raisonnement.

Une action peut être soit une mise à jour d'une variable, soit une mise à jour de la base de faits, soit une mise à jour de l'agenda des buts, soit une consultation d'une autre base de règles.

IV.6.4- Conceptualisation et représentation des connaissances :

Le rôle principal de SEXTEAU est de permettre aux opérateurs peu ou pas expérimentés de diagnostiquer les dysfonctionnements au niveau de la station de traitement des eaux de BOUDOUAOU et d'apporter des solutions; il pose alors un premier niveau de diagnostic quant au dépassement des normes de qualité de l'eau potable.

Le prototype a été organisé en deux modules : un module DIAGNOSTIC et un module TUTORIAL; Bien que simpliste en eux même, ils sont indicateur d'une application potentielle en système expert.

Nous avons conçue le module DIAGNOSTIC de SEXTEAU de sorte qu'il détermine les symptômes d'un problème donné, qu'il identifie les causes de ce problème et donne des recommandations pour résoudre ce problème.

SEXTEAU traite les problèmes opérationnels suivants : la coloration anormale de l'eau traitée, la faible teneur en chlore résiduel dans l'eau traitée, la turbidité élevée de l'eau traitée.

Il est représenté par un ensemble de règles de production. Ce dernier est divisé en trois sous bases :

Une sous base liée au problème de coloration anormale de l'eau traitée, une sous base liée au problème de la faible teneur de chlore résiduel dans l'eau traitée, et une sous base liée au problème de la turbidité élevée de l'eau traitée (Figure IV-6).

Ces bases peuvent être exploitées en chaînage avant ou en chaînage arrière par le moteur de GURU selon le mode de raisonnement utilisé par l'expert.

Le but de chaque base de connaissance étant connu, en utilisant le chaînage arrière, seules les règles concluant ce but sont utilisées. Ceci réduit le temps de traitement.

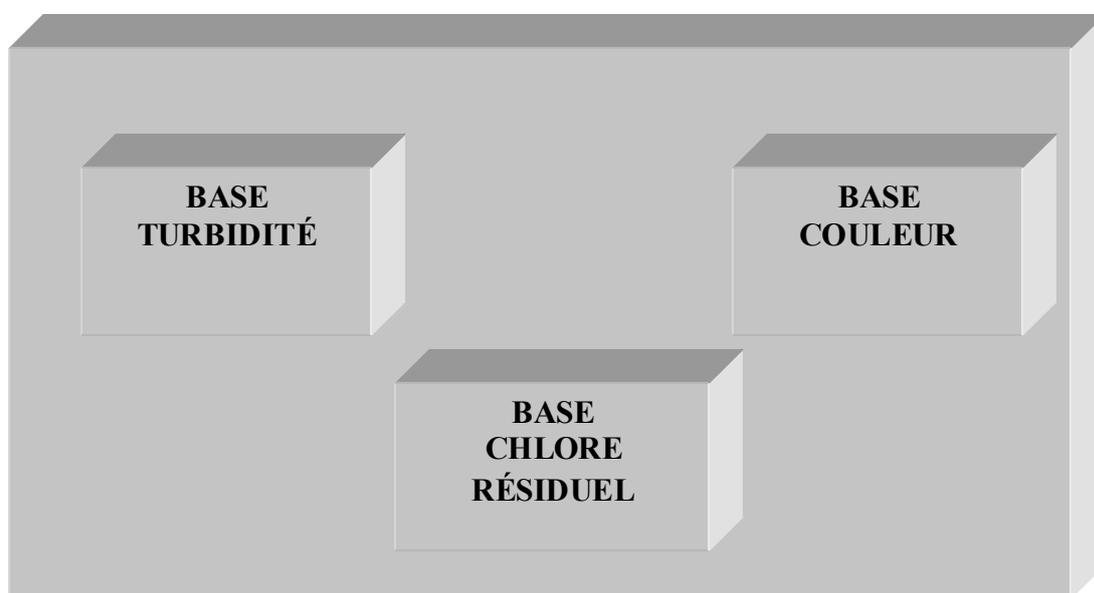


Figure IV-6 : Module diagnostique de SEXTÉAU.

Le chaînage avant peut aussi être utilisé, il induit, dans l'état actuel de la base développée, un temps d'exécution équivalent.

À l'étape actuelle du développement, chaque paramètre est diagnostiqué indépendamment des autres pour éviter les problèmes de redondances. Les problèmes sont énumérés dans un format minuscule. La sélection d'un problème particulier active les parties appropriées de la structure du DIAGNOSTIC. Une fois le diagnostic achevé, une ou plusieurs recommandations sont données à l'utilisateur. À la fin d'une session de consultation, l'utilisateur peut quitter le prototype ou commencer une nouvelle session.

A.1- sous base TURBIDITÉ : Cette base représente les règles relatives au diagnostic du paramètre turbidité de l'eau traitée qui constitue le problème le plus représentatif au niveau de n'importe quelle station de traitement d'eau potable, puisqu'il agit à tous les niveaux du traitement. Elle contient (52) règles de production pour déterminer les cause et les recommandations en cas d'un dépassement de la norme du paramètre turbidité.

Pour des buts explicatifs, une partie de la base de connaissance représentant le diagnostic de la forte turbidité de l'eau traitée, est discuté ici.

La Figure IV-7 montre une partie de l'arbre de décision établi pour ce paramètre et qui illustre le patron de raisonnement effectué par l'expert. À partir de cet arbre nous avons déduit les règles de production. Le diagnostic commence par la dernière étape de traitement et revient en arrière tout le long de la chaîne de traitement en diagnostiquant toutes les étapes et continue comme suit :

RULE:RCT0

IF: (quale="mauvaise")

THEN: diagtur= {vturet>vnturet}.

REASON : **si** l'eau traitée est de mauvaise qualité, **alors** :

- la valeur de la turbidité de l'eau traitée est supérieure à la valeur normative.

RULE: RCT1

IF:(vturet>vnturet)

THEN diagtur= {(fontur="mauvais") or (tcpHefd="mauvais") or (vturef>vnturef)}.

REASON : **si** la turbidité de l'eau traitée est élevée **alors** :

- c'est soit le turbidimètre qui ne fonctionne pas bien,
- ou,
- le traitement de correction du pH de l'eau filtrée désinfectée est mauvais,
- ou,
- la turbidité de l'eau filtrée est élevée.

RULE :RCT2

IF :(vturet>vnturet) & (fontur="mauvais")

THEN :diagtur= {"mauvais fonctionnement du turbidimètre"}.

recom= {"réparer le turbidimètre"}.

REASON : **si** le turbidimètre ne fonctionne pas bien **alors** :

- c'est lui la cause du problème, et on recommande de le réparer.

RULE : RCT3

IF :(vturet>vnturet) & (tcpHefd="mauvais")

THEN :diagtur = {(qpc="mauvaise") or (plc="mauvaise") or (dlc="élevée")}.

REASON : **si** le problème de la turbidité est due au traitement de correction du pH de l'eau filtrée désinfectée **alors** :

- c'est soit la poudre de chaux qui est de mauvaise qualité,
- ou,
- la préparation du lait de chaux est mauvaise,
- ou,
- il y a un surdosage en lait de chaux.

RULE : RRT4

IF :(tcphefd="mauvais") & (qpc="mauvaise")

THEN : diagtur= {"le problème de la turbidité est due à la mauvaise qualité de la poudre de chaux"}.

recom= {"utiliser une poudre de chaux de qualité meilleure"}.

REASON : **si** la poudre de chaux utilisée pour la préparation du lait de chaux est de mauvaise qualité (contient beaucoup d'impuretés) **alors** :

- utiliser une autre poudre de chaux de qualité meilleure.

Et ainsi de suite en parcourant la chaîne de traitement pour trouver la cause du dysfonctionnement et donner les recommandations par la suite.

A.2- sous base OXYDANT RÉSIDUEL :

Cette base représente les règles relatives au diagnostic du paramètre oxydant résiduel. Elle contient une dizaine de règles.

Une partie des règles représente les causes d'une valeur d'oxydant résiduel différente de la valeur normative, l'autre partie représente les recommandations qu'il faut suivre pour résoudre le problème.

Exemple :

RULE:RCO1

IF: VMOR=VNOR

THEN : DIAGCH= {"dosage invalide"} or (qualeb="mauvaise").

REASON : si la valeur de chlore résiduel est inférieure à la valeur normative alors :

- c'est dû soit à un problème de dosage qui est invalide,
- ou,
- à un changement de la qualité de l'eau brute.

A.3- sous base COULEUR : cette base est consultée dès qu'il y a apparition de coloration anormale dans l'eau traitée. Cette base comprend une vingtaine de règles définissant les causes à effets de ces problèmes et les recommandations pour palier à ce problème. La majeure partie de la connaissance a été collectée à partir de la littérature, essentiellement du Vade-mecum du chef d'usine de traitement des eaux destinées à la consommation [Aghm, 1987].

Exemple:

RULE:RCC1

IF :(CET>CNET)

THEN: DIAGC= {(CEFD>CNEFD)}.

REASON : si il y a apparition de coloration anormale de l'eau traitée alors elle est apparue lors du traitement de désinfection.

RULE: RCC2

IF :(CEFD>CNEFD)

THEN : DIAGC= {(Fe)="élevée"} or ((Mn)="élevée") or (CEF>CNEF)}.

REASON : si l'oxydation par désinfection développe une couleur alors :

- les concentrations en fer et en manganèse avant oxydation sont élevées,
- ou,
- la coloration de l'eau filtrée est anormale.

RULE : RRC3

IF :((Fe)="élevé") or ((Mn)="élevé").

THEN : DIAGC= {"le problème de la coloration anormale de l'eau traitée est due aux concentrations élevées du fer et/ou manganèse avant désinfection"}.

RECOMC= {"réduire leurs concentrations avant précipitation"}.

REASON : si l'oxydation par désinfection développe une couleur du fait des concentrations élevées en Fer et en manganèse avant oxydation alors :

- les réduire par précipitation avant désinfection.

RULE : RCC4

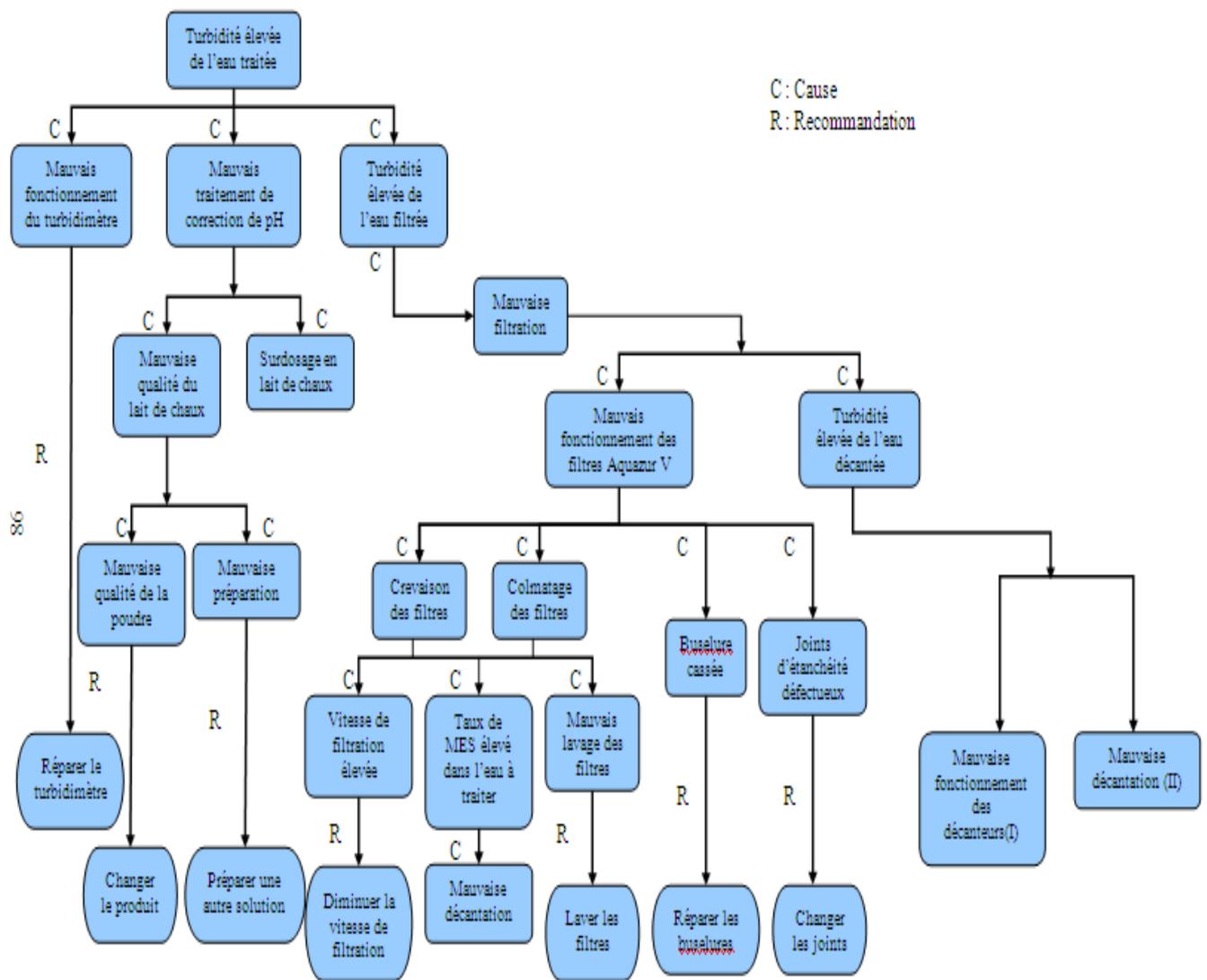
IF :(CEF>CNEF)

THEN : DIAGC= {(CEF="précipité") or (CEF="soluble")}.

REASON : si il y a apparition de coloration anormale de l'eau filtrée alors :

- la nature intrinsèque de la couleur est soit sous forme de précipité,
- ou,
- sous forme soluble.

Le module TUTORIAL est un outil d'enseignement pour les nouveaux opérateurs, il comprend la norme algérienne de potabilité et les techniques d'analyse utilisées au niveau de la station de Boudouaou pour les paramètres considérés à savoir : Turbidité, Couleur et Oxydant résiduel.



FigureIV-7:Représentation d'une partie de l'arbre de décision de la sous base turbidité.

IV.7- LE MODULE D'ACQUISITION DES CONNAISSANCES :

Un système expert utilise une compétence empruntée à un expert humain. Il est donc intuitif de penser au développement d'un module d'acquisition des connaissances nouvelles et de modification des connaissances anciennes. En effet, les systèmes experts tirant leur puissance de la richesse des bases de connaissances qu'ils exploitent, il est impératif que ces bases soient mises à jours.

Cette mise à jour est prise en charge par un gestionnaire de base de règles propre à GURU. Pour ce faire, deux approches sont possibles :

La première approche est la gestion des règles par traitement de texte ;

La seconde approche permet la gestion de la base de règle par menu.

- Gestion de la base de règle par traitement de texte :

Pour écrire une base de règles ou bien la modifier, GURU dispose de son propre traitement de texte. Pour y accéder, il suffit de taper la commande suivante :

```
GURU > TEXT < NOM DE FICHER.RSS >
```

Où NOM DE FICHER représente le nom de la base de règle.

Une fois dans l'éditeur, le développeur peut écrire ses règles en respectant la syntaxe des règles propres à GURU (cf. Chapitre IV, p. 92).

- Gestion de la base de règle par MENU

Cette approche, différente de la précédente, présente au concepteur une interface par menu. Ce dernier pour écrire sa base de règles doit appeler ce menu en tapant la commande suivante :

```
GURU > BUILD
```

En exécutant cette commande, un menu apparaît à l'écran et le développeur est guidé pour l'écriture de sa base.

Notons que dans cette approche, la connaissance de la syntaxe des règles n'est pas nécessaire.

Une fois l'écriture de la base est achevée, le développeur est appelé à compiler sa base dans le but de générer une version qui puisse être traitée par le moteur. La compilation de la base de règle se fait en tapant la commande suivante :

```
GURU > COMPILE < NOM DE FICHER >
```

L'effet de la compilation donne une nouvelle version de la base, cette dernière aura pour extension "RSC".

La compilation est obligatoire quelque soit l'approche adoptée. En effet, lors de la compilation GURU détecte certaines incohérences ainsi que les erreurs de syntaxe et de logique.

Notons que dans le cadre du développement de la base de connaissances de SEXTEAU, nous avons adopté la deuxième approche ou la connaissance de la syntaxe des règles n'est pas nécessaire.

IV.8- L'INCERTAIN DANS SEXTEAU :

Dans la plus part des cas, les experts font appel dans leur processus de raisonnement et de décision à des règles approximatives entachées d'un coefficient de certitude.

L'incertitude peut provenir à la fois des données et du raisonnement mis en œuvre.

Représentation de l'incertitude des faits :

L'utilisateur, en introduisant les faits initiaux ou en répondant à une question du système, n'est pas toujours entièrement certain des faits introduits. Pour traduire son incertitude, il associe aux faits des facteurs de certitudes traduisant sa croyance en la vérité de cette proposition.

Ces faits incertains sont représentés sur ordinateur sous la forme :

<FAIT> FC (facteur de certitude)

Avec $1 \leq \text{Facteur de certitude} \leq 100$

Représentation de l'incertitude des règles :

En plus de l'incertitude des faits établis par l'utilisateur, les raisonnements incertains menés par l'expert sont représentés par des règles incertaines de la forme :

SI < PREMISSE > ALORS < CONCLUSION > FC (facteur de certitude)

Algèbres des facteurs de certitude :

La conclusion des règles incertaines ou de règles dont la prémisse comporte des faits incertains est incertaine. Pour déterminer la certitude de la conclusion, il importe de propager l'incertitude des faits et des règles en combinant leur poids à l'aide d'algèbre de calcul reproduisant la manière de procéder des experts.

Ces algèbres permettent le renforcement ou l'affaiblissement de la certitude de la conclusion selon :

- Le type d'opérateurs utilisés;
- Le nombre de règles concluant la même conclusion.

a) Certitude d'une prémisse composée :

Il existe deux types de prémisses composées :

- Prémisse conjonctive logique (opérateur "et").
- Prémisse disjonctive logique (opérateur "ou").

a.1) Prémisse conjonctive

La prémisse est de la forme fait 1 et fait 2.

Dans ce cas, la certitude de la prémisse est au plus égale au minimum des certitudes des faits qui la composent.

GURU offre quatre algèbres de calcul de la certitude de la prémisse.

La méthode du minimum :

$$FC(\text{prémisse}) = \min(FC(\text{fait1}), FC(\text{fait2}))$$

La méthode du produit :

$$FC(\text{prémisse}) = \frac{FC(\text{fait1}) * FC(\text{fait2})}{100}$$

La méthode de la moyenne :

$$FC(\text{prémisse}) = \left[\frac{FC(\text{fait1}) * FC(\text{fait2})}{100} + \min(FC(\text{fait1}), FC(\text{fait2})) \right] / 2$$

La méthode de Bonczek-Eagin :

$$FC(\text{prémisse}) = [FC(\text{fait1}) * FC(\text{fait2}) / 100] * [2 - \max(FC(\text{fait1}), FC(\text{fait2})) / 100]$$

La certitude de la prémisse doit être proche de celles des ces faits en respectant la condition :

$$\text{Certitude (prémisse)} \leq \min(\text{certitude des faits})$$

Une série de test détermine que la méthode de Bonczek-Eagin est celle qui fournit les certitudes de prémisses les plus proches de celles des faits

a.2) Prémisse disjonctive

La prémisse est de la forme fait 1 ou fait 2.

Dans ce cas, la certitude de la prémisse est au moins égale au maximum des certitudes des faits.

Il existe quatre algèbres de calcul de la certitude de la prémisse disjonctive :

La méthode du maximum :

$$FC(\text{prémisse}) = \max(FC(\text{fait1}), FC(\text{fait2}))$$

La méthode de la somme :

$$FC(\text{prémisse}) = FC(\text{fait1}) + FC(\text{fait2}) - \frac{FC(\text{fait1}) * FC(\text{fait2})}{100}$$

La méthode de la moyenne :

$$FC(\text{prémisse}) = \max(FC(\text{fait1}), FC(\text{fait2})) + \frac{FC(\text{fait1}) + FC(\text{fait2}) - \max(FC(\text{fait1}), FC(\text{fait2}))}{2}$$

La méthode de Bonczek-Eagin :

$$FC(\text{prémisse}) = \max(FC(\text{fait1}), FC(\text{fait2})) + \frac{FC(\text{fait1}) * FC(\text{fait2})}{100} * (1 - \max(FC(\text{fait1}), FC(\text{fait2}))/100)$$

La méthode que nous avons adoptée est celle de la somme, puisque les experts, traitant les règles à prémisses disjonctives somment les effets individuels des faits pour renforcer l'effet global de la prémisse.

b) Certitude de la conclusion :

b.1) La certitude de la conclusion de règle :

La règle a la forme suivante :

Si < prémisse > alors < conclusion > FC < fc >

La certitude de la conclusion d'une règle est la combinaison des certitudes :

- De la prémisse;
- De la règle.

Les algèbres de certitude utilisés dans ce cas sont les mêmes que celles utilisées pour une prémisse conjonctive. La méthode choisie est de celle de Bonczek-Eagin.

b.2) Certitude de la conclusion de plusieurs règles :

Les règles ont la forme suivante :

Si < prémisses1 > alors < conclusion > FC < fc1 >

Si < prémisses2 > alors < conclusion > FC < fc2 >

La certitude de la conclusion est entière dès qu'une seule règle la concluant est certaine avec une prémisse certaine. Les effets individuels des règles sur une même conclusion s'ajoutent pour confirmer la conclusion et renforcer son facteur de certitude.

Pour calculer la certitude globale de la conclusion, une certitude individuelle de la conclusion provenant d'une règle est calculée en utilisant la méthode de Bonczek-Eagin. Les certitudes résultantes sont alors combinées, en utilisant la méthode confirmative de la somme.

Notons que les facteurs de certitudes de toutes les règles du système SEXTEAU peuvent changer au cours des tests de validation auprès de l'expert. Aussi pour une première écriture des règles, les facteurs de certitude étaient tous fixés à 100.

IV.9- LA DÉMARCHE DIAGNOSTIC DU SYSTÈME SEXTEAU :

La consultation du système commence par l'activation de la base de connaissance. L'utilisateur est amené à répondre aux questions posées par le système afin que ce dernier puisse déterminer le but à atteindre et établir les recommandations possibles.

L'exécution de la base de connaissance conduit à initialiser un agenda des buts à considérer. Ensuite, le système utilise une structure de contrôle en chaînage arrière afin de confirmer les buts à atteindre.

Le système procède en trois étapes comme le montre la Figure IV-8 :

Dans un premier temps, la consultation se base essentiellement sur le repérage des dysfonctionnements affectant l'activité production au sein de l'usine. Chaque signe diagnostiqué (symptôme) fait l'objet d'une question. Selon les réponses obtenues, le système renvoie à un sous ensemble de questions, et/ou de travaux à réaliser afin de préciser le problème.

Dans un deuxième temps, le système essaye de lier à chaque symptôme une cause. En examinant l'ensemble des causes, le système procède à un diagnostic différentiel pour déceler la (les) cause(s) fondamentale (s).

Dans un troisième et dernier temps, le système se base sur les causes retenues à la deuxième étape afin de donner les recommandations possibles.

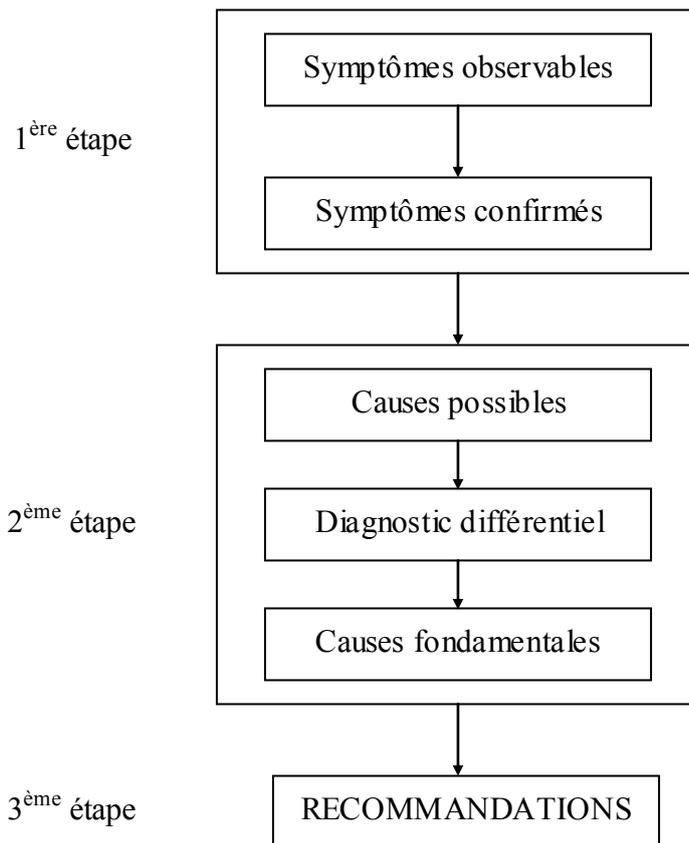


Figure IV-8 : Schéma de la démarche diagnostic du système SEXTEAU

Les symptômes sont les faits constatés. Les recommandations ou encore les propositions constituent l'objectif principal du diagnostic. En effet, le diagnostic est un moyen d'action, d'amélioration et de progrès. Un symptôme peut être à son tour une cause.

IV.10- MISE EN ŒUVRE DE SEXTEAU :**IV.10.1- Stratégie de raisonnement :**

GURU permet plusieurs types de stratégies de raisonnement telles que :

- La rigueur de raisonnement;
- L'ordre de sélection des règles;
- La stratégie d'évaluation de la prémisse.

a) La rigueur de raisonnement :

Un expert humain peut, lors de son raisonnement sur un problème, utiliser rigoureusement toute l'expertise dont il dispose pour aboutir à une recommandation. En revanche, le même expert pourra fournir moins d'effort pour résoudre un autre problème en s'arrêtant dès qu'il est capable de donner un avis.

Le contrôle de la rigueur du moteur de GURU, lors de la prise en considération des règles, se fait par le biais de la variable d'environnement « E. RIGR ».

Dans le cas du système expert réalisé, étant donné que le raisonnement est inductif E.RIGR doit contrôler le moment où le moteur d'inférences arrêtera de considérer de nouvelles règles. Nous avons fixés au début de notre travail E.RIGR à la valeur A.

« A » : Rigueur absolue. Le moteur tire toutes les règles pertinentes qui peuvent être tirées.

Mais en faisant nos tests, on a constaté que le moteur doit balayer toutes les règles pour donner la réponse à la fin, ce qui se traduit par un temps de réponse élevé. En changeant la valeur de E.RIGR et en effectuant des tests à chaque fois, nous avons fini par décider d'attribuer la valeur M à la variable E.RIGR., ce qui nous a permis de réduire le temps de réponse.

"M" : rigueur minimale. le moteur arrête le parcours dès que le but a une valeur.

b) L'ordre de sélection des règles :

Lors de son raisonnement sur un problème donné, le moteur d'inférences doit sélectionner et traiter les règles dans un certain ordre. Cet ordre peut avoir un effet sur la vitesse avec laquelle l'avis est donné et sur la nature effective de cet avis.

Le moteur d'inférences GURU examine les règles concurrentes suivant un ordre de sélection spécifique contrôlé par la variable d'environnement « E. SORD ».

La valeur que prend cette variable est composée d'un ou de plusieurs codes. Chacun indique un critère particulier de sélection. Si l'on spécifie plus d'un code à « E. SORD », c'est le premier qui a la priorité puis le second et ainsi de suite.

Dans le cadre de notre application nous avons choisi que la règle ayant le moins de variables inconnues dans la prémisse sera sélectionnée en premier, d'où l'attribution du code U à la variable E.SORD.

Mais en faisant nos test, nous a avons opté à attribuer la valeur de F à la variable E.SORD, ce qui nous a permis d'avoir de meilleurs résultats.

"F" sélectionner la première règle dans l'ordre de la base des règles.

c) La stratégie d'évaluation de la prémisse :

GURU traite les inconnues d'une prémisse de gauche à droite. Si le développeur désire utiliser une autre séquence d'évaluation, GURU met à sa disposition pour chaque règle une clause NEEDS (besoin) qui lui permet de spécifier l'ordre d'évaluation des variables.

La stratégie d'évaluation de la prémisse est spécifiée à l'aide de la variable d'environnement « E.TRYP ».

Dans un premier temps, la stratégie d'évaluation de la prémisse de notre système est d'abandonner l'évaluation dès que la valeur d'une variable ne peut être déterminée, la variable E.TRYP prends alors la valeur « S : stricte » .

"S" : Stricte. Le moteur abandonne l'évaluation dès que la valeur d'une variable ne peut être déterminée.

Mais lors des tests effectués, en faisant varier la valeur de cette variable et en observant le résultat des consultations, nous avons constater que la valeur R permet d'avoir de meilleurs résultats, et avec un temps de réponse réduit.

"R" : réactifs. Le moteur abandonne la recherche dès que la prémisse est fausse ou inconnue.

Les variables de contrôle du raisonnement peuvent être fixées de manière interactive. Ainsi GURU donne une certaine liberté dans la mise au point du comportement de son moteur au cours de son raisonnement. Ceci nous permet d'étudier les effets de différents choix de paramètres au cours de la validation.

De tels ajustements peuvent nous aider à construire un système dont les conseils seraient plus proches de ceux d'un expert humain. Ils peuvent également nous permettre de régler le moteur d'inférences de façon à maximiser la vitesse des consultations.

IV.10.2- La capacité d'explication de son raisonnement :

Dans beaucoup de domaine et particulièrement les domaines d'expertise, il est difficile d'accepter des résultats apportés à un problème à moins d'être convaincu de la précision du processus qui les a produits. L'explication du raisonnement est une qualité appréciée des systèmes experts. En effet, l'utilisateur peut accéder à l'ensemble de la démarche suivie ainsi qu'aux connaissances employées afin de comprendre les raisonnements et leurs enchaînements.

Pour SEXTEAU, ces explications peuvent être demandées au cours de la consultation ou après celle-ci.

a- Explication au cours de la consultation :

Au cours d'une consultation, le système peut demander à l'utilisateur une donnée d'un certain type. Ce dernier avant de répondre peut à son tour demander au système pourquoi il a demandé telle ou telle donnée.

Ainsi, le système sera interrompu provisoirement pour fournir plus d'explications.

b- Explication après une consultation :

L'utilisateur peut, s'il veut savoir, demander au système comment il est parvenu à l'avis apporté.

Le système SEXTEAU dispose de deux commandes à cette fin :

COMMENT : la commande comment permet à l'utilisateur d'interagir avec le système expert SEXTEAU pour lui demander comment a été déterminée la valeur d'une variable. Le système répond qu'elle a été déterminée par la suite du déclenchement d'un certain ensemble de règles dont il donne le nom.

POURQUOI : dans ce cas, l'utilisateur désire savoir pourquoi une règle a été utilisée. Le système expert répond à cette question en affichant les faits établis de la prémisse de la règle utilisée ainsi que la clause raison qui fournit une explication en langage naturel ou bien pourquoi telle donnée a été utilisée ou demandée. Dans ce cas, le système affiche la clause de la règle nécessitant cette donnée.

IV.11- VÉRIFICATION ET VALIDATION DU PROTOTYPE DE SYSTÈME EXPERT SEXTEAU :

Un arbre de décision est un type de diagramme très efficace permettant de visualiser tous les facteurs qui doivent être pris en considération lors de la prise de décision.

Les arbres de décision et les règles extraites sont des outils très puissants pour la vérification et la validation d'un prototype de système expert [Zhu et Simpson, 1992; Zhu et Simpson, 1996].

Comme expliqué plus haut, la technique du recours à la réalisation d'un prototype est une méthode essai-et-erreur.

La vérification du prototype du système expert SEXTEAU a été réalisée en présentant aux opérateurs experts de l'usine de BOUDOUAOU les arbres de décision élaborés, ainsi que les règles de production déduites à partir de ces arbres. Des corrections et des modifications ont été faites à chaque fois que l'expert opérateur trouve des erreurs ou des contradictions.

Une procédure de validation semblable à celle suggérée par Collins et al. (1991) a été utilisée pour tester les trois sous bases de connaissances. Cette technique basée sur les arbres de décision consiste à tester les réponses données par le système avec des valeurs proposées qui permettraient au prototype de suivre une trajectoire particulière. Chaque trajectoire a été examinée de telle manière que les trajectoires inexactes ou inadéquates soient identifiées.

L'utilisation de la variable de trace E.TRACE, nous a permis de suivre le raisonnement du système pas-à-pas pour pouvoir le comparer avec celui de l'expert. L'analyse des résultats des étapes de vérification et validation nous a révélé des insuffisances dans la base de connaissances. Ce résultat était prévisible du fait de la complexité du domaine traité.

En effet, l'acquisition de la connaissance à partir d'un groupe d'expert formé et sensibilisé sur la technologie des SE, diminue le risque d'erreurs. De plus, les cas rares et exceptionnels doivent être pris en considération, les scénarios extrêmes devraient être examinés sur une base de cas par cas. Une estimation réelle des facteurs de certitudes associés aux règles doit être également envisagée.

Des processus de mise en œuvre de prototype, de vérification et de validation alternés doivent être effectués jusqu'à ce que toutes les erreurs soient relevées et corrigées pour aboutir à un produit satisfaisant pour les experts.

L'objectif de ce travail était la réalisation d'un prototype pour permettre d'évaluer la faisabilité de la technique des systèmes experts pour résoudre des problèmes liés au traitement des eaux.

IV.12- MÉTHODOLOGIE DE DEVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME EXPERT EN TRAITEMENT DES EAUX :

L'approche de l'intelligence artificielle est très différente de l'approche classique pour la résolution des problèmes et la réalisation des systèmes. Ces produits spécifiques ont leurs caractéristiques, et le processus de leur développement commence à se dégager de l'expérience. Mais, étant donné que tous les systèmes experts existants dans le domaine du traitement des eaux ont été développés par des entreprises qui les exploitent à leurs profits. Ces dernières ne sont pas toujours prêtes à les mettre à la disposition d'entreprises concurrentes. De ce fait, une entreprise voulant développer un tel système (rappelons qu'un système générique n'existe pas sur le marché) peut rencontrer des difficultés, du fait de l'absence d'une méthodologie claire et structurée permettant d'aboutir à un système opérationnel et performant.

Dans le cadre de ce magister, nous proposons une esquisse de méthodologie de développement d'un système expert en traitement des eaux, dont la finalité est de contribuer, un tant soit peu, à la réussite d'un tel processus. Pour ce faire nous commencerons par présenter les obstacles à lever, et les conditions de réussite d'un tel système.

IV.12.1 -Conditions préliminaires :

Comme toute démarche de ce type, l'impulsion doit venir de la Direction, voire de la Direction générale de l'usine de traitement des eaux. En effet, quelle que soit l'origine du mouvement, celui-ci ne peut se généraliser de façon coordonnée sans une implication effective de l'équipe dirigeante.

Ainsi Les conditions préalables sont :

- sensibilisation, voire formation des dirigeants de la station de traitement leur permettant de se faire une idée du contenu et de la portée des systèmes experts dans le domaine de l'eau;
- Décision de l'équipe dirigeante de la station, prise en conséquence de cette perception, d'entreprendre une action de développement d'un système expert;
- mise en place d'une cellule de pilotage du projet, dont les membres seront présentés ci-dessous.

IV.12.2 – Conditions de mise en œuvre du processus :

La réalisation du processus nécessite :

- Une action de formation, destinée à faire connaître au personnel concerné les possibilités des systèmes experts dans leurs domaines spécifiques qui est le traitement des eaux.

Cette première formation a pour objectif de mettre en place dans tous les services concernés de l'entreprise de traitement de l'eau (maintenance, analyse, exploitation,...etc.) un ensemble de correspondants susceptibles d'identifier les applications possibles.

- Effectuer un travail d'identification des applications possibles, conduit
 - sur le terrain par les responsables désignés, convenablement formés,
 - sur le plan informatique, par un informaticien qualifié de la station.

Les étapes et les critères de la démarche à suivre pour sélectionner les applications possibles sont celles présentées précédemment (cf. Chapitre II, p. 48).

- Élaboration d'un plan d'entreprise pour l'introduction des systèmes experts. Il s'agit d'arrêter les structures et les personnes concernées par les nouveaux systèmes experts d'une part, et le mode ou la stratégie d'introduction (progressive, totale, etc.), d'autre part. Des actions à entreprendre en adéquation avec la stratégie d'introduction seront arrêtées et les moyens nécessaires définis. C'est ce qu'on appelle le plan d'introduction.

- **élaboration du choix final :**

À l'issue de ce processus, le comité directeur disposera d'une liste d'applications sélectionnées et classées en fonction des critères de faisabilité développés dans les chapitres précédents, et selon le type d'application possible dans le domaine du traitement des eaux à savoir le fonctionnement, les réparations, l'entretien, l'organisation et la gestion, la formation et le design. Là où les applications choisies sont celles à même de permettre la résolution des problèmes les plus répétitifs nécessitant l'intervention de l'expert.

Le choix de l'application est relatif aussi bien à la typologie (diagnostic, interprétation, prévision...etc.), qu'au sujet (fonctionnement, maintenance,...etc.). La détermination de ces deux éléments (typologie et sujet) permettent de caractériser l'application choisie.

Le choix d'une application doit impérativement prendre en compte les éléments suivants :

- La faisabilité technique telle que définie au chapitre II du présent document (cf. p. 45)
- L'acceptabilité du système à mettre en place par les futurs utilisateurs qui sont incontestablement les opérateurs de la station de traitement des eaux. Cette acceptabilité ne peut s'obtenir que par l'implication des opérateurs dès le début du projet, par la formation et par l'explication des avantages du nouveau système. Toutes ces actions doivent tenir compte des niveaux des différents acteurs.
- Le Choix d'un problème dont l'automatisation peut être assez rapide, mais suffisamment complexe pour que le système final n'évoque pas le marteau-pilon qui écrase une mouche.
- L'impact stratégique du projet, c'est-à-dire voire sa capacité à contribuer une fois réalisée à l'évolution souhaitée que ce soit dans le niveau de compétence des opérateurs utilisateurs, la gestion de la station, la qualité de l'eau produite, le gain de temps et le gain de productivité. C'est en fait l'impact direct du projet sur l'activité de traitement de l'eau, et de sa démonstration qui permettra de favoriser, voire de susciter l'implantation d'autres systèmes.

- **les intervenants :**

L'équipe du projet de réalisation doit être constitué au minimum de :

-l'expert ou les experts du domaine de traitement de l'eau dont la compétence apporte un plus pour la résolution des problèmes qui sont de son ressort ;

-le développeur qui doit avoir l'aptitude d'extraire et de formuler la connaissance de ou des experts ;

-le chef de projet ;

-un représentant des utilisateurs.

L'expert ou les experts du domaine doivent disposer d'une certaine capacité de conceptualisation, de structuration afin de transmettre une connaissance aussi structurée que possible.

De même, le développeur doit avoir une connaissance suffisante du domaine de traitement de l'eau, afin de minimiser les erreurs d'extraction.

Enfin, le représentant des utilisateurs doit disposer d'une expérience suffisante pour déceler les éventuelles difficultés d'utilisation du système.

- **élaboration du pré-système :**

La réalisation du prototype suit le processus suivant :

1. identifications des éléments fondamentaux du pré-système, elle comporte les points suivants :
 - la définition précise du sous problème traité
 - l'identification des entrées et des sorties,
 - la fixation des règles et moyens d'évaluation,
 - la détermination des ressources et du calendrier.
2. l'analyse et la formalisation : l'objet de l'analyse correspond au travail d'examen des différentes composantes du problème qui constituent la méthode de résolution, et qui devront être introduites dans la machine, sous une forme appropriée.

La formalisation correspond à la détermination de la forme appropriée à cette entrée en machine, c'est-à-dire au choix des outils et des méthodes de représentation.

Il est important de dire que pour pouvoir se consacrer aux problèmes d'acquisition de connaissance qui est en fait l'étape la plus déterminante dans le processus de réalisation d'un système expert, et éviter tout les problèmes d'une programmation rebutante, l'utilisation d'un générateur de système expert est plus que recommandée.

Le choix d'un générateur dépend des éléments ci-après :

- le nombre et l'importance des applications à réaliser : En effet, si les applications sont nombreuses, l'entreprise pourra amortir un investissement dans un générateur performant et de ce fait nécessairement cher.
- Le type de générateur général ou dédié : Le premier est flexible permettant un large champs d'application, alors que le second est plus facile d'utilisation et plus rigide.
- La portabilité d'un système d'exploitation à un autre et d'une version à une autre.

- Les avantages commerciaux tels que les mises à jour, l'assistance en ligne, la documentation, ...etc.

3. la réalisation et les tests : le processus consiste en un aller et retour permanent entre les deux tâches "réalisation" et "test". C'est la caractéristique essentielle du mode d'élaboration d'un système expert. Notons simplement que si le processus d'interaction avec l'expert est bien conduit, ce dernier devrait s'accoutumer rapidement à s'exprimer lui-même dans le formalisme choisi, ce qu'il souhaite formuler.

Pour la phase de test, elle s'effectue sur le jeu de cas pratiques. Les principaux problèmes à examiner au cours du test sont :

Entrées : -les questions sont elles formulées correctement : expression compréhensible, vocabulaire approprié, absence d'ambiguïté ?

- est-il possible de fournir des informations supplémentaires, en dehors des demandes du système, lorsque de nouvelles données sont disponibles, et si le besoin s'en fait sentir ?

Sorties : -les conclusions sont elles correctes ?

- Leur formulation est elle appropriée (suffisamment détaillée, ni trop, ni peu) ?

Connaissances : -vérifier leur validité, à partir des résultats qu'elles produisent. Ceux-ci peuvent être :

- Faux ;
- Incorrectement classés, en terme de plausibilité relative ;
- Incohérents entre eux.

Stratégie de contrôle : -produit-elle un déroulement de raisonnement voisin de celui de l'expert ?

-si des problèmes d'efficacité se posent à ce stade, en chercher la cause, et vérifier qu'ils pourront être résolus par la suite.

- **Validation et conclusion de la réalisation du pré système** : une fois parvenu au terme de la mise au point, le responsable de la réalisation dégagera les enseignements tirés de ce travail :

-adaptation de la technologie des systèmes experts à la résolution du problème posé;

-difficultés rencontrées dans la réalisation du prototype, et définir les adaptations techniques à réaliser pour répondre au besoin final;

-qualité du prototype réalisé en terme de résultats, leur adéquation aux besoins des opérateurs utilisateurs à satisfaire;

-évaluation fine de l'effort à entreprendre pour aboutir au système définitif.

- **Réalisation du système opérationnel :**

La réalisation du pré système permet de valider l'application de l'approche système expert, de préciser les techniques appropriées et d'approfondir la définition du problème à traiter.

Pour passer de ce pré-système expérimental et probatoire, à un véritable outil opérationnel, la première recommandation de tous les auteurs est claire : **jeter le pré-système** c'est-à-dire ne pas chercher à le faire évoluer pour le transformer par adaptations en produit définitif.

À partir des résultats obtenus, le travail à effectuer est fonction :

-de la complexité du problème traité, et notamment par rapport à celle du problème abordé dans la réalisation du pré système;

-de l'évolution des outils utilisés (générateur de système expert);

-de la complexité des interfaces et de l'intégration au système d'information existant au niveau de la station.

- **-Les étapes possibles :**

Nous proposons un schéma de trois étapes pour la réalisation du système définitif : prototype, démonstrateur avancé, système final. Cette décomposition a le mérite de faire bien ressortir les différents problèmes à résoudre :

-Extension du système expert : les questions auxquelles il faut répondre sont les suivantes :

- La définition de la tâche exacte assignée au système final, en fonction de l'expérience acquise au cours de la réalisation du pré système, et selon la typologie des systèmes experts en traitement des eaux (diagnostic de panne, interprétation de résultats, prévision...)
- Le choix et la définition détaillée des cas tests, sur lesquels sera basée la validation.
- Les limitations de l'outil utilisé pour réaliser le pré-système, compte tenu de l'expérience de la réalisation de celui-ci, et des évolutions de fond prévues pour le système final.

En fonction de ces facteurs, nous pourrions :

-soit effectuer des modifications de l'outil employé,

-soit utiliser d'un autre outil, mieux adapté (utilisation d'un générateur plus performant et dédié aux traitement des eaux).

À partir de ces spécifications, et de l'outil finalement retenu, procéder au transfert de l'expertise acquise, à son extension et à sa validation suivant le processus d'aller et retour et d'études d'exemples.

À l'issue de ce processus, l'entreprise disposera d'un système expert complet.

-Réalisation des interfaces : elle se révèle particulièrement nécessaire :

- Si le système doit être intégré dans un système d'information déjà existant, complexe et très utilisé au niveau de la station (en particulier, un problème important est celui de la connexion à des bases de données existantes);
- Si des interactions avec des acquisitions de mesures ou des commandes automatisées sont prévues (utilisation de capteurs);
- Plus simplement, si l'on désire approfondir à l'avance les problèmes posés par l'utilisateur final du système en vue de faciliter son acceptation.

-Intégration : elle ne présente pas de caractère spécifique par rapport à celle de tout programme d'application réalisé pour l'entreprise.

Toute fois, il importe de noter que :

- La réalisation des interfaces est naturellement plus facile si une étude des interfaces est entreprise à partir du pré-système;
- Même si le développement a été fait par une équipe externe à l'entreprise, l'association des services chargés de l'informatique interne est indispensable à la réussite de l'intégration finale.

- **validation et évaluation du système final :**

La validation du système expert développé s'effectue par comparaison de ses résultats avec ceux d'une population d'évaluateurs humains, eux-mêmes experts, confrontés aux mêmes problèmes.

Il existe quatre critères de validation d'un système expert opérationnel :

- Sur les résultats :
 - justesse des résultats : la détermination de cette qualité est loin d'être évidente, s'agissant de résultats non rigoureux, des problèmes pour lesquels plusieurs bonnes réponses sont possibles; on devra tenir compte :
 - du classement des réponses,
 - de l'absence de réponse incorrecte,
 - du caractère plus ou moins grave de l'apparition de telle réponse,
 - de la sensibilité des résultats à une variation des informations entrées,
 - de la conformité du processus de raisonnement à celui des experts, particulièrement importante si le système doit justifier son raisonnement, a fortiori pour l'enseignement et la formation
 - des données prises en compte pour le raisonnement : leur nombre par rapport à celles qui sont nécessaires à l'expert, la pertinence des questions, leurs ordres...caractérisent la qualité du raisonnement et jouent sur la commodité d'utilisation du système et de son acceptation par l'utilisateur.

- Sur les performances : qui se mesure par le délai de réponse du système, surtout que la qualité de l'eau est liée directement à la santé des consommateurs, de ce fait pour que le système développé soit considéré comme performant il doit donner la réponse au problème posé dans un temps très inférieur à celui de l'expert humain confronté au même problème.

- Protocoles : les protocoles doivent être établis suivant les principes classiques (définition des mesures des critères qualitatifs, élaboration des règles de recueil des avis...), en prenant en compte le problème fondamental : comparer les résultats du système à ceux d'un groupe d'évaluateurs.

- Recueil et analyse des conclusions : c'est une analyse statistique qui suppose un nombre suffisant de mesures. Si pour chaque type de cas traité, on considère qu'un traitement statistique valide implique une ou plusieurs dizaines de cas différents, on voit que la constitution de jeux d'essais constitue un travail considérable. le traitement statistique comparera entre le système expert réalisé et les différents évaluateurs, c'est-à-dire les experts (entre eux et avec le système expert) et les non experts (avec les experts et avec le système expert).

IV.13- CONCLUSION :

Le prototype de système expert pour l'aide au diagnostic des problèmes de dysfonctionnement de la station de traitement des eaux de Boudouaou baptisé SEXTÉAU a été réalisé en utilisant le générateur de système expert GURU. Le plus grand travail fût l'extraction et la collecte des connaissances, en utilisant différentes techniques d'acquisition des connaissances. Cependant, la nouveauté de ce domaine dans les stations de traitement des eaux algériennes, et le manque de moyens pour la formation et l'instruction des experts sur cette technique n'a pas permis l'adhésion totale des experts à cette étude. Le prototype réalisé est à son niveau initial; une validation par plusieurs experts est nécessaire pour affirmer son efficacité. Néanmoins, il nous a permis d'introduire une nouvelle technique dans le domaine de traitement des eaux en Algérie, et de confirmer son applicabilité et sa faisabilité.

Un enrichissement de la base de connaissance en utilisant une connaissance extraite auprès d'un groupe d'experts, instruit et formé sur la technologie des systèmes experts, pourrait permettre d'inventorier toutes les causes possibles d'un dysfonctionnement.

Une évaluation réelle des facteurs de certitudes permettrait d'améliorer notablement le niveau de la base de connaissance.

Dans le but d'encourager les entreprises de traitements des eaux algériennes à développer leurs propres systèmes, nous avons proposé une esquisse de méthodologie de développement d'un système expert opérationnel en traitement des eaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Le travail que nous avons présenté nous a permis d'aborder un domaine des plus pertinents, à savoir l'intelligence artificielle, à travers l'une de ses applications les plus prometteuses dans le domaine du traitement des eaux : les systèmes experts. Ainsi, nous avons tenté d'introduire, et pour la première fois en Algérie cette technologie au moment même où le problème de la disponibilité et de la qualité de l'eau se pose avec acuité.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons mis en évidence l'intérêt et l'apport des systèmes experts dans l'exploitation des stations de traitement des eaux potables. Dans cette optique, et afin de mieux situer notre travail, on est parti du constat avéré qu'il est actuellement admis que la réalisation d'un système expert générique est impossible. La technologie des systèmes experts est de ce fait, une technique d'entreprise. Ainsi, nous avons réalisé un prototype de système expert pour l'aide à l'exploitation de la station de BOUDOUAOU, baptisé SEXTEAU. Nous avons accentué nos efforts sur la construction du noyau du système visé qui est la base de connaissance de diagnostic des problèmes liés à l'exploitation de cette usine, en utilisant un générateur de système expert : le GURU :

Dans le cadre de ce travail, nous avons réalisé un prototype de système expert, le SEXTEAU, ce système expert est à son niveau initial. Cependant il nous a permis de confirmer l'utilité et la pertinence de la technologie des systèmes experts dans le domaine de traitement de l'eau en particulier et du génie de l'environnement en général, et de mettre en évidence le potentiel offert par les systèmes experts dans l'industrie de l'eau.

En partant toujours du constat qu'un système expert générique dans le domaine de l'eau n'existe pas, et que chaque entreprise désirent recourir à la technologie des systèmes experts se doit de réaliser son propre système. nous proposons une esquisse de méthodologie de développement d'un système expert opérationnel dans les usines de traitement d'eau potable.

Dans le cadre de cette thèse nous avons pu constater l'importance de l'enjeu du traitement des eaux. À l'heure où l'homme s'interroge sur la qualité de son environnement, et donc bien évidemment de son eau, les normes de qualité de l'eau sont de plus en plus drastiques. Cette attente légitime, du consommateur vis-à-vis des systèmes de distribution engage les industriels de ce secteur dans de nouveaux efforts de recherche en vue d'assurer les

performances de leurs installations. Les systèmes experts semblent être un outil de choix pour pouvoir parvenir à ces fins.

Une suite naturelle de ce travail consiste en l'amélioration de la base actuelle en assurant son enrichissement par une prise de connaissance auprès d'un groupe d'experts formé et sensibilisé sur les systèmes experts. Une connaissance plus vaste incluant les cas rares et extrêmes doit être considérée. Aussi l'utilisation réelle des facteurs de certitudes devra mieux représenter la connaissance des experts et donner de meilleurs résultats. L'utilisation de méta-règles permettra une plus grande flexibilité de la base de connaissance.

Ceci dit, l'utilisation d'une version récente et de ce fait plus performante de générateur de système expert faciliterait l'étape d'implémentation, et permet une plus grande flexibilité du système.

Aussi l'utilisation simultanée des capteurs avec les systèmes experts permet de détecter les problèmes et de ce fait les résoudre plus rapidement.

Le développement d'un système expert qui proposerait l'assistance technique de l'expert lui-même au niveau de la station serait une bonne perspective.

BIBLIOGRAPHIE

Abderaouf Ahmed S., Ragheb Tewfik S., Ahmed Talaât A., *Development and verification of a decision support system for the selection of optimum water reuse schemes, Desalination, Vol. 152, pp339-352, 2002.*

Allen L., *the cost of an expert, computer world, Vol 20, N ° 29, pp59-68, 1986.*

ACT réseau environnement canadien [R .E. C], *guide de conception des installations de production d'eau potable, présenté au ministère de l'environnement du Québec. 21 juin 2001.*

Alliot J. M., Schiex T., *Intelligence artificielle et informatique théorique. Cépadués éditions, Toulouse ,1994.*

Allot P., Coppens C., *Utilisation de connaissances métiers dans les outils d'aide a la conception ;mise en œuvre chez PSA, In revue des arts et métiers, 2000.*

Alquiart A. M., Tignal M. H., *management des connaissances et management par projet, In Charlet J., Zacklad M., Kassel G., Baurignault D., Ingénierie des connaissances, évolutions récentes et nouveaux défis, Eyrolles éditions, 2000.*

Alty J. L., et Coombs M. J., *Systèmes experts : concepts et exemples. Edition Masson, 1986.*

Anguel F., Sellami M., *Un système de gestion des connaissances pour l'aide au diagnostic de pannes dans un système industriel, 1st North African Region seminar on engineering and technology education, Algiers, Algeria, 23-25 septembre2003.*

Aroua S., *Etude de la coagulation floculation par de nouveaux coagulants sur les eaux de surface, thèse de magister, ENP, Alger, 1993.*

Anselme C., Davagnier M., Bordet J. P., *Système expert d'aide au diagnostic pour la résolution des problèmes de goûts et odeurs indésirables dans l'eau potable, conférence spécialisée « organic micropollutants »Barcelone, 19-22 septembre, 1989.*

Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux [aghtm], *Vade-mecum du chef de l'usine de traitement des eaux destinée à la consommation, Lavoisier tech.doc, 1987.*

Beck M. B., Lumbers J. P., Mackenzie H. E. C., Jowitt P. W., *un prototype de système expert pour le contrôle d'un procédé à boues activées, sciences et techniques de l'eau, N°2, Vol.23, pp161-167, 1989.*

Benabdelouaheb D., *Développement d'un système expert pour le marketing des produits nouveaux, thèse de magister, génie industriel, ENP, Alger, 1992.*

Benchimol G., Levine P., et Pomerol J. Ch., *Les systèmes experts dans l'entreprise. 3^{ème} édition, Hermes, 1990.*

Berthouex O. M., Lai M., et Darjatmoko., *A statistic-based information and expert system for plant control and improvement. Dans Proceedings of the 5th National conference on Microcomputers .in Civil Engineering .Orlando ,4 au 6 novembre 1987 .Editeur : W.E.Carrol University of Central Florida College of Engineering, Colege of Extended Studies and American Society of Civil Engineereers, Orlando, pp146-150.*

Beutler E. , Legrand Ph., *Les systèmes experts dans les stations de traitement d'eaux usées, L'eau, l'industrie, les nuisances. N°132, novembre1989.*

Bonnet A., *L'intelligence artificielle : Promesses et réalités. Inter-éditions, 1984.*

Bonnet A., Truong-Ngoc J. M., *Systèmes experts -vers la maîtrise technique .Edition Inter Editions, 1986.*

Châtain N., *Introduction aux systèmes experts, C.I.R.I.L.L.E, AFCET, Lyon, ppI-1, I-26, 1988.*

Cohn L. T., Harris R., et Bowlby W., *Knowledge acquisition for domain experts. Journal of Computing in Civil Engineering2 (2):107-120.1988*

Collins A. G., *The potential for expert systems in water utility operation and management, management and operations, journal AWWA, septembre1990.*

Cres F. N., *Contribution des systèmes a bases de connaissances en sciences de l'eau. Promise : un simulateur de projet ; Moise : un système de diagnostic en assainissement autonome, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des mines, Paris, 1989.*

Davagnier M., Anselme C., Duguet J. P., Bordet J. P., Malleviale J., *Système expert d'aide au diagnostic pour la résolution de problèmes de goûts et odeurs indésirables dans l'eau potable, premières journées internationales –Application de l'intelligence artificielle à l'agriculture, l'agrochimie et aux industries agro-alimentaire, Caen29-30 septembre1988.*

Degremont, *Mémento technique de l'eau, Tec et Doc. – Paris, 1989.*

Denis F., *cours d'intelligence artificielle. Systèmes experts. <http://WWW.grappalille3.fr/polys/se/index.html>.*

Dominé C-H., *Technique de l'intelligence artificielle -un guide structuré .Edition DUNOD, Paris, 1988.*

Dupuis S. L., *Les systèmes experts dans le champ de l'intelligence artificielle. L'entreprise logistique, ns5 Hivers 1988/1989.*

Ernst CH., *Introduction aux systèmes experts de gestion, Eyrolles, 1985.*

Farreny H., *Les systèmes experts, principes et exemples. Cépadués éditions, Toulouse, 1985.*

Feigenbaum E., *La cinquième génération, Inter - édition, 1984.*

Forsyth R., *Expert systems, principles and case studies. Chapman and Hall, London, 1984.*

Fredouet C.H., *le diagnostic d'entreprise : la solution système expert*, Institut de Gestion de Rennes, 1989.

Gagnon J., Serodes J. B., *SEXTANG : système expert d'aide à l'exploitation des stations d'épuration par étangs aérés facultatifs*, conseil national de recherches Canada, réimpression de la revue canadienne de génie civil, vol.20 ,N°3, pp500-508, 1993.

Gall R. A. B., et Patry G. G., *Knowledge-based system for the diagnosis of an activated sludge plant*. Dans *Dynamics modelling and expert systems in wastewater engineering*. Editeurs: G.G. Patry et D. Chapman. Lewis, Chelsea, PP193-240, 1989.

Gatel D., *Examen de diverses techniques de désinfection en eau potable*, T.S.M- l'eau, France, P489, 1996.

Gevarter W.B., *the nature and evaluation of commercial Expert System building tools, computer, may 1987*.

Godard D., Loubeyre R., *Application de l'intelligence artificielle- exemple d'utilisation de système expert à la lyonnaise des eaux- gestion de l'exhaure dans l'usine de Morsang -sur seine, rapport de la lyonnaise des eaux, 1988*.

Godard H., *eaux de distribution*, *Techniques de l'Ingénieur*, C51 98-C5 199- C5 200-C5 201, 1997.

Gomella C., Guerree H., *Le traitement des eaux publiques. Industrielles et privées*. Eyrolles, Paris, 1978.

Gondran M., *Introduction aux systèmes experts*. Eyrolles, 1986.

Gross J. L., *Extraction des connaissances*. C.I.R.T.I.L.L.E., AFCET, Lyon, 1988.

Grundstein M., *La capitalisation des connaissances de l'entreprise, système de production de connaissances, in apprenante et les sciences de la complexité*. Aix en Provence, 1995.

Hayes-Roth, F. et al., *Building expert systems*. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA, 1983

Holsapple C. W., Whinston A. B., *GURU : l'utilisation des systèmes experts dans l'entreprise*. Les éditions d'organisation, 1987.

Journal officiel n° 57, Norme Algérienne, première édition du 20/08/1992.

4^e Journée internationale d'Etude Maison-Laffite [J. I. M. L], *Systèmes experts et métiers de l'eau*, T. S. M. -L'EAU, Mars 1987.

Kasdi-Djouadi, *Etude des techniques de l'IA. Application à la réalisation d'un système expert de reconnaissance de la parole continue*. Thèse de magister en génie électrique ENP, Alger 1997.

Kayser D., *Examen de diverses méthodes utilisées en représentation des connaissances*, E. R. 17, Laboratoire de recherche en informatique, Paris, 1984/1985.

Kelleher J., *watch the rabbits, computer world*, Vol. 21, N°47, pp: s9-s11, 1987.

Kettab, A., *Traitement des eaux, tome1 : les eaux potables*, Ecole Nationale Polytechnique, 1992.

Kidd A., *Knowledge acquisition for expert systems: A practical handbook*. Plenum Press, New York.

Ladiges G., Kayser R., *Applied off line expert system for effluent, operational and technical problems of waste water treatment plant, water science and technology*, N°2, Vol.30, pp157-164, 1994.

Ladiges G., Mennerick A., *Application and experience with expert systems for the operation of wastewater treatment plants. Water science and technology*, 1996, Vol. 33, N° 12, pp 265-268.

Laurière J. L., *représentation et utilisation des connaissances*, TSI, Vol 1, N°1 et 2, DUNOD, 1982.

Lep B., *Dossier l'intelligence artificielle, PC informatique*, N° 1, pp 103-104, Mars 1990.

Levy, P., *L'intelligence artificielle .Dans le nouvel état du monde. Bilan de la decennie1980-1990*. Editeur : S.Cordellier. Editions du Boréal, Paris, pp.252-254, 1990.

Martin P., *La méthodologie d'acquisition des connaissances KADS et les explications*, rapport INRIA N°2179, janvier 1994.

Nakache F., *Elimination des micro-organismes pendant la clarification d'une eau destinée à la potabilisation*, T.S.M.- L'eau, France, 1995.

Niar-dinedane W., *L'intelligence artificielle—éléments de base*. Office des publications universitaires, 1995.

Nibouche F., *Développement d'un système expert pour le choix d'une méthode de prévision de gestion*. Thèse de magister G. Indus, 95-96.

Nix S. J., al., *Can expert systems be effective aids in water treatment plant operation*, AWWA Computer speciality conf., Denver, Colorado, 1989.

Nix S. J., Collins A. G., *Expert systems in water treatment plant operation management and operations*, journal AWWA, février 1991.

Nix S. J., Collins A. G., Tsay T., *Knowledge-based expert systems in water utility operation and management*, prepared for: AWWA research foundation, decembre 1989.

Ortolano L., Perman C.D., *software for expert systems development*, journal of computing in civil engineering, Vol1, N° 4, pp2256240, 1987.

Santoni A., Sobral R., Fontaine P., Brodard E., *Les systèmes experts : nouveaux outils pour les traiteurs d'eau, wat. supply, Vol. 6, pp181-188, 1988.*

Seys M., Duran M., Suivitz, M., INTELEAU : *système expert pour l'aide au traitement de l'eau chaude sanitaire, L'eau, l'industrie, les nuisances. N°125, février1989.*

Tali-maamar D., *Développement d'un système expert d'aide au diagnostic industriel SADI, thèse de magister en génie industrielle, ENP, Alger, 1992.*

Tassone J., *Ophélie : le premier système expert de pilotage d'une usine de traitement d'eau, L'eau, l'industrie, les nuisances. N°105, novembre1986.*

Valiron F., *Gestion des eaux - automatisation –informatisation –télégestion. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1988.*

Voyer R., *Séminaire de formation en IA : les systèmes experts. ACT informatique, 1985.*

Wable O., Brodard E., Duguet J. P., Malleval J., Roustan M., *Un système expert pour la conception et le dimensionnement des réacteurs d'ozonation utilisés dans le traitement des eaux, L'eau,l'industrie, les nuisances, N° 136, Avril 1990.*

Welbank M., *A review of knowledge acquisition techniques for expert systems. British telecom research laboratories, Martlesham Heath, Ipswich, UK, 1985.*

Wolfgram, D. D. et al., *expert systems for the technical professional. John Wiley and sons, New York, 1987.*

Yang C. T., Kao J. J., *An expert system for selecting and sequencing wastewater treatment processes. Water science and technology, 1996, Vol. 34, N° 3-4, pp 347-353.*

Zhu X. X., Simpson. A. R., *Expert system for water treatment plant operation, Journal of environmental engineering, septembre1996, Vol. 122, N° 9, pp 822-829.*

Zhu X. X., Simpson A. R., *An expert system for turbidity control advice in water treatment plant operation, Research Report, N°R92 (parts1and2), department of civil engineering., The Univ. of Adelaide, South Australia, 1992.*

ANNEXE 1 : Caractéristiques essentielles de l'intelligence naturelle et de l'intelligence artificielle.

Caractéristiques essentielles	Intelligence Naturelle	Intelligence Artificielle
Mémoire	Les faits et connaissances ne sont pas toujours disponibles au moment nécessaire	La mémoire est fiable, mais elle ne concerne que ce qui a été introduit ou déduit par le logiciel
Raisonnement	L'individu moyen raisonne mal en général. Le spécialiste sait beaucoup dans un domaine étroit. La qualité moyenne des raisonnements dans une entreprise est défectueuse	Elle peut utiliser les raisonnements des meilleurs cerveaux et les connaissances des meilleurs experts. Elle accroît la qualité moyenne des raisonnements dans l'entreprise. Elle interpelle les cerveaux les mieux charpentés
Imagination	L'imagination de l'homme n'a pas de limites	Elle peut faire des rapprochements inattendus pour accroître la créativité de l'homme
Réaction devant le fait inconnu	Elle cherche néanmoins des solutions, incitée ou gênée par le psychisme de l'individu	Elle se débrouille avec ce qu'elle sait ou ce qu'elle déduit. Elle commet plus d'erreurs que le spécialiste de haut niveau
Permanence et fiabilité	Ephémère et dont la fiabilité dépend du psychisme de l'individu	Durable et fiable
Jugement	Le jugement d'une équipe efficace est normalement d'une qualité qu'aucun logiciel ne peut atteindre. Mais dans la pratique, on parvient rarement à cet idéal	Elle peut établir un jugement sur un ou plus grand nombre de données que l'homme dont la mémoire accessible est limitée dans un temps raisonnable
Transmissibilité des raisonnements et des déductions	L'individu transmet mal et difficilement ses connaissances d'où une difficulté pour construire les systèmes experts	Duplication sans problème : utilisation des connaissances sans difficulté dans le temps et dans l'espace
Volonté d'agir	L'homme seul a la volonté	Reste un outil à disposition de l'homme
Conscience de son état	L'homme seul est doté de conscience	L'outil n'a pas de conscience
Coût pour aboutir à la conclusion	Généralement élevé si elle est de qualité	Chère si elle peu utilisée. Bon marché si elle est employée

ANNEXE 2 : Les fonctions de GURU

1-Le gestionnaire de bases de règles de GURU :

Le gestionnaire de bases de règles de GURU est un logiciel pour construire, entretenir et compiler des bases de règles.

La construction d'une base de règles consiste à énoncer les règles et les métarègles.

GURU dispose de deux façons pour construire une base de règles soit avec le traitement de texte (commande TEXT), soit à l'aide d'un menu interactive t (commande TEXT), soit à l'aide d'un menu interactif (commande BUILD). Une fois la base écrite, elle peut être compilée à l'aide de la commande COMPILE.

TEXT<nom de fichier .rss>

Commande pour créer ou modifier une base de règles avec le traitement de texte.

BUILD Commande d'appel du menu de GURU pour la création, la modification et la compilation d'une base de règles.

COMPILE<nom de fichier .rss>

Commande de compilation de la base de règles.

2-Forme générale d'une règle :

RULE : nom de la règle

READY : actions à exécuter avant le test de la prémisse.

IF : prémisse

THEN : conclusion

NEEDS : variables de la prémisse dans l'ordre d'utilité.

CHANGES : variables changées par application de la règle

REASON : explication de la règle

La prémisse d'une règle utilise :

- des variables de travail ;
- des zones d'une table de données ;
- des cellules d'un tableur ;
- des variables utilitaires (par exemple pour le calcul des statistiques) ;
- des variables d'environnement ;
- des fonctions numériques relationnelles et logiques.

La conclusion contient l'ensemble des actions que GURU peut exécuter lorsque la prémisse est vraie.

Ces actions sont :

- la déduction de la valeur d'une variable ;
- l'exécution des commandes du système d'exploitation ;
- utilisation des tableurs ;
- traitement des bases de données ;
- exécution des procédures GURU.

3-Consultation d'une base de règles :

Le moteur de GURU peut être invoqué en chaînage avant ou en chaînage arrière pour tester une variable, déclencher une règle, ou exécuter une séquence de règles. Les commandes permettant ces consultations sont :

CONSULT<base de règles>

Consulter une base de règle en chaînage arrière.

CONSULT<base de règles> TO SEEK<variable>

Consulter une base de règle en chaînage arrière pour chercher la valeur de la variable<variable>

CONSULT<base de règles> TO TEST<variable>

Consulter une base de règle en chaînage avant pour tester l'effet de la variable<variable>

CONSULT<base de règles> TO FIRE<règle>

Consulter une base de règle pour déclencher la règle <règle>

CONSULT<base de règles> TO EXECUTE<ensemble de règles>

Consulter une base de règle pour exécuter une séquence de règles.

ANNEXE 3 : La logique stricte et la logique flou.

1-La logique stricte et la théorie des probabilités :

La logique des probabilités repose sur les deux valeurs de vérité d'une proposition à savoir vrai/faux.

Donc une proposition ne peut être que complètement vrai ou complètement fausse, ceci implique une contrainte inélastique.

Dans ce cas, si la probabilité qu'un événement se produise est égale à P ($P \in [0, 1]$), alors la probabilité que l'événement contraire se produise est égale à 1-P (probabilité complémentaire).

En général, pour un ensemble de n événements probables de probabilité P_i , cela implique donc que :

$$\sum P_i = 1 \quad i \text{ appartenant à l'ensemble des événements.}$$

Cette théorie induit un paradoxe sur l'ignorance totale due à cette contrainte stricte [DUB, 1986].

Si $n=2$, alors $\text{non}(P_1) = 1-P = 1/2$ (en supposant les événements équiprobables).

Si $n=3$, alors $\text{non}(P_1) = 1-P = 2/3$

La probabilité que P_1 ne se produise pas dépend donc des événements énumérés.

2-La logique floue :

La théorie de la logique floue a été établie par le professeur L. A. Zadeh en 1965 en vue de prendre en compte le raisonnement approximatif.

Cette théorie a conduit à la théorie des sous-ensembles flous, théorie qui a permis de faire entrer la qualitatif dans les machines informatiques.

Contrairement à la logique stricte, la logique floue accepte des propositions ayant des valeurs de vérité graduellement variables entre le vrai et le faux. Dans ce cas, un facteur de certitude est associé à la proposition, indiquant à quel point celle-ci est vraie.

$\sum P_i \geq 1$, on cherche le vrai qui reste dans le faux. Et donc la somme des P_i peut être supérieure à 1 et donc exploiter ce qui se trouve entre 0 et 1.

Les inférences à partir des connaissances floues nous permettent de nous rapprocher d'avantage du raisonnement humain qui peut être difficilement modélisé.

Dans le domaine où les faits ou les règles traitées sont entachées d'incertitude, l'utilisation de facteurs de certitude apporte une solution acceptable pour la représentation du raisonnement approximatif.

Combinaison des facteurs de certitude :

Lors d'un raisonnement mené sur une base de connaissance dont les faits ou les règles comportent des facteurs de certitude, le moteur d'inférence doit propager cette incertitude le long du raisonnement en combinant les facteurs de certitude des connaissances traitées par des algèbres de facteurs de certitudes inspirés du mode de raisonnement de l'expert du domaine.

Ces algèbres définissent des formules de calcul de :

La certitude d'une prémisse constituée de faits incertains reliés par les opérateurs « et » ou « ou ».

La certitude de la conclusion d'une règle incertaine à prémisse incertaine.

La certitude d'une variable déduite par plusieurs règles incertaines.