

| | |
|-------------------|---|
| Titre: | Gestion de la qualité des connaissances appliquée à l'informatisation du processus d'identification des impacts environnementaux |
| Auteur: | Annie Rochette |
| Date: | 1997 |
| Type: | Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis |
| Référence: | Rochette, A. (1997). Gestion de la qualité des connaissances appliquée à l'informatisation du processus d'identification des impacts environnementaux [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/6737/ |

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6737/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Claude Marche, & Benoît Robert
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

GESTION DE LA QUALITÉ DES CONNAISSANCES
APPLIQUÉE À L'INFORMATISATION DU PROCESSUS
D'IDENTIFICATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

ANNIE ROCHETTE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

JUIN 1997



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-33183-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

GESTION DE LA QUALITÉ DES CONNAISSANCES
APPLIQUÉE À L'INFORMATISATION DU PROCESSUS
D'IDENTIFICATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

présenté par: ROCHETTE Annie
en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. DELISLE Claude E., Ph.D., président
M. MARCHE Claude, D.Sc.A., membre et directeur de recherche
M. ROBERT Benoît, Ph.D., membre et codirecteur de recherche
M. THERRIEN Francis, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier M. Claude Marche, directeur de recherche et, particulièrement, M. Benoît Robert, codirecteur de recherche, pour son excellente supervision, sa grande disponibilité, ses nombreux encouragements tout au long de ce projet ainsi que son soutien financier.

Je tiens également à remercier les étudiants et les techniciens de la section d'hydraulique pour leur amitié, leurs conseils judicieux et leur support de tous les instants.

Enfin, merci à M. René Kahawita, professeur à la section d'hydraulique, pour la traduction du résumé de ce mémoire.

RÉSUMÉ

La réhabilitation des centrales hydroélectriques construites en régions urbaines au début du siècle est une des préoccupations actuelles de leurs gestionnaires. Les activités menées lors des travaux de réfection constituent une source potentielle de répercussions importantes sur le milieu naturel.

Afin d'optimiser le processus d'évaluation de ces impacts, il est nécessaire d'assimiler les préoccupations environnementales à toutes les phases d'un projet. Cependant, la difficulté de réunir les experts de tous les domaines concernés représente un obstacle majeur à l'efficacité de la démarche. Un système informatique d'aide à la décision, en rassemblant les connaissances issues des diverses expertises, tant au plan environnemental que technique, constitue alors un outil des plus intéressants.

Le système proposé dans le cadre de ce projet a été développé dans cette optique en intégrant les notions issues d'expertises diversifiées. Les différentes composantes des études sont ainsi constamment mises en relation et sont considérées simultanément par le système.

Pour fournir une analyse réaliste de la situation étudiée, un tel outil doit également simuler le raisonnement suivi par les experts, soit les ingénieurs de projet et les praticiens de l'évaluation environnementale, et tenir compte des contraintes auxquelles ils sont confrontés. Ils ont, entre autres, à composer avec des données incomplètes et plus ou moins fiables. Un système d'aide à la décision doit donc considérer l'incertitude inhérente aux données utilisées et inclure des mécanismes de gestion de cette incertitude.

Une méthode innovatrice de gestion de la qualité des connaissances constitue ainsi le cœur du système informatique. La méthode proposée s'adapte à la problématique de l'évaluation environnementale en ce qu'elle repose sur des principes pragmatiques, pour la plupart qualitatifs, et qu'elle intègre les notions de sensibilité et d'importance relative des connaissances considérées.

Un tel système doit également être évolutif, c'est-à-dire permettre l'acquisition progressive de connaissances au fur et à mesure de l'avancement des projets. Il peut alors être utilisé dès le début du processus d'évaluation et en suivre les différentes phases. Cela permet, de plus, d'étudier les répercussions de travaux qui n'avaient pas été prévus lors du développement du système et d'adapter ce dernier à un éventail de situations beaucoup plus large que les travaux de réfection de centrales hydroélectriques.

La méthode originale de structuration des connaissances développée contraste donc, par sa grande capacité d'adaptation, avec certaines méthodes conventionnelles, comme l'approche matricielle, relativement rigide et difficilement modifiable. L'approche proposée met en relation de façon dynamique, par des règles incorporées au système, les données disponibles. Les connaissances inférées par l'application de ces règles sont ensuite intégrées aux précédentes, permettant ainsi l'amélioration constante des connaissances avec la progression des études.

ABSTRACT

The rehabilitation of hydroelectric power plants which were constructed in urban regions at the turn of the century is currently of concern to their operators as well as regulatory agencies. Any rehabilitation work involving renewal of the concrete structure and associated headworks may have significant repercussions on the ecology of the surrounding environment.

In order to optimize the assessment process, it is necessary to incorporate any environmental concerns during all phases of such a project. However, a major obstacle to an efficient realization of this process is the difficulty, if not the impossibility, of assembling a team of experts who are specialists in the various disciplines required. A knowledge-based decision making computer-installed system, capable of incorporating the expertise of various specialists relevant to the technical as well as environmental constraints of the project would constitute a powerful tool in the hands of the personnel involved.

The system developed during the course of this project was designed to incorporate the ideas proposed above, so that the different considerations that arise during the preliminary evaluation of a rehabilitation project are addressed on an ongoing basis.

In order to provide a realistic analysis of a particular situation under study, the tool developed should simulate the reasoning followed by the experts such as the project engineers and the environmental assessment professionals while simultaneously satisfying any imposed constraints. Frequently, decisions have to be taken based on an incomplete and/or doubtful database. The knowledge based system should therefore be

able to account for the inherent incertitude in the data while possessing a "built-in" capability to manage this database.

Thus an innovative method for the efficient implementation of a quality appraisal technique applied to an incompletely validated database constitutes the core of the computer based system. The proposed method, being based on pragmatic and, for the most part, qualitative principles dealing with knowledge relative importance and sensitivity, suits well to environmental assessment problematics.

Another requirement for the system should also be its "learning ability" so that "knowledge acquisition" occurs as the project advances. It may therefore be used at the beginning of the evaluation process while it then subsequently tracks the different phases of the project. This would allow the system to evaluate the repercussions of any initially unanticipated work during its development and allow it to adapt to a plethora of situations other than those that just deal with the rehabilitation of hydroelectric power plants.

An original method of structuring knowledge based data has therefore been developed that differs from certain conventional techniques such as the matrix based approach which is characterized by its lack of flexibility and difficulty in modifying the data set. The approach used allows dynamic interaction between the available data due to the set of rules incorporated in the system. The knowledge inferred from the application of these rules is subsequently integrated with the previously acquired knowledge thereby permitting a constant evolution of acquired knowledge as the study progresses.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|------|
| REMERCIEMENTS | iv |
| RÉSUMÉ..... | v |
| ABSTRACT | vii |
| TABLE DES MATIÈRES | ix |
| LISTE DES TABLEAUX..... | xiii |
| LISTE DES FIGURES | xiv |
| LISTE DES ANNEXES | xv |
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1: CONTEXTE DU PROJET..... | 6 |
| 1.1 Une première approche..... | 6 |
| 1.2 Une nouvelle approche | 8 |
| 1.2.1 Hypothèses de base..... | 8 |
| 1.2.2 Méthode préconisée pour la structure de raisonnement | 11 |
| 1.2.3 Méthode préconisée pour la gestion de la qualité des connaissances | 13 |
| 1.2.4 Limites du projet | 14 |
| 1.2.4.1 Étapes du raisonnement des experts | 14 |
| 1.2.4.2 Domaines d'expertise intégrés..... | 15 |
| 1.2.4.3 Validation du système | 15 |
| CHAPITRE 2: MÉTHODE..... | 17 |
| Introduction | 17 |
| 2.1 Étude du raisonnement des experts..... | 17 |
| 2.1.1 Identification des données..... | 18 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.2 Évaluation de la qualité des données | 18 |
| 2.1.3 Sélection et application de règles d'expertise..... | 19 |
| 2.1.4 Évaluation de la qualité des règles..... | 21 |
| 2.1.5 Évaluation de la qualité des résultats..... | 22 |
| 2.2 Nouvelle structure de raisonnement | 22 |
| 2.3 Structuration des connaissances..... | 25 |
| 2.3.1 Établissement de la base de données..... | 25 |
| 2.3.2 Structuration des règles d'expertise | 26 |
| 2.3.2.1 Principales parties d'une règle: la conclusion et les conditions d'application | 26 |
| 2.3.2.2 Exemple de règle | 27 |
| 2.3.2.3 Définition des différents types de conditions..... | 29 |
| 2.3.2.4 Cas particulier: les règles numériques | 32 |
| 2.3.2.5 Fiabilité des règles..... | 33 |
| 2.4 Validation d'une répercussion potentielle identifiée | 34 |
| 2.4.1 Sélection d'une règle d'expertise..... | 34 |
| 2.4.2 Application de la règle sélectionnée..... | 35 |
| 2.4.3 Évaluation de la fiabilité de la validation..... | 37 |
| 2.4.3.1 Gestion de la fiabilité des composantes des règles numériques | 40 |
| 2.4.3.2 Gestion de la fiabilité des composantes des règles qualitatives | 42 |
| 2.4.3.3 Détermination de la fiabilité des réponses | 45 |
| CHAPITRE 3: OUTIL INFORMATIQUE | 46 |
| Introduction | 46 |
| 3.1 Langage adopté | 46 |
| 3.2 Structuration informatique des connaissances | 48 |
| 3.2.1 Règles d'expertise..... | 48 |
| 3.2.2 Données | 48 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3 Fonctionnement du système..... | 49 |
| 3.3.1 Déclaration des actions projetées | 49 |
| 3.3.2 Sélection des règles d'expertise..... | 49 |
| 3.3.3 Vérification des conditions des règles sélectionnées..... | 50 |
| 3.3.4 Évaluation de la fiabilité des réponses obtenues..... | 51 |
| 3.3.5 Indication à l'usager du résultat obtenu de l'étude d'une règle..... | 53 |
| 3.3.6 Intégration à la base de données des conclusions endossées..... | 54 |
| 3.3.7 Validation des répercussions potentielles subséquentes..... | 54 |
| CHAPITRE 4: VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE ET ÉTUDE DE CAS .. | 55 |
| Introduction | 55 |
| 4.1 Validation de la programmation | 55 |
| 4.2 Validation de la gestion de la qualité des connaissances..... | 56 |
| 4.2.1 Méthodologie de validation..... | 56 |
| 4.2.2 Analyse de la validation | 57 |
| 4.2.2.1 Conditions nécessaires | 57 |
| 4.2.2.2 Conditions suffisantes | 58 |
| 4.2.2.3 Fiabilité de la règle | 59 |
| 4.2.3 Conclusions..... | 59 |
| 4.3 Étude de cas types..... | 60 |
| 4.3.1 Première étude: dragage du lit du cours d'eau et nettoyage des fonds...60 | 60 |
| 4.3.1.1 Présentation des données de départ et des résultats | 60 |
| 4.3.1.2 Analyse des résultats..... | 61 |
| 4.3.2 Deuxième étude: déboisement des berges du cours d'eau..... | 60 |
| 4.3.2.1 Présentation des données de départ et des résultats | 62 |
| 4.3.2.2 Analyse des résultats | 63 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3.3 Troisième étude: dragage du lit et déboisement des berges du cours d'eau | 63 |
| 4.3.3.1 Présentation des données de départ et des résultats | 63 |
| 4.3.3.2 Analyse des résultats | 63 |
| 4.3.4 Quatrième étude: influence de la baisse de fiabilité des données de départ | 64 |
| 4.3.4.1 Présentation des données de départ et des résultats | 64 |
| 4.3.4.2 Analyse des résultats | 65 |
| 4.3.5 Conclusions | 65 |
| CHAPITRE 5: ANALYSE ET RECOMMANDATIONS | 66 |
| Introduction | 66 |
| 5.1 Règles d'expertise | 66 |
| 5.2 Évaluation de l'importance des répercussions | 67 |
| 5.3 Critères et mécanismes d'arrêt d'une étude | 69 |
| 5.4 Gestion de la fiabilité des connaissances | 70 |
| 5.5 Caractérisation des travaux envisagés | 71 |
| CONCLUSIONS | 73 |
| BIBLIOGRAPHIE | 76 |
| ANNEXES | 80 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 4.1: Données de départ des études | 105 |
| Tableau 4.2: Répercussions confirmées lors de la première étude (Actions projetées: dragage du lit et nettoyage des fonds du cours d'eau) | 106 |
| Tableau 4.3: Déroulement de l'identification et de la validation des répercussions lors de la première étude | 107 |
| Tableau 4.4: Répercussions confirmées lors de la deuxième étude (Actions projetées: déboisement des berges du cours d'eau)..... | 108 |
| Tableau 4.5: Déroulement de l'identification et de la validation des répercussions lors de la deuxième étude | 109 |
| Tableau 4.6: Répercussions confirmées lors de la troisième étude (Actions projetées: dragage du lit et déboisement des berges du cours d'eau)..... | 110 |
| Tableau 4.7: Déroulement de l'identification et de la validation des répercussions lors de la troisième étude | 111 |
| Tableau 4.8: Répercussions confirmées lors de la quatrième étude (Actions projetées: dragage du lit, nettoyage des fonds et déboisement des berges) | 112 |
| Tableau 4.9: Déroulement de l'identification et de la validation des répercussions lors de la quatrième étude | 113 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 2.1: Principales étapes du raisonnement des experts..... | 85 |
| Figure 2.2: Nouvelle structure de raisonnement | 86 |
| Figure 2.3: Exemple de la décomposition des travaux en actions élémentaires et identification de leurs répercussions directes..... | 87 |
| Figure 2.4: Validation d'une répercussion potentielle..... | 88 |
| Figure 2.5: Application d'une règle | 89 |
| Figure 2.6: Vérification d'une condition | 90 |
| Figure 2.7: Gestion globale de la fiabilité | 91 |
| Figure 2.8: Gestion de la fiabilité des règles numériques | 92 |
| Figure 2.9: Gestion de la fiabilité des règles qualitatives contenant des conditions Nécessaires | 93 |
| Figure 2.10: Gestion de la fiabilité des règles qualitatives contenant des conditions Suffisantes | 94 |
| Figure 3.1: Structure informatique d'une règle d'expertise..... | 95 |
| Figure 3.2: Transcription d'un écran de saisie des données | 96 |
| Figure 3.3: Transcription de l'envoi, à l'écran, d'un message à l'usager | 97 |

LISTE DES ANNEXES

| | |
|--|-----|
| Annexe I: Lexique..... | 80 |
| Annexe II: Regroupement des figures..... | 84 |
| Annexe III: Règles de gestion de la fiabilité des connaissances..... | 98 |
| Annexe IV: Données et résultats des études de cas..... | 104 |
| Annexe V: Liste des règles d'expertise | 114 |

INTRODUCTION

Les centrales hydroélectriques aménagées au début du siècle en milieu urbain et périurbain requièrent d'importants travaux de réhabilitation (Podesto, 1993). La réfection de ces centrales est nécessaire pour améliorer leur productivité et leur fiabilité ainsi que pour diminuer les coûts d'opération. L'augmentation de la capacité de production permet de rentabiliser les sommes investies pour les activités de réfection (Rittenhouse, 1986).

Les répercussions que ces travaux engendrent sur l'environnement peuvent affecter différentes composantes du milieu naturel et, dans une moindre mesure toutefois, du milieu humain. Elles doivent être identifiées, évaluées et, si possible, évitées ou, du moins, atténuées par des mesures de mitigation. Des activités d'évaluation des incidences environnementales doivent donc être menées, préalablement à l'exécution des travaux, dans le cadre des projets de réfection.

L'évaluation environnementale de projets est un processus multidisciplinaire qui fait intervenir les composantes de nombreux domaines très variés. Dans le cas de travaux de réfection de centrales hydroélectriques, mentionnons, en ce qui concerne le milieu biophysique: le régime hydraulique, le régime sédimentologique, la qualité de l'eau, la présence de communautés animales et végétales aquatiques et riveraines, leurs conditions de survie et de reproduction, leurs habitats, etc. (Podesto, 1993).

La considération de cette pluralité d'éléments constitue un défi considérable pour les praticiens de l'évaluation environnementale. D'une part, une expertise particulière est requise pour chacun de ces domaines mais, en même temps, puisqu'ils sont tous

interreliés, une analyse d'ensemble est essentielle pour comprendre le fonctionnement global des écosystèmes touchés.

En effet, une perturbation du régime hydraulique, par exemple, peut entraîner la mise en suspension de sédiments qui, en se redéposant, peuvent colmater des frayères et, par conséquent, affecter les communautés ichtyennes (Robert et Podesto, 1995). Il est donc primordial de considérer les effets indirects et cumulatifs des travaux menés sur le site d'une centrale en réfection.

D'autre part, les grandes entreprises sont de plus en plus conscientes de la nécessité d'inclure les préoccupations environnementales à la planification de leur développement. Dans la nouvelle structure organisationnelle de plusieurs de ces sociétés multidisciplinaires, les activités d'évaluation environnementale sont d'ailleurs directement intégrées aux départements techniques.

Cette approche favorise une évaluation mieux adaptée aux différents projets mais exige une répartition des expertises dans chacun des départements. Il devient alors difficile de réunir simultanément tous les spécialistes requis et d'établir une bonne communication entre eux (Podesto, 1993). Il en résulte des études incomplètes, parcellisées, dans lesquelles certains enjeux importants sont négligés et, souvent, en réaction à des décisions déjà arrêtées. Il est alors nécessaire de procéder, plus tard, à de nouvelles études, ce qui entraîne des délais et des coûts supplémentaires dans la réalisation des projets (Jacobs, 1993).

La résolution de ces difficultés nécessite une nouvelle approche plus intégrée des connaissances qui permettrait de considérer les interactions entre les éléments à étudier. Dans cette optique, un système informatique d'aide à la décision apparaît comme un outil des plus intéressants.

Un tel système permet, en effet, de regrouper les connaissances des divers domaines d'expertise concernés (Rochon, 1993), tant du point de vue technique qu'environnemental, et d'assimiler les préoccupations environnementales tout au long des projets. Cela favorise également une meilleure concertation entre les intervenants. Dans le cadre d'un premier projet de maîtrise, un système informatisé procédant à l'identification et à une évaluation sommaire des répercussions environnementales appréhendées a été conçu (Podesto, 1993).

Au cours de ce projet, les activités de réfection à effectuer ont été répertoriées et divisées en grandes classes de travaux. Les impacts potentiels ont été identifiés puis évalués en termes de qualité, d'intensité et de durée. Les connaissances ainsi acquises ont ensuite été structurées sous forme de matrices environnementales qui relient les diverses actions projetées aux composantes du milieu qu'elles affectent. Ces matrices ont alors été intégrées au programme informatique.

Le système ainsi développé permet l'identification rapide des impacts potentiels des activités de réfection. Cependant, en raison de la forme retenue pour la structuration des connaissances, le système manque de transparence et de souplesse. En effet, l'approche matricielle ne permet pas de mettre en évidence le réseau de relations intermédiaires résultant du raisonnement des experts et s'adapte difficilement à un milieu naturel spécifique et à de nouvelles situations, par exemple, des travaux imprévus.

Le projet actuel vise donc à développer un nouvel outil informatique, basé sur les connaissances acquises lors du premier projet, qui soit plus transparent et plus souple, qui rende possible l'acquisition de connaissances tout au long des études et qui procède à l'évaluation et à la gestion de la qualité des connaissances.

Pour atteindre ces principaux objectifs, le système doit, par son fonctionnement, simuler les grandes étapes du raisonnement suivi par les experts de l'évaluation environnementale. Il nous faut, ainsi, (1) procéder à la caractérisation d'un projet type envisagé, soit des travaux qu'il implique et du milieu affecté, (2) développer les mécanismes d'identification et d'évaluation des répercussions par l'application de règles qui représentent les phénomènes susceptibles d'être modifiés ou déclenchés par les interventions, (3) élaborer une méthode d'analyse de la qualité des résultats à partir de l'état des connaissances disponibles et (4) rendre disponibles, pour la suite de l'étude, les résultats intermédiaires ainsi validés.

Les objectifs particuliers du projet sont donc de développer, pour le système, un module de caractérisation des projets étudiés qui procède à l'acquisition des données disponibles, un module de sélection des règles de connaissance à partir de la caractérisation effectuée et un module de gestion de la qualité des connaissances qui en déterminera la fiabilité afin de les valider et d'orienter la recherche future d'information.

Une fois validés, les résultats obtenus seront intégrés à la base de données pour permettre l'identification des impacts subséquents, soit les incidences indirectes des activités de réfection, rendant ainsi possible l'évaluation cumulative de ces incidences. Ces modifications, nous l'espérons, permettront de mieux adapter le système aux exigences de l'évaluation environnementale.

Le chapitre 1 de ce mémoire présente la problématique à l'origine du projet et expose les principales hypothèses à la base des travaux effectués. Le chapitre 2, en présentant la démarche suivie pour développer le système proposé, constitue le cœur du rapport. Le chapitre 3 décrit brièvement l'outil informatique même, soit la structuration des connaissances qui y sont intégrées ainsi que son fonctionnement au cours d'une étude. La validation de la méthodologie développée et l'étude de cas types sont présentées au

chapitre 4. Finalement, au chapitre 5, nous procémons à une analyse globale du système proposé et présentons certaines recommandations pour un développement futur.

CHAPITRE 1

CONTEXTE DU PROJET

1.1 Une première approche

Un projet de développement de système informatisé d'aide à la décision a été mené, en 1993, en collaboration avec Hydro-Québec. Le but de ce système était de procéder à l'identification et à une première évaluation des répercussions environnementales appréhendées lors des travaux de réfection de centrales hydroélectriques.

Au cours de ce projet, les connaissances requises dans les divers champs d'expertise reliés aux projets de réfection ont été identifiées et structurées en vue de leur intégration dans un système informatique (Podesto, 1993). Ainsi, les travaux envisagés ont été répertoriés et les impacts potentiels ont été identifiés puis évalués en termes de qualité (positif ou négatif), d'intensité (mineur ou majeur) et de durée (temporaire ou permanent).

L'approche matricielle a été retenue, pour la structuration des connaissances, en raison de son utilisation chez Hydro-Québec. Elle consiste à relier les travaux projetés à leurs impacts potentiels à l'intérieur de grilles dont les deux axes représentent les activités à mener et les composantes du milieu affecté. Les répercussions y sont caractérisées par leur degré d'importance. Ces matrices sont régulièrement évaluées et révisées par les experts. Pour le développement du système, treize matrices ont été construites, en fonction des classes de travaux, puis intégrées au programme informatique qui, à partir

de la sélection, par l'usager, des travaux à effectuer à un aménagement, indique les impacts qui pourraient en résulter (Podesto, 1993).

L'essai du logiciel par l'entreprise partenaire a confirmé la pertinence d'un tel outil. En procédant rapidement à l'identification et à l'évaluation des répercussions des projets de réfection, le système fournit une assistance fort intéressante aux usagers. Il offre de nombreuses possibilités d'utilisation en permettant d'étudier les incidences d'une seule activité, de quelques unes ou de l'ensemble des activités requises (Robert et Podesto, 1995). Cependant, l'évaluation de l'outil a également permis de relever certaines lacunes dans son développement.

D'abord, en raison de la forme retenue pour la structuration des connaissances, le processus d'évaluation qui conduit aux conclusions fournies par le système n'apparaît pas à l'usager. Effectivement, l'approche matricielle ne permet pas, au cours de l'utilisation du logiciel développé, de visualiser le réseau de liens intermédiaires tissé par le raisonnement de l'expert en n'en présentant que les résultats, c'est-à-dire les répercussions finales sur les composantes du milieu (Robert et Podesto, 1995).

De plus, comme l'identification et l'évaluation des impacts ne sont pas effectuées par le système même, les possibilités d'apporter des modifications s'en trouvent considérablement réduites. Il faut alors évaluer les répercussions engendrées par les éléments à ajouter, établir de nouvelles matrices qui incluent ces informations supplémentaires puis les intégrer à la structure informatique. L'approche matricielle est donc trop peu transparente et évolutive pour répondre efficacement aux exigences de l'évaluation environnementale.

Enfin, dans le premier projet, les études sont effectuées sans considérer les spécificités du site où se déroulent les projets et les listes d'impacts identifiés présentent l'ensemble

des impacts considérés possibles sur un site quelconque. L'usager doit alors valider lui-même les résultats fournis en fonction des particularités du projet à l'étude pour s'assurer qu'ils soient vraiment représentatifs. Un nouveau système, en procédant aux études à partir de la caractérisation des projets et en évaluant la qualité des informations utilisées et obtenues, rendrait possible la validation des répercussions au fur et à mesure de leur identification.

C'est à partir de ces constatations que le présent projet a été amorcé dans le but de développer une nouvelle approche répondant de façon plus adéquate aux besoins identifiés.

1.2 Une nouvelle approche

1.2.1 Hypothèses de base

Pour atteindre les objectifs de l'évaluation environnementale, il nous faut reconnaître et respecter certaines hypothèses qui en sont à la base.

D'abord, l'évaluation environnementale doit être vue comme un processus interdisciplinaire impliquant des composantes fort variées et nécessitant, par le fait même, des expertises diversifiées. Au cours d'une étude, on doit assurer l'intégration des connaissances des divers domaines d'expertise concernés et l'identification des interactions entre leurs composantes (Canter, 1996).

L'évaluation environnementale doit aussi être basée sur l'étude des éléments les plus significatifs afin d'identifier les impacts majeurs liés aux enjeux à partir desquels les décisions devront être prises. À l'intérieur d'un projet, la détermination des enjeux doit s'appuyer sur l'étude des éléments valorisés de l'écosystème (ÉVÉ) (Sadar, 1994).

Enfin, on doit respecter le fait que le processus d'évaluation environnementale n'est pas uniquement de nature scientifique mais est également une question de jugement (Jacobs, 1993). Aussi, il repose autant sur des valeurs et des appréciations que sur des faits objectifs et quantifiables. De ce fait, il implique des informations tant qualitatives que quantitatives, informations, par ailleurs, toujours empreintes d'un certain degré d'incertitude et d'imprécision.

Un système informatisé d'aide à la décision adapté à l'évaluation environnementale doit considérer ces caractéristiques fondamentales. Il doit, entre autres, pouvoir gérer des connaissances de nature, de format et de qualité variables. À partir de ces hypothèses, nous avons posé certains principes qui ont orienté l'élaboration de la nouvelle méthodologie de gestion des connaissances.

Nous avons d'abord postulé que, pour répondre adéquatement aux exigences de l'évaluation environnementale, un tel outil doit simuler le raisonnement suivi par les experts lors d'une étude d'impacts. Ce raisonnement peut être divisé en cinq principales étapes: 1) l'identification des données, 2) l'évaluation de leur qualité, 3) la sélection et l'application de règles qui mettent en relation les données disponibles pour inférer de nouvelles connaissances, 4) l'évaluation de la qualité des règles utilisées puis 5) l'évaluation de la qualité des résultats obtenus. Un système complet d'aide à l'évaluation environnementale doit donc reproduire chacune de ces étapes.

Ensuite, nous considérons qu'une analyse essentiellement qualitative est plus proche du raisonnement humain et mieux adaptée au contexte de l'évaluation environnementale que les méthodes strictement numériques en raison de la nature des connaissances impliquées, de leur incertitude et, parfois, de leur subjectivité (Sadar, 1994). La nouvelle approche doit ainsi intégrer des mécanismes de raisonnements qualitatifs,

pragmatiques, qui reflètent bien les situations auxquelles les experts sont confrontés au cours du processus d'identification et d'évaluation.

Nous avons cherché à développer une méthodologie qui vérifierait ces hypothèses tout en intégrant les notions d'évaluation cumulative des impacts, d'acquisition progressive des connaissances et d'importance relative des diverses composantes, concepts que nous définissons ici.

L'*évaluation cumulative* des impacts sous-entend deux principes distincts. D'une part, cela signifie que les impacts doivent être considérés en combinaison les uns avec les autres puisque le cumul de plusieurs impacts, même mineurs, peut mener à un impact supplémentaire (Canter, 1996; Robert et Podesta, 1995). D'autre part, une activité exécutée sur un site peut provoquer une réaction en chaîne dans laquelle les impacts produits deviennent à leur tour source d'autres impacts.

L'*acquisition progressive des connaissances* au fur et à mesure de l'avancement d'une étude est également une caractéristique fondamentale de l'évaluation environnementale. En général, la quantité et la qualité de l'information évoluent avec la progression des études, permettant ainsi, en procédant de manière itérative, une évaluation de plus en plus précise. La structure d'un système informatique d'aide à la décision doit donc assurer la disponibilité de ces nouvelles connaissances pour l'identification et l'évaluation des répercussions subséquentes.

Enfin, il est primordial de considérer l'*importance relative* des diverses composantes utilisées dans l'évaluation des répercussions. On entend, par importance relative, l'influence qu'ont les diverses composantes du milieu naturel sur les phénomènes produits. Les éléments les plus significatifs doivent être identifiés comme tels afin de s'assurer d'en avoir une connaissance suffisante, c'est-à-dire en laquelle on peut avoir

confiance. Ainsi, l'importance des composantes intervient principalement dans la gestion de la qualité des connaissances.

1.2.2 Méthode préconisée pour la structure de raisonnement

Comme il vient d'être mentionné, la méthodologie proposée doit inclure des mécanismes qualitatifs proches du raisonnement des experts. Ces considérations nous ont amené à rejeter les modèles numériques très précis qui, s'ils conviennent bien aux problèmes des sciences dites exactes, traitent difficilement des données qualitatives et incertaines, toujours présentes en évaluation environnementale. Aussi, avons nous plutôt opté pour l'approche de l'informatique symbolique qui, comme son nom l'indique, permet de représenter et de manipuler des symboles, fondement du raisonnement humain (Rochon, 1993).

Les deux concepts de base de l'informatique symbolique sont l'objet et la règle. Un objet représente un élément de la réalité auquel on peut attribuer certaines caractéristiques. Dans le cas d'une étude d'impact, les objets sont les composantes techniques et environnementales ainsi que les répercussions potentielles d'un projet. Citons, à titre d'exemple, la composante environnementale "sédiments du lit du cours d'eau" qui aurait, comme principaux attributs, un diamètre, une densité et une forme.

Le second élément, la règle, est la formalisation d'une relation existant entre des objets. Elle traduit un raisonnement qui permet d'arriver à une conclusion si ses prémisses sont vérifiées. Par exemple, la relation entre les sédiments du lit du cours d'eau et la sollicitation exercée par l'écoulement sur ceux-ci, d'après les valeurs de leurs caractéristiques respectives, permet de déterminer si les sédiments seront emportés ou non par l'écoulement. À partir de cette conclusion, d'autres règles peuvent être

étudiées, produisant à leur tour de nouvelles informations qui seront utilisées pour en inférer encore de nouvelles.

Les *réseaux causes à effets*, qui constituent une des méthodes les plus complètes et les mieux adaptées au processus d'identification des impacts environnementaux (Julien, 1991 et Ouzilleau, 1988), sont basés sur ces principes. Ils consistent en des réseaux reliant, à l'aide de règles telles que celle décrite ci-dessus, les sources de répercussions à leurs effets potentiels sur les composantes du milieu. Les premiers liens sont créés entre les activités et leurs répercussions immédiates puis, à partir de ces premiers impacts, les impacts subséquents sont identifiés jusqu'à l'obtention des répercussions finales.

On peut donc suivre la progression de l'étude au fur et à mesure que les liens sont établis et, ainsi, connaître toutes les interactions entre les travaux menés et les composantes du milieu où se déroule un projet (Lelièvre et Sérodes, 1993). De plus, l'utilisation de règles d'inférence sélectionnées en fonction des activités menées et du site où elles se déroulent assure que les études répondent aux besoins précis dictés par chaque situation rencontrée.

Des règles du même type peuvent être appliquées à l'évaluation de la qualité des informations utilisées et obtenues au cours d'une étude. Cette approche permet donc également de gérer l'incertitude inhérente aux objets et aux règles. Elle semble ainsi tout à fait appropriée pour combler la principale lacune du premier système informatique élaboré, soit le manque de transparence et de souplesse de la méthode matricielle.

1.2.3 Méthode préconisée pour la gestion de la qualité des connaissances

Diverses méthodes sont employées en gestion de l'incertitude, certaines utilisant un symbolisme et un algorithme de résolution numériques alors que d'autres sont plutôt basées sur un symbolisme et un algorithme littéraux. Les premières regroupent, entre autres, les modèles probabilistes, la théorie de l'évidence et celle des sous-ensembles flous, fondés sur les notions de probabilité ou de possibilité de réussite d'un événement. Robert (1989) présente une description de chacune de ces méthodes.

Cependant, comme nous l'avons supposé pour la structure de raisonnement, les méthodes numériques ne sont pas adaptées à la problématique de l'évaluation environnementale, laquelle nécessite plutôt des raisonnements qualitatifs. La grande diversité, quant à leur nature, leur format et leur précision, des données impliquées en évaluation environnementale rend inapplicables les méthodes numériques qui requièrent une quantification précise et rigoureuse du degré de certitude envers chaque information utilisée.

La théorie de l'“endorsement”, basée sur la qualification de l'incertitude plutôt que sur sa quantification, a été développée par Cohen (1986) pour remédier aux inconvénients des algorithmes numériques. Elle repose sur la vérification de conditions d'application de différents types pour “endosser” un événement, une conclusion (Robert, 1989). L'utilisation de règles heuristiques qui contiennent ces conditions dirige la recherche de nouvelles informations, à partir de celles disponibles, en tenant compte de leur incertitude.

1.2.4 Limites du projet

Avant d'exposer la méthode suivie au cours du projet, il convient de préciser les **limites** imposées pour le développement du système. Ces limites étaient nécessaires pour restreindre l'ampleur du travail et nous avons tenté, en les posant, de respecter le plus possible les hypothèses émises précédemment. Les limites imposées concernent la simulation du raisonnement des experts, l'intégration des connaissances et la validation de ces connaissances.

1.2.4.1 Étapes du raisonnement des experts

Nous avons affirmé, précédemment, qu'un système informatique d'aide à la décision en évaluation environnementale doit simuler chaque étape du raisonnement suivi par les experts lors d'une étude d'impact. Toutefois, il nous faut clairement établir ici que, la gestion des connaissances constituant le principal objectif du projet actuel, les efforts ont été concentrés sur la modélisation des étapes intermédiaires du processus, soit la sélection puis l'utilisation de règles d'expertise et la gestion de la qualité des connaissances. Aussi, certaines étapes du raisonnement des experts n'ont pas été entièrement définies, bien que quelques pistes aient été proposées.

D'abord, l'étape de caractérisation des travaux projetés a été partiellement établie afin de pouvoir simuler le comportement des experts de manière globale (voir la section 2.2). Cependant, le lien effectué entre les travaux et les composantes du site n'est que temporaire et une étude plus approfondie à ce propos reste à faire. Le même commentaire s'applique à la description même des travaux qui n'a été réalisée que pour un type d'activité.

Ensuite, la fin du processus d'identification des impacts n'a pas été définie non plus. Dans le système actuel, c'est la non disponibilité de règles pour étudier un phénomène qui commande l'arrêt de l'étude en cours. L'interruption d'une étude n'est donc pas régie par un critère logique, par exemple l'identification des répercussions finales, l'atteinte de la précision voulue en fonction de la phase du projet ou la diminution constante de la qualité des résultats obtenus. Certaines possibilités devraient être étudiées afin de rendre les études plus réalistes.

1.2.4.2 Domaines d'expertise intégrés

Nous avons intégré, à la version actuelle du système, les composantes environnementales relatives aux régimes hydraulique et sédimentologique d'un cours d'eau, à la qualité physico-chimique de l'eau ainsi qu'aux conditions de survie des poissons, soit les éléments du milieu aquatique. Par contre, les connaissances concernant le milieu terrestre ou encore le milieu humain n'ont pas été étudiées. Pour respecter l'hypothèse émise précédemment à propos de l'intégration des expertises en évaluation environnementale, le système devrait idéalement introduire toutes les composantes impliquées dans une étude d'impact.

1.2.4.3 Validation du système

Finalement, la troisième réserve, mais non la moindre, concerne la validation du système proposé. L'étape de validation a servi à évaluer la pertinence de la gestion des connaissances développée. Nous avons ainsi vérifié la logique des principes établis et le bon fonctionnement des mécanismes adoptés pour appliquer ces principes. C'est donc l'utilisation que le système fait des connaissances qui y sont intégrées qui a été validée.

Cependant, ces connaissances mêmes n'ont pas été validées par un expert ou par une recherche bibliographique approfondie. En fait, elles ne sont utilisées qu'aux fins de validation de la méthodologie de gestion. Les résultats fournis par le système ne doivent donc pas être utilisés dans le cadre d'un projet industriel.

CHAPITRE 2

MÉTHODE

Introduction

Relativement peu de travaux ayant été effectués sur la gestion de la qualité des connaissances dans le domaine de l'évaluation environnementale, nous avons développé une méthodologie originale pour l'élaboration de notre système. Notre approche est basée sur l'étude du comportement suivi par les experts au cours d'une étude d'impact.

Dans la méthodologie proposée, nous avons tenté de reproduire les principales étapes de leur raisonnement. Nous avons préconisé l'utilisation de concepts pragmatiques, pour la plupart qualitatifs, faisant appel au bon sens plutôt qu'à des méthodes numériques.

Avant d'exposer la démarche suivie pour le développement de la méthodologie, mentionnons qu'un lexique, présenté à l'annexe I, précise la terminologie utilisée pour exprimer les divers concepts impliqués.

2.1 Étude du raisonnement des experts

Comme il a été mentionné précédemment, le raisonnement des experts, lors de l'évaluation d'impacts environnementaux de projets, consiste principalement en cinq étapes que nous décrivons ici et qui sont illustrées à la figure 2.1.

2.1.1 Identification des données

La première étape, dans la démarche des experts, consiste à identifier les données disponibles caractérisant les travaux à effectuer et le site où ces travaux auront lieu. Ces données représentent les composantes techniques, soit les activités à mener et les équipements et aménagements à réhabiliter, ainsi que les composantes environnementales susceptibles d'être touchées par les interventions.

Les composantes techniques sont, par exemple, l'aménagement des voies d'écoulement ou la réfection d'un barrage ou d'une digue. La réalisation de chacun de ces travaux comporte une série d'actions à exécuter sur les aménagements en place. Citons, en exemple, le dragage, le remblayage, le dynamitage, l'excavation et le nettoyage des fonds pour ce qui est de l'aménagement des voies d'écoulement (Podesto, 1993).

Les composantes environnementales, quant à elles, incluent les divers éléments des milieux physique, biologique et socio-économique. Rappelons que, dans le cadre de ce projet, l'étude des composantes environnementales est limitée au milieu aquatique. En poursuivant avec l'exemple des travaux d'aménagement des voies d'écoulement, mentionnons, parmi les composantes potentiellement affectées, le régime hydraulique, le régime sédimentologique, la qualité de l'eau et les communautés animales et végétales. Ces données peuvent provenir d'outils cartographiques, d'études précédentes sur le site ou de l'évaluation de projets similaires.

2.1.2 Évaluation de la qualité des données

Les données identifiées au cours de la première étape représentent, avec une plus ou moins grande justesse, c'est-à-dire d'une manière plus ou moins fiable, les composantes techniques et environnementales liées à l'évaluation des impacts des projets. Avant de

les utiliser, il importe d'en connaître la qualité dont dépend, en partie, la qualité des résultats fournis par les règles. Les experts tentent donc d'estimer la fiabilité des données en considérant leurs sources, l'étendue de leurs valeurs possibles, les valeurs les plus probables, etc.

2.1.3 Sélection et application de règles d'expertise

Pour évaluer l'incidence des travaux sur le milieu, les experts doivent ensuite identifier les règles d'expertise qui mettent en relation les composantes techniques et les composantes environnementales. Ces règles décrivent les phénomènes déclenchés, interrompus ou modifiés par les interventions. Il peut s'agir autant de règles de l'art permettant une estimation rapide d'un phénomène que de règles complexes fournissant des réponses très précises (par exemple, des modèles numériques).

Par exemple, on peut juger approximativement si le lit d'un cours d'eau est érodé ou non en considérant la nature des sédiments du lit et la force de l'écoulement. La règle utilisée serait exprimée ainsi:

Le lit du cours d'eau est érodé si:

- le lit est constitué de sédiments fins ou de sable et
- l'écoulement est fort ou très fort.

On peut aussi déterminer précisément s'il y aura érosion en calculant et en comparant les valeurs réelle et critique du paramètre de mobilité qui met en relation la sollicitation de l'écoulement et la résistance des sédiments du lit. Ainsi, d'après la théorie de Shields, l'érosion est confirmée si la valeur réelle du paramètre de mobilité (θ) est supérieure à sa valeur critique (θ_{cr}), au-delà de laquelle les sédiments sont emportés (Yalin, 1977). Cette règle serait formalisée comme suit:

Le lit du cours d'eau est érodé si: $\theta > \theta_{cr}$

avec:

$$\theta = \frac{h i}{(s - 1)D_{50}}$$

où h : hauteur d'eau (m)

i : pente d'écoulement

D_{50} : diamètre moyen des sédiments

du lit (m)

s : densité des sédiments du lit

$$\theta_{cr} = 0,24 (D_s)^{-1} \quad \text{pour } 1 < D_s \leq 4$$

$$\theta_{cr} = 0,14 (D_s)^{-0,64} \quad \text{pour } 4 < D_s \leq 10$$

$$\theta_{cr} = 0,04 (D_s)^{-0,1} \quad \text{pour } 10 < D_s \leq 20 \quad \text{où } D_s: \text{diamètre sédimentologique}$$

$$\theta_{cr} = 0,013 (D_s)^{0,29} \quad \text{pour } 20 < D_s \leq 150$$

$$\theta_{cr} = 0,055 \quad \text{pour } D_s > 150$$

(relations établies par van Rijn, 1985)

$$D_s = \left(\frac{(s - 1)g}{v^2} \right)^{1/3} D_{50}$$

où v : viscosité cinétique de l'eau (m^2/s)

g : accélération gravitationnelle (m/s^2)

Ces règles proviennent de tous les domaines d'expertise concernés par les études. Dans le cas qui nous intéresse, elles décrivent les phénomènes d'érosion et de transport de sédiments, les paramètres de qualité de l'eau, les conditions nécessaires aux espèces animales et végétales présentes, etc.

La précision requise pour l'étude dépend de l'étape à laquelle on se situe dans le processus d'évaluation environnementale. Ainsi, en passant de la phase préliminaire à celle de l'avant-projet puis à celle de l'exécution du projet, les impacts doivent être évalués de plus en plus précisément. Les règles sélectionnées doivent permettre cette progression de la précision.

Cependant, la sélection des règles est étroitement liée à la disponibilité des données. En effet, seules les règles dont les données sont connues, et ce avec une fiabilité suffisante, peuvent être appliquées.

En général, les règles de grande précision requièrent plus d'information - et une information plus sûre - que les règles approximatives. Leur utilisation suppose donc une bonne connaissance des composantes environnementales et techniques impliquées, laquelle repose sur la caractérisation préalable du projet étudié et sur l'acquisition d'information nouvelle avec l'avancement de l'étude.

2.1.4 Évaluation de la qualité des règles

De façon similaire, les règles sélectionnées décrivent les phénomènes physiques ou biologiques, originant des activités de réfection, selon divers degrés de précision qui expriment, en fait, la fiabilité que les experts leur reconnaissent. Cette fiabilité des règles exerçant une influence sur la qualité de l'information qu'on tire de leur application, il est nécessaire de l'évaluer et de la considérer, tout comme la fiabilité des données, dans l'étude des répercussions environnementales.

La fiabilité d'une règle dépend de sa nature; une simple estimation qualitative d'un phénomène est considérée moins fiable qu'un modèle numérique étudiant le même phénomène. Cette fiabilité d'une règle dépend aussi de la compréhension que l'on a du

phénomène qu'elle décrit. Ainsi, plus d'hypothèses simplificatrices et d'approximations ont été admises lors de la définition de la règle, moins cette dernière est considérée fiable. Les deux règles présentées précédemment illustrent ce phénomène.

2.1.5 Évaluation de la qualité des résultats

Après avoir appliqué une règle, les experts doivent procéder à l'évaluation de la qualité du résultat obtenu. En effet, en raison de l'incertitude inhérente aux données et de l'imprécision des règles, les réponses fournies sont elles-mêmes plus ou moins certaines. La démarche consiste donc à déterminer l'influence de la fiabilité des règles et des données sur la qualité des réponses.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, diverses méthodes sont employées en gestion de l'incertitude, certaines utilisant un symbolisme et un algorithme de résolution numériques alors que d'autres sont plutôt basées sur un symbolisme et un algorithme littéraux.

2.2 Nouvelle structure de raisonnement

En nous inspirant du comportement des experts décrit ci-dessus, nous avons élaboré une nouvelle structure de raisonnement pour modéliser principalement les étapes de sélection et d'application des règles d'expertise ainsi que l'évaluation de la qualité des résultats obtenus. La figure 2.2 illustre la structure définie. L'approche proposée correspond aux principes de base de l'évaluation environnementale et est adaptée au formalisme d'un développement informatique.

Dans la méthodologie développée, la caractérisation du projet à l'étude (travaux et site) constitue le point de départ du processus d'identification et d'évaluation des impacts

environnementaux. Bien que la caractérisation des travaux et le lien entre ceux-ci et les composantes du site n'aient pas été définis précisément, une réflexion sur le sujet a permis d'en dégager les grandes lignes.

Les travaux pourraient être décomposés en une séquence d'actions élémentaires (telles que celles données en exemple à la sous-section 2.1.1), indiquées par l'utilisateur du système, qui seraient considérées comme les sources directes des premières répercussions. Par l'entremise des règles de connaissance, un lien serait alors établi entre chacune de ces sources d'impact et une composante affectée, ce lien définissant un impact potentiel. On obtiendrait ainsi la liste de toutes les répercussions potentielles directes des travaux de réfection.

La décomposition en actions élémentaires a été effectuée, de façon sommaire, pour le travail "aménagement des voies d'écoulement" et les incidences de quelques unes de ces actions sur les composantes environnementales ont été établies à titre d'exemples. Cette étape est illustrée à la figure 2.3. Cela nous a permis de modéliser de manière plus complète (bien que non définitive) le processus d'identification des répercussions environnementales et d'entrevoir les possibilités de l'approche proposée pour la caractérisation des travaux et l'établissement d'un lien avec les composantes affectées. Le système procède ensuite à la validation des répercussions identifiées, en fonction des caractéristiques du site, à l'aide de la méthodologie de gestion des connaissances décrite ci-après.

Chaque répercussion potentielle, identifiée à partir des actions déclarées, est évaluée par l'utilisation de règles d'expertise pour confirmer ou infirmer son existence. Ces règles étudient les phénomènes susceptibles d'être provoqués par les travaux, donc les répercussions potentielles, en mettant en relation les diverses composantes du milieu représentées par les données. L'utilisation des règles dépend, ainsi, de la disponibilité

des données. Si les données requises sont connues, l'application des règles sélectionnées conduit à la confirmation ou au rejet des impacts potentiels préalablement identifiés.

Le système procède alors à la gestion de la fiabilité des règles et des données utilisées dans l'évaluation des répercussions afin de déterminer la fiabilité des résultats obtenus. Cette évaluation, également fonction du nombre et du type de données connues, est expliquée en détail à la sous-section 2.4.3.

Les impacts confirmés avec une fiabilité satisfaisante sont alors ajoutés à la base de données pour la suite de l'étude. Cette mise à jour de la base de données permet de procéder à une évaluation cumulative des répercussions, c'est-à-dire que chaque impact validé devient une donnée disponible pour l'évaluation, de manière itérative, des impacts subséquents.

Comme dans tout processus itératif, il est nécessaire d'imposer une condition d'arrêt pour mettre fin au cycle d'étude. Bien que cet aspect n'ait pas été intégré au système, quelques pistes ont été examinées et seront exposées au chapitre 5. Dans la version actuelle, les études sont interrompues quand il n'y a plus de règles disponibles pour étudier de nouvelles répercussions potentielles.

La validation des impacts potentiels, incluant l'évaluation de la fiabilité, constitue le coeur de la méthodologie développée et sera davantage expliquée à la section 2.4. Cependant, avant d'en exposer le détail, il convient d'établir la structuration des connaissances qui sont utilisées au cours du processus, soit les données et les règles d'expertise qui mettent ces dernières en relation.

2.3 Structuration des connaissances

2.3.1 Établissement de la base de données

La base de données contient les actions élémentaires constituant les travaux à effectuer (éventuellement) ainsi que les composantes du site à l'étude. Les données de départ sont fournies par l'usager (en théorie, actuellement le système utilise des fichiers de données fictifs) et la base de données est incrémentée progressivement par l'ajout des répercussions déterminées tout au long de l'étude.

À l'intérieur de cette base de données, les composantes sont exprimées, lorsque c'est possible, par une valeur numérique ou, si elles ne sont pas connues aussi précisément, par une évaluation qualitative (par exemple, concentration *élévée* en ions Ca²⁺). Elles peuvent aussi être exprimées par une variation de leur valeur (par exemple, augmentation de la turbidité). Enfin, les données peuvent aussi représenter des phénomènes se produisant sur le site (par exemple, érosion des berges).

À chaque donnée est également attribué un degré de fiabilité exprimant la confiance que l'on accorde à sa valeur. Une échelle d'évaluation a été définie pour établir cette fiabilité des données. Il s'agit d'une échelle qualitative dont les degrés sont exprimés par des étiquettes linguistiques, soit *très élevée*, *élévée*, *moyenne* ou *faible*. On définit ainsi ces degrés de fiabilité des données:

- Très élevée: si la valeur de la donnée ne comporte qu'un très faible doute;
- Élevée: si la valeur de la donnée est une approximation proche de la réalité;
- Moyenne: si la valeur de la donnée est une approximation raisonnable, qu'on doit utiliser avec discernement mais qui reste représentative de la valeur réelle;

- Faible: si la valeur de la donnée est très approximative; on doit l'utiliser avec beaucoup de prudence car elle n'indique rien de plus qu'une tendance.

La fiabilité des données de départ est fixée par l'usager alors que celle des résultats obtenus au cours de l'étude est évaluée par le système à l'aide de la méthodologie de gestion de la fiabilité qui sera décrite à la section 2.4.3.

2.3.2 Structuration des règles d'expertise

2.3.2.1 Principales parties d'une règle: la conclusion et les conditions d'application

Comme il a été mentionné dans l'introduction de cette section, les répercussions potentielles identifiées constituent les liens entre les actions projetées et les composantes du milieu. Dans la méthode d'évaluation que nous proposons, ces liens sont établis par la sélection et l'application de règles d'expertise qui modélisent les phénomènes susceptibles d'être déclenchés, entravés ou modifiés par les activités de réfection. Ces règles doivent être structurées de façon à mettre en relation les sources de répercussions, les composantes du milieu et les répercussions provoquées.

La structure des règles est ainsi composée de deux principales parties: la *conclusion* de la règle, qui exprime une répercussion potentielle (ou, de manière plus générale, un phénomène quelconque à étudier), et les *conditions d'application* de la règle qui doivent être respectées pour que la conclusion soit acceptée ou rejetée. Les conditions expriment la valeur que les composantes doivent avoir pour que le phénomène étudié par la règle (exprimé par sa conclusion) soit confirmé ou exclu. Ce principe s'inspire de la théorie de l'“endorsement” développée par Cohen (1986) selon laquelle la vérification de certaines conditions d'application permet d'“endosser” ou non un

événement (Robert, 1989). Le résultat obtenu de leur vérification (ou de leur "non vérification") dépend du type de condition dont il s'agit.

Ainsi, certaines conditions permettent de confirmer ou de rejeter la conclusion d'une règle alors que d'autres ne permettent que de la rejeter; certaines doivent obligatoirement être vérifiées pour permettre une décision alors que la vérification d'autres est facultative. L'exemple qui suit illustre la structure générale d'une règle telle que nous l'avons définie et son analyse permettra d'exposer différents types de conditions.

2.3.2.2 Exemple de règle

Examinons le cas familier du diagnostic de la grippe à partir des symptômes de la maladie. On sait qu'une personne atteinte de la grippe a toujours une forte fièvre et ressent toujours une grande fatigue et des courbatures. Le malade peut également souffrir d'une infection bactérienne des voies respiratoires mais ce symptôme n'est pas nécessairement présent. À l'opposé, la grippe ne provoque jamais d'éruption ni de trouble de la vision. On peut donc éliminer la grippe des affections possibles si le patient présente un de ces symptômes.

On voit que certains symptômes sont déterminants; lorsqu'ils sont présents, ils permettent de poser un diagnostic. D'autres, par contre, ne sont que "supportifs", c'est-à-dire que leur présence, sans être décisive, permet de renforcer le diagnostic posé à partir des symptômes déterminants et que leur absence n'empêche pas ce diagnostic. Dans certains cas, les symptômes déterminants doivent tous être présents alors que, dans d'autres cas, la présence d'un seul suffit pour émettre une opinion. Enfin, parmi les symptômes déterminants, la présence de certains nous fait poser un diagnostic positif alors que la présence d'autres entraîne le rejet de ce diagnostic.

On peut donc parler, d'une part, de symptômes nécessaires, de symptômes suffisants et de symptômes supportifs à un diagnostic et, d'autre part, de symptômes qui entraînent un diagnostic positif (symptômes d'endossement) et de symptômes qui nous font l'exclure (symptômes d'exclusion). Il est important de noter, ici, que l'on peut aussi exclure un diagnostic à partir des symptômes d'endossement nécessaires. En effet, leur caractère nécessaire indique que, s'ils sont absents, le diagnostic positif est impossible. Par contre, on ne peut endosser un diagnostic positif suite à l'absence d'un symptôme d'exclusion. Ainsi, le diagnostic de la grippe est exclu si le patient ne présente pas une forte fièvre mais l'absence de trouble de la vision ne permet pas de l'endosser.

Une règle exprimant ces connaissances serait structurée ainsi:

| Conclusion de la règle | Symptômes d'endossement | | Symptômes Suffisants |
|---------------------------------|---|---|--|
| | Nécessaires | Supportifs | |
| Le patient souffre de la grippe | <ul style="list-style-type: none"> - forte fièvre - grande fatigue - courbatures | <ul style="list-style-type: none"> - infection bactérienne des voies respiratoires | <ul style="list-style-type: none"> - éruption - trouble de la vision |

Les répercussions potentielles sur le site d'un aménagement hydroélectrique en réfection sont étudiées par des règles similaires dont l'annexe V dresse la liste. Les diverses composantes impliquées par les règles sont contenues dans des conditions d'*endossement ou d'exclusion, nécessaires, suffisantes ou supportives*.

2.3.2.3 Définition des différents types de conditions

Les conditions d'endossement sont celles à partir desquelles la conclusion d'une règle peut être endossée. Elles sont présentes dans toutes les règles et leur vérification constitue le point tournant du processus de validation des impacts potentiels. Il résulte de cette vérification soit l'endossement de la conclusion de la règle, son exclusion ou, encore, une indétermination quant à la conclusion si les composantes requises sont inconnues.

Les conditions d'exclusion, quant à elles, permettent de rejeter la conclusion de la règle appliquée lorsqu'elles sont vérifiées. Elles sont étudiées quand la vérification des conditions d'endossement n'a permis ni d'endosser, ni d'exclure la conclusion de la règle étudiée parce que des données étaient inconnues. Ici également, si les données requises par les conditions d'exclusion sont inconnues, l'indétermination persiste quant à la conclusion de la règle.

L'utilisation de conditions d'exclusion permet d'accélérer les études en éliminant certaines répercussions d'abord jugées possibles d'après les travaux projetés mais infirmées au cours de la validation. Elles servent à étudier des composantes qui ne sont pas incluses dans les conditions d'endossement. Leur utilisation peut être très utile mais n'est pas essentielle à une étude. D'ailleurs, elles ne sont pas présentes dans toutes les règles car elles sont relativement difficiles à déterminer. Elles requièrent une expertise très pointue qui nous permet d'affirmer que la présence de certaines conditions rend impossible la production du phénomène étudié par la règle.

Les conditions nécessaires, suffisantes et supportives ont été définies pour tenir compte de l'importance relative que revêtent les composantes impliquées dans chaque règle. Ainsi, les composantes les plus importantes sont contenues dans des conditions

nécessaires ou suffisantes tandis que les composantes secondaires sont plutôt exprimées par des conditions dites supportives.

Les conditions nécessaires et les conditions suffisantes, qu'on retrouve autant parmi les conditions d'exclusion que d'endossement, contiennent les composantes déterminantes dans les règles; c'est à partir de leur vérification que la conclusion d'une règle est endossée ou exclue. Notons que, dans une règle, les conditions déterminantes d'un même *type* (d'endossement ou d'exclusion) ont toutes le même *caractère*, soit nécessaire ou suffisant. Par exemple, une règle ne peut contenir, parmi ses conditions d'endossement, à la fois des conditions nécessaires et des conditions suffisantes; ces conditions sont utilisées dans des situations différentes.

Les conditions nécessaires servent à étudier les phénomènes requérant une combinaison de conditions pour se produire. Dans la formulation des règles, elles sont reliées par la conjonction "et". Leur caractère nécessaire indique que les composantes qu'elles impliquent doivent obligatoirement être connues, avec les bonnes valeurs, pour que la conclusion de la règle étudiée soit endossée (ou exclue s'il s'agit de conditions d'exclusion). Dans les règles qui en contiennent, l'endossement (ou l'exclusion) n'est donc possible que si toutes les conditions nécessaires sont vérifiées.

Dès qu'une des conditions nécessaires à l'endossement n'est pas vérifiée, l'endossement de la conclusion de la règle est écarté. Si la composante que cette condition implique est inconnue, il y a indétermination et les conditions d'exclusion sont étudiées afin de vérifier si l'exclusion de la conclusion est possible. Par contre, si la valeur de la composante est connue mais ne respecte pas l'énoncé de la condition, la conclusion de la règle se trouve automatiquement exclue.

Les conditions suffisantes, quant à elles, se retrouvent dans les règles étudiant des phénomènes qui peuvent exister dès qu'une condition, parmi d'autres possibles, est présente, sans qu'aucune en particulier n'ait à l'être. Elles sont reliées, dans la formulation des règles, par la conjonction "ou". Ainsi, comme leur nom l'indique, la vérification d'une seule de ces conditions, n'importe laquelle, suffit à l'endossement de la conclusion d'une règle, même si la vérification du plus grand nombre est souhaitable pour augmenter la fiabilité de l'endossement, comme nous le verrons à la section traitant de la gestion de la fiabilité des connaissances.

Si aucune condition suffisante n'est vérifiée, l'étude des conditions d'exclusion est entreprise. Contrairement au cas des conditions nécessaires, toutefois, on ne peut se baser sur le fait que les valeurs des composantes impliquées par les conditions suffisantes ne respectent pas les énoncés de ces conditions pour rejeter la conclusion d'une règle. En effet, d'après la définition des conditions suffisantes, tout ce que l'on peut affirmer, lorsqu'aucune condition de ce type n'est vérifiée dans une règle, c'est que la conclusion de cette règle ne peut être endossée. Rien, cependant, ne nous indique qu'elle peut être exclue. La vérification systématique des conditions sera décrite en détail à la sous-section 2.4.2.

Enfin, les conditions supportives, comme nous l'avons mentionné précédemment, contiennent les composantes secondaires des règles. Leur utilisation est facultative et certaines règles en contiennent, d'autres non, selon le phénomène analysé et l'expertise qu'on en a. La vérification des conditions supportives, bien qu'elle ne soit pas nécessaire et qu'elle ne permette pas de prendre une décision, sert à renforcer une conclusion, c'est-à-dire à en augmenter la fiabilité, ou à indiquer une tendance.

Mentionnons que, pour s'assurer de ne pas rejeter à tort des répercussions par manque de connaissances, nous n'avons défini, pour les conditions d'exclusion, que des

conditions nécessaires ou suffisantes. Voici, en exemple, une règle d'expertise intégrée au système (d'après Pelizzari, 1994).

| Conclusion de la règle | Conditions d'endossement | | Conditions d'exclusion |
|---|--|--|------------------------|
| | Suffisantes | Supportives | |
| Difficultés respiratoires chez les poissons | <ul style="list-style-type: none"> - diminution de la concentration en oxygène dissous - diminution du pH - augmentation de la concentration en métaux lourds - augmentation de la turbidité | <ul style="list-style-type: none"> - augmentation de la température - augmentation de la dureté - augmentation de la conductivité | aucune |

2.3.2.4 Cas particulier: les règles numériques

Les règles numériques, soit des équations mathématiques, représentent des cas particuliers. D'une part, ces règles ne contiennent jamais de conditions d'exclusion et, d'autre part, pour qu'elles puissent être appliquées, tous les paramètres des règles de ce type doivent être connus. Une valeur par défaut peut, parfois, être attribuée à un paramètre dont la valeur réelle est inconnue mais une certaine valeur est tout de même essentielle à l'application de la règle.

Pour représenter cette situation dans la structure des règles, on a attribué le caractère nécessaire à toutes les conditions des règles numériques. Cependant, comme il a déjà été expliqué, le recours à des conditions de caractères différents permet de considérer l'importance relative des composantes dans les règles. Il faut donc établir une méthode

distincte pour les règles numériques. Pour cette raison, nous avons intégré, à la gestion de ces règles, la notion de sensibilité aux composantes.

La sensibilité d'une règle à une composante exprime l'influence de la composante en question sur la réponse de la règle. Elle indique la mesure selon laquelle la réponse est affectée par une variation de la valeur de la composante. Chaque composante d'une règle se voit donc attribuer un degré de sensibilité et est traitée différemment selon ce degré. Nous avons défini trois classes de sensibilité, soit *forte*, *moyenne* et *faible*, qui interviennent dans la gestion de la fiabilité des connaissances qui sera discutée à la section suivante.

2.3.2.5 Fiabilité des règles

Enfin, comme la qualité des règles appliquées a une influence sur la qualité des réponses qu'elles fournissent, au même titre que les composantes qu'elles impliquent, un degré de fiabilité leur est également attribué.

La fiabilité d'une règle est une mesure de l'exactitude avec laquelle elle représente le phénomène décrit par sa conclusion. Elle dépend donc du degré de compréhension que l'on a du phénomène en question, des hypothèses simplificatrices et des approximations admises lors de la définition de la règle, etc. En fait, elle est établie d'après l'expertise que l'on possède sur le phénomène étudié. Une échelle de quatre degrés a été définie comme suit pour la fiabilité des règles:

- Très élevée: si la règle décrit fidèlement un phénomène bien compris;
- Élevée: si relativement peu d'approximations ont été admises dans la définition de la règle;

- Moyenne: si la règle est une approximation raisonnable d'un phénomène qu'on ne comprend pas parfaitement;
- Faible: si la règle ne permet qu'une appréciation imprécise du phénomène étudié.

En général, plus une règle est fiable, plus son application requiert de connaissances. Il est donc utile de définir plusieurs règles de fiabilité variable pour étudier un même phénomène. De cette manière, une répercussion peut être étudiée même si peu d'information est disponible. La qualité de la validation peut être améliorée plus tard, avec l'acquisition de nouvelles connaissances.

2.4 Validation d'une répercussion potentielle identifiée

La principale étape de la gestion des connaissances proposée est la validation des répercussions potentielles identifiées à partir de la déclaration des actions projetées. Elle consiste à établir si, d'après les caractéristiques du site où se déroule le projet de réfection, ces impacts potentiels se produiront réellement ou non.

Au cours de la validation, on étudie les composantes du milieu afin de déterminer si les conditions requises pour la production des impacts sont présentes sur le site. Cette étude est effectuée par la sélection et l'application des règles d'expertise dont la structure vient d'être décrite. La figure 2.4 illustre le processus de validation d'une répercussion potentielle.

2.4.1 Sélection d'une règle d'expertise

La sélection d'une règle d'expertise permet d'établir un lien entre une source de répercussion environnementale et la répercussion même. Les répercussions potentielles

sont identifiées à partir de ce qu'on considère être une source de répercussion. Par exemple, les premières répercussions sont identifiées à partir des actions projetées sur le site. Les impacts subséquents sont ensuite identifiés à partir des premiers, maintenant considérés à leur tour comme source d'impacts.

C'est par la sélection des règles que les impacts potentiels sont identifiés. En effet, à partir de la source d'impact considérée, on procède à la sélection d'une règle ayant cette source d'impact parmi ses conditions d'endossement. La conclusion de cette règle exprime la répercussion potentielle que l'on cherche à identifier.

Si plus d'une règle sont disponibles pour étudier une même répercussion, on sélectionne celle ayant la meilleure fiabilité. Cependant, il est possible qu'une seconde règle, de fiabilité inférieure, doive être sélectionnée si certaines composantes requises par la première sont inconnues ou trop peu fiables pour fournir une réponse dont la fiabilité est acceptable.

2.4.2 Application de la règle sélectionnée

Après qu'une règle ait été sélectionnée, elle est appliquée afin de déterminer si, en fonction des composantes présentes sur le site du projet, le phénomène qu'elle étudie se produit réellement. L'application d'une règle, illustrée à la figure 2.5, commence par la vérification de ses conditions.

La vérification d'une condition, montrée à la figure 2.6, consiste à rechercher la composante qu'elle contient dans la base de données, ou à déterminer sa valeur si elle est inconnue, puis à vérifier si cette dernière respecte l'énoncé de la condition. Trois résultats sont alors possibles.

D'abord, si la composante est présente dans la base de données, le système s'assure que sa valeur est conforme à ce que la condition requiert. Une condition dont la composante est connue et possède la bonne valeur est considérée *vérifiée*. Si la composante recherchée est connue mais que sa valeur ne respecte pas l'énoncé de la condition, cette dernière est déclarée *non conforme*. Si l'on ignore la valeur de la composante, le système tente de la déterminer par la sélection et l'application d'une autre règle. La valeur de la composante ainsi déterminée est alors comparée à celle demandée par la condition et, selon le résultat de la comparaison, cette dernière est alors considérée vérifiée ou non conforme. Par contre, si la seconde règle n'a pas permis d'établir la valeur de la composante recherchée ou si aucune règle étudiant cette composante n'est disponible, le terme *inconnue* est associé à la condition qui la contient.

Quand la vérification d'une condition est achevée, le système passe à l'étude de la condition suivante, jusqu'à ce que toutes les conditions, incluant les supportives, aient été vérifiées. Le système procède alors au bilan de la vérification des conditions. C'est à la suite de ce bilan qu'une décision est prise quant à l'endossement ou l'exclusion de la conclusion de la règle, ce qui correspond, respectivement, à la confirmation ou au rejet de la répercussion (ou, de manière plus générale, du phénomène) étudiée.

Le bilan repose essentiellement sur le résultat de la vérification des conditions dites déterminantes (nécessaires ou suffisantes, selon la règle). Ainsi, la conclusion d'une règle est endossée si toutes les conditions nécessaires de la règle ont été vérifiées ou si au moins une de ses conditions suffisantes l'a été. À l'opposé, elle est exclue si une condition nécessaire a été déclarée non conforme. Si la vérification des conditions d'endossement n'a permis ni l'endossement ni l'exclusion de la conclusion de la règle, soit en raison de l'ignorance de certaines conditions nécessaires ou de la non

vérification de toutes les conditions suffisantes, l'étude des conditions d'exclusion, lorsque la règle en contient, est entreprise.

L'étude des conditions d'exclusion s'effectue de façon similaire à celle des conditions d'endossement. Les conditions sont vérifiées successivement puis on procède au bilan de la vérification. La conclusion de la règle peut alors être exclue si toutes les conditions nécessaires à l'exclusion ont été vérifiées ou si au moins une condition suffisante l'a été. Si, par contre, les valeurs des composantes requises par ces conditions sont inconnues ou non conformes, l'indétermination à propos du phénomène étudié persiste. C'est à ce moment que le résultat de la vérification des conditions supportives entre en jeu.

En effet, bien que ces conditions ne permettent jamais une décision telle que l'endossement ou l'exclusion de la conclusion d'une règle, leur vérification, avec une fiabilité suffisante, peut fournir une information utile en indiquant un certain potentiel d'existence du phénomène évalué. La notion de fiabilité suffisante sera définie dans le paragraphe suivant traitant de l'évaluation de la fiabilité de la validation.

2.4.3 Évaluation de la fiabilité de la validation

L'évaluation de la fiabilité de la validation d'une répercussion potentielle consiste à déterminer la fiabilité de chaque réponse (endossement ou exclusion) obtenue de l'application des règles tout au long de l'étude. Nous avons posé, comme base à la méthodologie de gestion de la fiabilité, certains principes directeurs qui, par la suite, en ont orienté le développement. Ces principes sont présentés ici.

Principe 1: *La fiabilité d'une réponse est fonction de la fiabilité de la règle qui l'a fournie et de la fiabilité des paramètres que celle-ci implique.*

Ce principe est celui autour duquel s'articule toute la méthodologie de gestion de la fiabilité. Les règles et leurs composantes étant toutes entachées d'une certaine incertitude, les réponses qu'on en tire le sont également et il faut évaluer cette incertitude des réponses en fonction de celle des règles et des données qui les fournissent.

Principe 2: *La fiabilité d'une réponse ne peut être supérieure à celle de la règle qui l'a fournie.*

Principe 3: *Cette fiabilité maximale de la réponse, soit celle de la règle, ne peut être atteinte que si tous les paramètres de la règle sont très fiables.*

Comme l'indiquent les deux derniers principes, la fiabilité d'une réponse atteint le degré maximal possible, qui correspond au degré de fiabilité de la règle qui l'a fournie, si les composantes de cette règle ont une excellente fiabilité. Si la fiabilité des paramètres est plus faible, celle de la réponse s'en trouve diminuée (par rapport à la fiabilité de la règle). Il s'agit alors d'évaluer cette diminution, en fonction de la baisse de fiabilité des paramètres, pour déterminer la fiabilité de la réponse.

Principe 4: *Plus une règle est fiable, plus elle nécessite des paramètres fiables.*

Nous considérons qu'une règle très fiable, pour fournir une réponse à la hauteur de sa fiabilité, doit utiliser des paramètres également très fiables. Par contre, une règle peu fiable, fournissant, de toute façon, une réponse

peu fiable, est moins influencée par des paramètres de mauvaise qualité. Une diminution de la fiabilité des paramètres a donc un impact d'autant plus grand, sur la fiabilité de la réponse, que la règle a une fiabilité élevée.

Principe 5: *En deça d'un certain degré de fiabilité de la réponse, la conclusion d'une règle ne peut être endossée ou exclue.*

Pour qu'il vaille la peine d'intégrer une réponse à la base de données, elle doit posséder un certain degré minimal de fiabilité. Ce principe pourrait d'ailleurs être utilisé comme critère d'arrêt d'une étude. Par exemple, il serait jugé inutile de poursuivre une étude après avoir obtenu, pour plusieurs réponses consécutives, une fiabilité inférieure au seuil critique posé.

Principe 6: *L'influence de la fiabilité individuelle des composantes est proportionnelle à leur importance relative dans la règle.*

La fiabilité de la réponse d'une règle est établie principalement à partir de la fiabilité des composantes déterminantes de la règle. Ainsi, une mauvaise fiabilité de celles-ci entraîne une plus grande baisse de fiabilité de la réponse que s'il s'agit des composantes secondaires.

Nous avons divisé le processus d'évaluation en deux principales étapes: la fiabilité globale des composantes, d'après la fiabilité individuelle de chacune d'entre elles, est d'abord déterminée, puis la fiabilité de la réponse est évaluée à partir de la fiabilité des composantes et de celle de la règle. La gestion globale de la fiabilité est illustrée à la figure 2.7.

La fiabilité globale des composantes est établie en fonction de la fiabilité et de l'importance relative de la composante de chaque condition vérifiée ainsi que de la proportion de conditions vérifiées par rapport au nombre total de conditions de la règle. Cette fiabilité globale est évaluée différemment selon qu'il s'agit d'une règle numérique ou d'une règle qualitative puisque l'importance relative des composantes dans la règle est considérée de manière différente dans les deux types de règles.

Comme on l'a exposé à la section précédente, les règles numériques ne contenant que des conditions nécessaires, l'importance des composantes est mesurée par la sensibilité des règles à chacune de ces composantes. Nous avons établi trois classes de sensibilité, soit *forte*, *moyenne* et *faible*, dans lesquelles sont divisées les composantes. La gestion de la fiabilité doit être adaptée à chacune de ces classes.

Par contre, dans les règles qualitatives, l'importance est considérée uniquement d'après le caractère nécessaire, suffisant ou supportif des conditions. En effet, afin de ne pas surcharger l'évaluation de la fiabilité dans ces règles, nous avons limité la distinction des composantes, quant à leur importance dans la règle, au caractère des conditions qui les impliquent, sans définir de degrés de sensibilité. La gestion de la fiabilité particulière aux règles numériques est illustrée à la figure 2.8 alors que celle adaptée aux règles qualitatives est présentée à la figure 2.9 pour les règles contenant des conditions nécessaires et à la figure 2.10 pour les règles contenant des conditions suffisantes.

2.4.3.1 Gestion de la fiabilité des composantes des règles numériques

Pour tenir compte des différents degrés de sensibilité des règles numériques à leurs composantes (attribués aux composantes dans la structure des règles), une gestion partielle de la fiabilité de ces composantes, par classe de sensibilité (forte, moyenne ou faible), est d'abord effectuée.

Les composantes de la classe *forte* sont celles ayant la plus grande influence sur la réponse. Ce sont les composantes fondamentales de la règle, celles qui doivent avoir la meilleure fiabilité pour obtenir une réponse valable, c'est-à-dire suffisamment fiable.

Les composantes de la classe *moyenne* ont aussi une influence non négligeable sur la réponse et sont importantes dans la règle mais à un degré moindre que les précédentes. On doit en avoir une bonne connaissance mais elles ne sont pas critiques.

Les composantes de la classe *faible*, quant à elles, représentent, en général, des paramètres très peu variables et ont ainsi peu d'influence sur la réponse d'une règle. Sans les ignorer complètement, on peut accepter une fiabilité peu élevée sans que cela n'affecte significativement la réponse.

Au cours de l'évaluation de la fiabilité, on procède d'abord à la gestion de la fiabilité des composantes de la classe de sensibilité *forte*, puis à celle des composantes de la classe de sensibilité moyenne et, enfin, à celle des composantes de la classe faible. Un degré de fiabilité est ainsi établi pour chaque classe de sensibilité. L'échelle d'évaluation de la fiabilité des classes est la même que pour la fiabilité individuelle des composantes, soit *très élevée*, *élevée*, *moyenne* et *faible*. La fiabilité globale des composantes est ensuite établie d'après ces degrés de fiabilité des classes de sensibilité.

Gestion partielle de la fiabilité des composantes par classe de sensibilité

Pour chaque classe de sensibilité, les divers degrés de fiabilité possibles (très élevée, élevée, moyenne et faible) sont établis en fonction de la fiabilité des composantes et de leurs proportions. Cependant, comme la classe *faible* a peu d'influence sur la réponse, moins de nuances sont nécessaires dans l'évaluation de la fiabilité de cette classe. C'est pourquoi seulement trois degrés de fiabilité ont été établis, soit *élevée*, *moyenne* et

faible. Les règles établissant le degré de fiabilité des classes sont présentées à l'annexe III.

Un degré minimal de fiabilité a été imposé pour la classe *forte* et ses composantes puisque ce sont les composantes critiques dans une règle. On doit donc en avoir une bonne connaissance pour obtenir une réponse valable de cette règle. On a ainsi établi que la fiabilité individuelle des composantes et celle de la classe doit être au moins *moyenne* pour que la réponse (endossement ou exclusion de la conclusion de la règle) soit acceptée.

Gestion globale de la fiabilité des composantes

Le degré de fiabilité global des composantes, en fonction de la fiabilité des classes de sensibilité, est établi en considérant principalement la fiabilité obtenue pour la classe forte puis celle de la classe moyenne. La fiabilité de la classe faible, quant à elle, sert à renforcer la tendance indiquée par les classes précédentes ou à trancher lorsque l'étude des deux premières classes ne permet pas de prendre une décision sans équivoque. Les règles qui déterminent ce degré de fiabilité globale des composantes sont également énumérées à l'annexe III.

2.4.3.2 Gestion de la fiabilité des composantes des règles qualitatives

Contrairement aux règles numériques, les règles qualitatives peuvent contenir des conditions de différents caractères (nécessaires, suffisantes ou supportives). La gestion de la fiabilité des composantes dépend donc, cette fois, comme il a été expliqué précédemment, du caractère des conditions qui impliquent ces composantes plutôt que de la classe de sensibilité à laquelle elles appartiennent.

Nous avons appliqué, aux règles contenant des conditions nécessaires, la méthodologie de gestion développée pour les règles numériques en attribuant, toutefois, le même degré de sensibilité à toutes les composantes, soit une sensibilité *forte* (puisque il s'agit des composantes fondamentales de la règle). Ainsi, excepté pour le degré minimal de fiabilité requis pour les composantes de cette classe, la sensibilité n'intervient pas dans la gestion de la fiabilité. L'hypothèse selon laquelle l'importance des composantes est considérée uniquement par le caractère des conditions dans les règles qualitatives se trouve donc respectée.

Pour ce qui est des règles contenant des conditions suffisantes, la fiabilité globale des composantes ne dépend pas seulement de la fiabilité individuelle des composantes mais, aussi, de la proportion de conditions suffisantes vérifiées par rapport au nombre total de ces conditions dans la règle. En effet, nous considérons que, si la conclusion d'une règle est endossée par la vérification de toutes ses conditions suffisantes, l'endossement est plus fiable que si une seule condition est vérifiée.

Nous procédons donc à deux gestions partielles de la fiabilité, l'une en fonction de la fiabilité individuelle des composantes et l'autre en fonction de la proportion de conditions vérifiées, pour ensuite établir le degré global de fiabilité des composantes.

Gestion partielle de la fiabilité des composantes des conditions suffisantes d'après leur fiabilité individuelle

Comme on n'attribue pas de degré de sensibilité aux composantes contenues dans les conditions suffisantes, ces conditions sont toutes d'importance égale dans une règle. On peut donc considérer, comme première fiabilité partielle, la fiabilité moyenne des composantes des conditions suffisantes qui ont été vérifiées.

Gestion partielle de la fiabilité des composantes des conditions suffisantes d'après la proportion de conditions vérifiées

Pour ce qui est de la proportion de conditions suffisantes vérifiées, nous considérons que la seconde fiabilité partielle est:

- très élevée: si plus de 75% des conditions suffisantes sont vérifiées;
- élevée: si plus de 50% des conditions suffisantes sont vérifiées;
- moyenne: si plus de 25% des conditions suffisantes sont vérifiées;
- faible: si 25% ou moins des conditions suffisantes sont vérifiées.

Gestion globale de la fiabilité des composantes

Nous avons accordé une importance égale aux deux degrés de fiabilité partielle dans l'évaluation de la fiabilité globale des composantes. Cette fiabilité globale correspond donc à la moyenne des deux précédentes.

Il est possible que la moyenne des fiabilités partielles se situe entre deux degrés. Pour trancher, on a recours à la fiabilité des conditions supportives. La fiabilité globale des conditions supportives est déterminée de la même manière que pour les conditions suffisantes, soit en fonction de la fiabilité des composante des conditions vérifiées et de la proportion de conditions vérifiées. Si la fiabilité des conditions supportives est au moins "élevée", on attribue à la fiabilité globale le plus élevé des deux degrés entre lesquels on hésitait. Sinon, le degré le plus faible est attribué.

2.4.3.3 Détermination de la fiabilité des réponses

La fiabilité des réponses est ensuite déterminée en fonction de la fiabilité globale des composantes et de la fiabilité des règles. Pour respecter le principe 4, un degré minimal de fiabilité sur les composantes a été établi pour les règles les plus fiables. Ainsi, pour les règles de fiabilité *très élevée*, la fiabilité globale des composantes doit être au moins *élevée* alors que pour les règles de fiabilité *élevée*, elle doit être au moins *moyenne*.

Si la fiabilité des composantes est inférieure à ces valeurs, on recourt aux conditions supportives vérifiées pour indiquer, si possible, un potentiel d'existence du phénomène étudié. Encore une fois, la fiabilité des conditions supportives doit être supérieure ou égale à *élevée*. Les règles déterminant le degré de fiabilité du résultat sont présentées à l'annexe III.

CHAPITRE 3

OUTIL INFORMATIQUE

Introduction

La programmation du système a été effectuée afin de valider la méthodologie de gestion des connaissances. Notre but n'était donc pas de développer un logiciel utilisable tel quel mais plutôt de vérifier la cohérence de la méthodologie établie ainsi que les inadéquations entre la formulation littérale et la formalisation informatique des règles de connaissances et d'inférence.

Dans ce chapitre, nous traitons du langage préconisé, de la structuration informatique des connaissances ainsi que du fonctionnement du programme.

3.1 Langage adopté

Le système a été programmé en Prolog, acronyme de *programmation en logique*. L'approche à la base de Prolog consiste à formaliser un problème par la description des objets qu'il implique et des relations existant entre les objets (Clocksin et Mellish, 1985).

Ces objets et relations sont exprimés, dans le langage informatique, par des faits et des règles. Les règles sont structurées en suivant les lois de la logique, selon laquelle la conclusion d'une règle est vérifiée si ses prémisses le sont. Ainsi, tout problème

descriptible sous une forme logique peut être formalisé et résolu en utilisant Prolog (Bellot, 1994).

On exécute un programme en Prolog en le questionnant à propos des objets et des relations qu'il décrit. Ces questions prennent la forme d'affirmations à vérifier. Pour atteindre ce but, Prolog étudie les faits et les règles enregistrés qui permettent de déterminer si l'affirmation est vraie ou non.

Notons que la stratégie de résolution adoptée par Prolog repose donc sur le principe de chaînage arrière. En général, une étude part d'une conclusion à démontrer par l'application de règles qui en vérifient les prémisses (Giannesini et al., 1985). Cependant, on peut aisément établir une stratégie de chaînage avant, qui part des règles pour déduire les conclusions, comme il a été défini pour certaines étapes du système que nous proposons. Notre outil travaille donc avec un chaînage mixte.

L'approche adoptée par Prolog favorise la recherche et l'acquisition des informations lorsqu'elles sont requises plutôt que l'exécution systématique d'opérations selon une procédure prédéfinie de manière rigoureuse. Cette façon d'utiliser les connaissances s'adapte parfaitement à la problématique de l'identification d'impacts environnementaux dans laquelle la connaissance, au départ, est très incomplète et évolue avec l'avancement des études.

Par ailleurs, l'orientation de Prolog vers les expressions symboliques permet de représenter et de manipuler aisément des informations qualitatives. On peut ainsi exprimer dans un langage quasi naturel les connaissances à intégrer au système en nommant et en décrivant de manière littérale les objets et les relations considérés.

3.2 Structuration informatique des connaissances

Nous avons vu précédemment la formalisation des connaissances intégrées au système, soit les règles d'expertise et les données. Nous exposons maintenant la structure informatique qui a été définie.

3.2.1 Règles d'expertise

Les règles d'expertise provenant des différents domaines concernés par les études d'impact sont regroupées dans une base de règles permanente, c'est-à-dire qui n'est pas modifiée par une étude. Elles inclut des règles étudiant des paramètres d'hydraulique fluviale (débit, vitesse, hauteur, pente d'écoulement), de transport de sédiments (érosion des berges, érosion du lit, charriage, suspension), de qualité biophysique de l'eau (température, turbidité, pH, concentration en matières en suspension, taux d'oxygène dissous, dureté) et de conditions générales de survie, de reproduction et de croissance des poissons. Pour l'instant, les règles y sont enregistrées sans ordre particulier. La base de règles est reproduite à l'annexe V.

Dans la structure définie, une règle d'expertise est d'abord identifiée par sa conclusion. Viennent ensuite le degré de fiabilité qui lui est attribué, la liste des conditions d'endossement puis la liste des conditions d'exclusion (qui reste vide lorsque la règle ne comporte pas de conditions d'exclusion). La figure 3.1 illustre la structure informatique d'une règle.

3.2.2 Données

Les données de départ et celles inférées au cours d'une étude sont enregistrées dans une base évolutive. Comme pour les règles, aucun ordre basé sur un critère logique n'a été

établi; chaque nouvelle donnée est enregistrée en tête de celles déjà contenues dans la base. Une donnée contient le nom de la composante qu'elle exprime, sa valeur ainsi que la fiabilité que l'usager ou le système lui a accordée.

3.3 Fonctionnement du système

Nous exposons maintenant comment le système utilise ces connaissances pour procéder à l'identification des répercussions potentielles des projets de réfection. Les différentes étapes du fonctionnement du système sont: la déclaration, par l'usager, des actions projetées, la sélection des règles d'expertise par lesquelles sont identifiées les répercussions potentielles, la vérification des conditions de ces règles, l'évaluation de la fiabilité des résultats obtenus, l'indication, à l'usager, de ces résultats, leur intégration à la base de données puis l'étude, à partir des premiers résultats, des répercussions suivantes.

3.3.1 Déclaration des actions projetées

L'usager indique les actions projetées pour les travaux de réfection en les sélectionnant parmi celles proposées par le système. À chaque action sélectionnée, il attribue un degré de fiabilité. La figure 3.2 présente un exemple d'écran de saisie des actions projetées. C'est à partir de ces actions, qui sont, par la suite, traitées comme des données, que le système entreprend l'identification des impacts environnementaux en sélectionnant et en appliquant des règles d'expertise.

3.3.2 Sélection des règles d'expertise

Pour identifier les répercussions potentielles des travaux, le système procède par chaînage avant; il examine toutes les règles d'expertise enregistrées dans la base de

connaissance et retient celles dont une condition d'endossement implique l'une des actions déclarées. Ces dernières sont alors considérées comme sources des répercussions potentielles représentées par les conclusions des règles.

3.3.3 Vérification des conditions des règles sélectionnées

Les règles sélectionnées sont ensuite appliquées successivement, c'est-à-dire que leurs conditions sont vérifiées, afin de valider les répercussions potentielles que leur conclusion exprime. Le système part donc, cette fois, d'une conclusion qu'il tente de confirmer, ce qui correspond au principe de chaînage arrière. Comme il a déjà été expliqué, la validation commence par la vérification des conditions d'endossement, la vérification des conditions d'exclusion étant effectuée si aucune décision n'a pu être rendue après l'étude des premières.

Pour vérifier une condition, le système cherche d'abord, dans la base de données, la composante requise. Lorsqu'elle ne s'y trouve pas, il sélectionne et applique une règle pour en déterminer la valeur. Le résultat obtenu de l'application de cette règle intermédiaire est ajouté à la base de données pour éviter de rechercher à nouveau une composante déjà étudiée.

La valeur d'une composante connue (antérieurement incluse dans la base de données ou déterminée par l'application d'une règle) peut vérifier ou non la condition étudiée. Il se peut également que la valeur de la composante reste inconnue, soit parce qu'aucune règle l'étudiant n'est disponible ou que les conditions d'une telle règle ne sont pas vérifiées. Les résultats possibles de la vérification d'une condition sont donc: *vérifiée, non conforme ou inconnue*.

Nous avons vu, également, que la non vérification d'une condition d'endossement nécessaire empêche automatiquement l'endossement de la conclusion de la règle étudiée. Aussi, la vérification des conditions d'endossement pourrait être interrompue dès qu'un tel cas se présente. Cependant, le système, poursuit la vérification afin de signaler à l'usager les connaissances à acquérir si les composantes de certaines conditions sont inconnues ou pour déterminer la fiabilité de l'exclusion en cas de non conformité de la valeur de certaines composantes. L'envoi de messages à l'usager est traité à la sous-section 3.3.5.

3.3.4 Évaluation de la fiabilité des réponses obtenues

Quand toutes les conditions d'une règle ont été vérifiées et qu'une décision a été rendue, soit l'endossement ou l'exclusion de la conclusion, la fiabilité du résultat est évalué. Rappelons que la fiabilité d'un résultat est fonction de celle de la règle de laquelle il est issu ainsi que de celle des composantes que cette règle contient.

Le système commence donc par évaluer la fiabilité globale des composantes. Dans la majorité des cas, elle est déterminée uniquement à partir de la fiabilité des composantes des conditions déterminantes, soit les conditions nécessaires ou suffisantes. Pour chacun de ces deux types de conditions, le système détermine les différents degrés partiels de fiabilité puis le degré de fiabilité globale.

Il se peut que le système doive recourir aux conditions supportives pour modifier la valeur de la fiabilité globale établie dans une règle comportant des conditions suffisantes. En effet, avec des conditions de ce type, on obtient la valeur de la fiabilité globale des composantes en faisant la moyenne de deux fiabilités partielles. Une valeur numérique est d'abord attribuée à chaque fiabilité partielle et la moyenne arithmétique de ces deux valeurs fournit celle de la fiabilité globale. Le résultat se trouve parfois

entre deux degrés (*très élevée, élevée, moyenne ou faible*). La fiabilité des conditions supportives permet alors de trancher.

L'évaluation de la fiabilité des conditions supportives est effectuée de la même manière que pour les conditions suffisantes et, selon la valeur obtenue, la fiabilité globale des conditions suffisantes est augmentée ou diminuée. Ainsi, si la fiabilité des conditions supportives est supérieure ou égale à *élevée*, celle des conditions suffisantes est haussée au plus élevé des deux degrés entre lesquels elle se trouvait. Dans le cas contraire, elle est abaissée au degré inférieur.

La fiabilité des conditions supportives est également utilisée pour tenter d'augmenter la fiabilité globale des composantes, établie à partir des conditions déterminantes, quand celle-ci est *faible* puisque les données peu fiables empêchent souvent de prendre une décision lors de l'étude d'une règle. Ainsi, une répercussion endossée avec une fiabilité *faible* restreint de façon importante la validation des répercussions subséquentes lorsqu'elle est utilisée en tant que donnée. Aussi, quand la fiabilité des conditions supportives est *très élevée*, le système hausse à la valeur *moyenne* la fiabilité globale des composantes.

La fiabilité de la règle est ensuite considérée afin de déterminer la fiabilité du résultat. Comme on l'a déjà vu, pour les règles de fiabilité *très élevée*, la fiabilité des composantes doit être au moins *élevée* et, pour les règles de fiabilité *élevée*, elle doit être au moins *moyenne*. Si la fiabilité des composantes est inférieure au degré requis, donc jugée insuffisante pour l'endossement de la conclusion de la règle, le système a, ici également, recours aux conditions supportives. Lorsque la fiabilité de ces conditions est au moins *élevée*, bien que la conclusion de la règle ne puisse être endossée, cela indique un certain potentiel d'existence de la répercussion validée.

La même situation se présente quand certaines conditions nécessaires impliquent des composantes de sensibilité *forte* dont la fiabilité est *faible* (rappelons qu'une fiabilité *minimale moyenne* a été établie pour les composantes de la classe de sensibilité *forte* des conditions nécessaires). L'étude de la fiabilité des conditions supportives peut permettre d'indiquer, encore une fois, un certain potentiel d'existence de la répercussion.

Dans les autres cas, plus généraux, la fiabilité du résultat est évaluée en considérant la fiabilité de la règle et celle des composantes puis le système indique le résultat à l'usager.

3.3.5 Indication à l'usager du résultat obtenu de l'étude d'une règle

Après l'étude de chaque règle, le système informe l'usager du résultat obtenu. Les messages indiquent:

- le résultat (endorsement ou exclusion de la conclusion de la règle ou indétermination);
- la fiabilité du résultat s'il s'agit d'un endossement ou d'une exclusion;
- la raison pour laquelle un tel résultat est impossible (composantes inconnues ou non conformes, fiabilité insuffisante);
- les connaissances inconnues ou non conformes qui ont empêché l'obtention d'un résultat;
- un certain potentiel d'existence du phénomène étudié même si sa fiabilité est insuffisante pour qu'il soit endossé.

Un exemple de message transmis à l'écran est présenté à la figure 3.3.

Si le résultat est l'endossement de la conclusion de la règle, cette dernière est intégrée à la base de données afin de servir à l'identification des répercussions potentielles suivantes. Cette information est également indiquée à l'usager du système.

3.3.6 Intégration à la base de données des conclusions endossées

Les conclusions qui ont été endossées avec une fiabilité suffisante, soit les répercussions potentielles confirmées, sont intégrées à la base de données avec leur degré de fiabilité. Les répercussions pour lesquelles seulement un potentiel d'existence a été indiqué ne sont pas considérées confirmées; ce résultat n'est pas suffisamment fiable et il ne sert qu'à prévenir l'usager de la possibilité d'une répercussion.

3.3.7 Validation des répercussions potentielles subséquentes

Après que toutes les règles sélectionnées aient été étudiées, le processus de sélection et d'application de règles recommence à partir des répercussions confirmées lors de la première itération. Le système considère maintenant ces répercussions comme sources d'autres répercussions potentielles à valider. Le processus se poursuit ainsi jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de règles disponibles à appliquer.

CHAPITRE 4

VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE ET ÉTUDE DE CAS

Introduction

Nous présentons, dans ce chapitre, les résultats de la validation de la gestion des connaissances et du système qui a été effectuée. Il s'agit, en premier lieu, d'une validation purement informatique visant à s'assurer que le programme reproduit bien la méthodologie théorique qui a été développée.

Ensuite, nous avons voulu vérifier la logique et mesurer la sensibilité de la gestion de la qualité des connaissances lors de l'application d'une règle en faisant varier le type de conditions, le nombre de conditions vérifiées et la fiabilité des données.

Enfin, nous avons examiné le comportement global du système en lui faisant exécuter quelques études types. Rappelons de nouveau que les expertises contenues dans le programme n'ont toutefois pas été validées.

4.1 Validation de la programmation

Pour nous assurer de la conformité de la programmation avec la méthodologie élaborée, nous avons vérifié chacune des règles d'inférence en utilisant des connaissances fictives (règles d'expertise et données) et en comparant les résultats fournis par le système aux résultats théoriques prévus. Nous avons ainsi pu vérifier la sélection des règles d'expertise, à partir des actions projetées, la vérification des conditions de ces règles,

l'envoi de messages à l'usager, l'intégration, à la base de données, des conclusions de règles endossées et la reprise du processus à partir des répercussions potentielles validées.

Une attention particulière a été portée aux règles de gestion de la fiabilité puisque c'est dans cette partie que les risques d'erreur étaient les plus grands. En effet, l'évaluation de la fiabilité d'une réponse nécessite différents calculs de proportions, moyennes, degrés partiels de fiabilité, etc. La programmation de ces calculs pouvait contenir des erreurs qui, en général, n'étaient décelées que par un examen attentif de chaque résultat intermédiaire. Nous avons donc vérifié successivement les règles de gestion de la fiabilité pour les conditions d'endossement et d'exclusion, pour les conditions nécessaires, suffisantes et supportives, pour les diverses classes de sensibilité et les degrés de fiabilité partielle.

4.2 Validation de la gestion de la qualité des connaissances

Nous avons voulu, par cette étape de la validation, vérifier la logique des règles de gestion que nous avions définies et mesurer leur sensibilité à des variations de la qualité des connaissances disponibles. Principalement, nous voulions vérifier, par l'analyse des résultats obtenus, d'une part, que la gestion proposée respectait les principes directeurs que nous avions établis au départ et, d'autre part, que ces principes et les règles de gestion étaient cohérents.

4.2.1 Méthodologie de validation

Nous avons procédé en définissant et en appliquant des règles d'expertise fictives contenant les divers types de conditions. Nous avons posé, pour ces règles, un nombre suffisant de conditions pour permettre de couvrir toutes les possibilités. Ainsi, les règles

utilisées contenaient dix conditions d'endossement nécessaires ou suffisantes, cinq conditions d'endossement supportives et cinq conditions d'exclusion, ce qui est bien davantage que pour la plupart des règles d'expertise réelles intégrées au système. Au total, 78 tests ont été effectués en variant le type, le nombre et la fiabilité des conditions vérifiées.

Certains tests ont été menés en ne considérant que les conditions d'endossement des règles, d'autres avec les conditions d'endossement et les conditions d'exclusion. Certains n'impliquaient que les conditions d'endossement déterminantes (nécessaires ou suffisantes), d'autres impliquaient aussi les conditions d'endossement supportives. Pour reproduire les règles numériques, des degrés de sensibilité variables étaient attribués aux composantes des conditions. Les tests comportaient donc des combinaisons de composantes des différentes classes de sensibilité.

4.2.2 Analyse de la validation

4.2.2.1 Conditions nécessaires

La validation de la gestion de la fiabilité des conditions nécessaires nous a amenés à modifier les proportions requises que nous avions établies au départ pour déterminer le degré de fiabilité de chaque classe de sensibilité. Nous avons constaté que ces exigences étaient trop sévères et nécessitaient une fiabilité individuelle des composantes très élevée pour obtenir, pour les différentes classes de sensibilité, une fiabilité satisfaisante.

Ces modifications apportées, on observe, comme prévu, une influence très marquée des composantes de la classe de sensibilité *forte*. Dans nombre de cas, la fiabilité globale des composantes se voit attribuer le degré de cette classe même si la fiabilité des autres classes est différente (à moins que l'écart ne soit très prononcé).

Également, on remarque l'influence minime de la classe de sensibilité *faible* qui, bien souvent, n'est même pas considérée dans la détermination de la fiabilité globale. Cependant, notons qu'elle permet, parfois, de rehausser la fiabilité globale à la tendance indiquée par la classe *forte* quand la fiabilité (inférieure) de la classe *moyenne* la fait plutôt diminuer.

Ces constatations nous amènent à conclure qu'il est primordial, pour obtenir des résultats de qualité, d'avoir une bonne connaissance des composantes auxquelles les règles ont une forte sensibilité. C'est d'ailleurs ce qu'exprime la définition que nous avons donnée à la classe de sensibilité *forte*.

4.2.2.2 Conditions suffisantes

La validation de la gestion des conditions suffisantes consiste, en résumé, à observer l'influence du nombre de conditions vérifiées et de la fiabilité individuelle des composantes impliquées par ces conditions. Il est évident qu'une forte proportion de conditions vérifiées avec une bonne fiabilité produit une bonne fiabilité globale des composantes et que, à l'inverse, peu de conditions vérifiées, avec une mauvaise fiabilité par surcroît, conduisent à une mauvaise fiabilité globale pour ces mêmes composantes. Il est plus intéressant de vérifier la fiabilité globale des composantes obtenue lorsque plusieurs conditions de la règle sont vérifiées mais avec une fiabilité faible ou encore que peu de conditions sont vérifiées mais avec une bonne fiabilité.

Comme on pouvait s'y attendre, la fiabilité globale n'atteint jamais les degrés extrêmes (*faible* ou *très élevée*), prenant toujours la valeur *moyenne* ou *élevée*. Cela se comprend aisément lorsqu'on considère les deux critères servant à déterminer cette fiabilité globale, soit la proportion de conditions vérifiées et leur fiabilité individuelle. Quand la valeur de l'un de ces deux critères est élevée et que celle de l'autre est faible, l'effet

individuel de chacun est atténué par celui de l'autre. Une telle situation, si elle se répète à plusieurs occasions, peut constituer un problème dans une étude réelle car on se retrouve alors avec une multitude de données plus ou moins fiables qu'on doit utiliser avec prudence.

Encore une fois, le recours aux conditions secondaires - les conditions supportives dans le cas présent - se révèle fort intéressant en ce qu'il permet, assez fréquemment, de hausser le degré de fiabilité des composantes par rapport à celui qui aurait été attribué en ne considérant que les conditions suffisantes.

4.2.2.3 Fiabilité de la règle

Le dernier aspect étudié est l'influence de la fiabilité des règles sur la fiabilité du résultat. La validation montre que, dans de nombreux cas, la fiabilité des composantes est insuffisante pour les règles les plus fiables, soit celles de fiabilité *très élevée*. En effet, nous avons établi à *élevée* le degré minimal de fiabilité globale des composantes pour ces règles et il est fréquent de n'obtenir qu'une fiabilité *moyenne* des composantes. Toutefois, cette exigence est nécessaire pour respecter le quatrième principe de gestion de la fiabilité.

4.2.3 Conclusions

La validation a permis de confirmer, après de légers ajustements, la cohérence de la méthodologie de gestion développée. Les degrés de fiabilité obtenus sont comparables à ceux estimés intuitivement à partir des données, ce qui respecte l'objectif fixé de reproduire des mécanismes de raisonnement logiques et pragmatiques.

4.3 Étude de cas types

Cette étape de la validation présente les résultats de l'étude de quelques cas. Il ne s'agit donc pas d'une validation systématique de tous les cas possibles. Les études réalisées ont été définies dans le but de vérifier le fonctionnement du système dans diverses situations. Par exemple, nous avons fait varier les données de départ de façon à ce que certaines répercussions potentielles soient confirmées dans un cas et rejetées ou indéterminées dans d'autres. L'analyse des résultats obtenus à chaque étude permet de mesurer l'influence de ces modifications.

4.3.1 Première étude: dragage du lit du cours d'eau et nettoyage des fonds

4.3.1.1 Présentation des données de départ et des résultats

Pour la première étude, les travaux à réaliser consistent en l'aménagement des voies d'écoulement. Les actions projetées sont le dragage du lit du cours d'eau et le nettoyage des fonds, toutes deux ayant une fiabilité élevée.

L'identification des répercussions potentielles des actions projetées s'effectue en sélectionnant les règles d'expertise qui incluent, parmi leurs conditions d'endossement, l'une de ces actions. Le système commence donc par sélectionner toutes les règles dont une des conditions d'endossement est "dragage du lit" ou "nettoyage des fonds".

Quand toutes les règles ont été examinées, le système débute l'application de celles qui ont été retenues. Les conclusions endossées sont considérées comme des répercussions confirmées. Elles sont intégrées à la base de données puis sont étudiées en tant que sources d'autres répercussions potentielles. Le processus se poursuit jusqu'à ce que les répercussions finales aient été identifiées puis validées.

Les données de départ utilisées pour cette étude sont présentées au tableau 4.1 et les répercussions confirmées sont présentées au tableau 4.2. Par souci de clarté, le suivi du raisonnement effectué par le système est également présenté sous forme de tableau. Les résultats obtenus à chaque étape sont ainsi regroupés dans le tableau 4.3.

4.3.1.2 Analyse des résultats

Un nombre relativement grand de répercussions potentielles confirmées a été établi. Les données de départ ont été définies dans ce but: la majorité était connue, avec la valeur requise et une bonne fiabilité. Les études suivantes, en modifiant les données de départ, permettront d'observer des résultats différents.

Malgré la connaissance de qualité apparemment élevée, la fiabilité des répercussions confirmées décroît constamment avec l'avancement de l'étude. Ce phénomène sera analysé au chapitre suivant. Par ailleurs, bien que de nombreuses répercussions aient été confirmées, quelques unes ont, au contraire, été rejetées ou sont restées indéterminées.

Ainsi, on note que la conclusion de la règle “augmentation de la luminosité” a été étudiée. Elle n'a cependant pas été endossée car la répercussion “réduction de la végétation aquatique”, à partir de laquelle la règle a été sélectionnée, ne constitue qu'une condition supportive à la conclusion de la règle et les conditions déterminantes n'ont pas été vérifiées. D'ailleurs, la conclusion contraire, soit “diminution de la luminosité” a été endossée par la suite.

Ensuite, la conclusion “charriage des sédiments du lit” a été exclue, les valeurs des composantes qu'elle requiert n'étant pas conformes aux énoncés des conditions. Ce résultat confirme le bon fonctionnement du système (du moins pour cette règle) car il est basé sur un critère exclusif de distinction entre le transport des sédiments par charriage

ou en suspension. C'est-à-dire que, selon ce critère, si la suspension de sédiments est confirmée, comme c'est le cas dans la présente étude, le charriage ne peut l'être. Une réponse plus exacte, toutefois, serait que le transport des sédiments se fait surtout en suspension, étant donné la faible valeur du D_{50} des sédiments, et que peu de sédiments sont transportés par charriage.

Également, la valeur de la "charge sédimentaire transportée en suspension" n'a pu être déterminée car une composante nécessaire à son calcul était inconnue. Il s'agit de la vitesse de l'écoulement, indéterminée en raison de la fiabilité insuffisante des composantes requises.

Enfin, la répercussion "augmentation de la dureté" est aussi restée indéterminée. La condition d'endossement nécessaire "augmentation de la concentration en ions Ca^{2+} " n'ayant été vérifiée qu'avec une fiabilité faible, la qualité des connaissances a été jugée insuffisante pour endosser la conclusion de la règle.

4.3.2 Deuxième étude: déboisement des berges du cours d'eau

4.3.2.1 Présentation des données de départ et des résultats

Les travaux envisagés concernent l'aménagement des berges du cours d'eau. On projette le déboisement de ces berges (fiabilité élevée). Les données de départ sont les mêmes que pour la première étude. Le tableau 4.4 présente les répercussions confirmées et on peut suivre le déroulement de l'étude à l'aide du tableau 4.5.

4.3.2.2 Analyse des résultats

Cette seconde étude n'a pas permis de confirmer autant de répercussions que la première. On peut l'expliquer, principalement, par la différence de fiabilité entre les valeurs des diamètres des sédiments des berges et de ceux du lit du cours d'eau. Alors que la fiabilité du D_{50} des sédiments du lit est élevée, celle du D_{50} des sédiments des berges n'est que *moyenne*. Le diamètre moyen des sédiments étant requis par un grand nombre de règles en transport de sédiments, une plus ou moins bonne fiabilité de ce paramètre a une forte influence dans une étude.

4.3.3 Troisième étude: dragage du lit et déboisement des berges du cours d'eau

4.3.3.1 Présentation des données de départ et des résultats

Les travaux considérés sont l'aménagement des voies d'écoulement et des berges du cours d'eau. Les actions projetées sont le dragage du lit et le déboisement des berges, et on leur accorde une fiabilité élevée. Les données de départ restent les mêmes sauf en ce qui concerne la taille des sédiments du lit; le D_{50} passe à la valeur 4 mm et le D_{90} à la valeur 7 mm. Les répercussions confirmées sont présentées au tableau 4.6 et le tableau 4.7 montre le déroulement de l'étude.

4.3.3.2 Analyse des résultats

Les actions projetées pour cette étude étant les mêmes que celles des études précédentes, les premières répercussions identifiées et confirmées sont également les mêmes. Toutefois, l'augmentation du diamètre moyen des sédiments du lit du cours d'eau entraîne le transport de ces sédiments par charriage plutôt qu'en suspension. De ce fait, la turbidité de l'eau, contrairement à ce qui se produisait dans la première étude,

n'est pas accrue. Par contre, le chargement des sédiments peut provoquer le colmatage de frayères.

Enfin, on note, ici également, une tendance à la baisse de la fiabilité des réponses avec l'avancement de l'étude. Comme il a été mentionné précédemment, ce fait sera examiné au chapitre suivant présentant l'analyse globale du système ainsi que nos recommandations.

4.3.4 Quatrième étude: influence de la baisse de fiabilité des données de départ

4.3.4.1 Présentation des données de départ et des résultats

Dans cette étude, nous examinerons l'effet d'une diminution importante de la qualité de la connaissance des données de départ. Les actions projetées incluent l'ensemble des trois actions et les données suivantes sont modifiées:

- la fiabilité de la composante "pluies fortes" passe de *élevée à moyenne*;
- la fiabilité de la composante "sol des berges saturé" passe de *élevée à faible*;
- la valeur de la composante "D₅₀ des sédiments du lit" est ramenée à 0,8 millimètre et sa fiabilité passe de *élevée à moyenne*;
- la fiabilité de la composante "D₉₀ des sédiments du lit" passe de *élevée à moyenne*;
- la valeur de la composante "teneur du sol en carbonates" est inconnue.

Le tableau 4.8 présente les répercussions confirmées et on peut suivre le déroulement de l'étude au tableau 4.9.

4.3.4.2 Analyse des résultats

Malgré le fait que les trois actions étudiées soient projetées dans la dernière étude, peu de répercussions ont pu être confirmées étant donné la fiabilité relativement faible des données de départ. Ainsi, après la confirmation de la mise en mouvement des sédiments du lit, aucune répercussion provenant des travaux d'aménagement des voies d'écoulement n'a été confirmée. De même, l'identification des répercussions des travaux d'aménagement des berges n'a pu être poursuivie après la confirmation, avec une fiabilité faible, de l'érosion des berges par le vent.

La réduction de la fiabilité des données, bien qu'appréciable, aurait pu être plus importante. La diminution considérable de la qualité des résultats qui en résulte montre donc une forte sensibilité de la gestion des connaissances à des variations de la qualité de ces connaissances.

4.3.5 Conclusions

Les études de cas réalisées ont permis de vérifier le fonctionnement global du système. L'enchaînement des règles d'inférence et l'application des règles d'expertise sont exécutés correctement et la gestion de la qualité des connaissances fournit des résultats cohérents. Cette dernière se révèle toutefois très (trop) sensible à la diminution de la qualité des connaissances. À la lumière de ces résultats, il serait pertinent de revoir les règles de gestion établies et d'y apporter quelques modifications. Nous en discutons au prochain chapitre.

CHAPITRE 5

ANALYSE ET RECOMMANDATIONS

Introduction

La validation de la méthodologie de gestion des connaissances développée et, particulièrement, les études de cas, ont suscité de nombreuses réflexions. Ces réflexions portent notamment sur la gestion de la qualité des connaissances et l'intégration de nouveaux paramètres d'évaluation afin de rendre les études plus complètes. Ceci nous amène à proposer quelques pistes qui, nous l'espérons, seront profitables à de futurs travaux portant sur le développement d'un outil informatique en évaluation environnementale.

5.1 Règles d'expertise

D'abord, comme il a été précisé à maintes reprises dans ce rapport, les règles d'expertise intégrées au système n'ont pas fait l'objet d'une validation scientifique et n'ont été utilisées qu'aux fins de validation de la gestion des connaissances. Aussi, serait-il nécessaire, afin de produire des études réalistes, qu'elles soient fondées sur des connaissances validées.

En second lieu, les règles d'expertise et les données utilisées par le système ne concernent que certaines composantes biophysiques du milieu aquatique. Cependant, des travaux de réfection de centrales hydroélectriques peuvent également affecter les composantes terrestres du milieu biophysique ainsi que le milieu humain. Pour

reproduire pleinement l'aspect interdisciplinaire d'une étude d'impact, l'intégration de connaissances de tous les milieux affectés, devient alors indispensable.

L'intégration des expertises de tous les domaines permettrait d'identifier l'ensemble des interactions entre les composantes des divers milieux constituant un écosystème et de vraiment mettre en relief les enjeux fondamentaux à considérer lors de l'étude d'un projet.

5.2 Évaluation de l'importance des répercussions

Une des hypothèses à la base des études d'impacts environnementaux est la considération de l'importance des éléments impliqués. Dans le système proposé, cet aspect a été abordé avec les différents types de conditions et la notion de sensibilité accordée aux composantes environnementales dans les règles d'expertise.

Toutefois, il serait intéressant, pour produire des études plus complètes, de procéder à l'évaluation de l'importance des répercussions environnementales potentielles identifiées puis validées par le système. Une telle évaluation permettrait de classer les répercussions selon leur importance et d'étudier plus précisément, en priorité, celles affectant de manière significative les composantes environnementales qui constituent les principaux enjeux.

La notion d'importance d'une répercussion environnementale englobe deux aspects distincts. D'une part, elle repose sur l'*envergure* de la répercussion. L'envergure est une évaluation combinée de l'*intensité* du phénomène considéré, de son *ampleur*, c'est-à-dire son étendue spatiale, et de sa *durée*.

L'envergure d'une répercussion dépend principalement de l'envergure de sa source mais, également, de la sensibilité, au phénomène source, de la composante environnementale affectée (il s'agit de la même sensibilité que celle considérée dans la gestion de la fiabilité). Rappelons que, dans la méthodologie que nous avons établie, les composantes environnementales impliquées par les conditions d'endossement d'une règle d'expertise sont considérées comme les sources du phénomène exprimé par la conclusion de la règle. En ajoutant les paramètres d'évaluation de l'importance aux caractéristiques des conditions déjà considérées, soit leur type, leur fiabilité et leur sensibilité, une gestion de l'importance, analogue à la gestion de la fiabilité, pourrait être élaborée.

D'autre part, l'importance d'une répercussion dépend de *l'intérêt environnemental* que présente la composante affectée. Nous entendons, par intérêt environnemental d'une composante, la valeur, objective ou subjective, accordée à la composante en question par les spécialistes ou par les publics.

Ainsi, alors que l'envergure d'une répercussion est évaluée à partir de connaissances scientifiques, l'évaluation de l'intérêt environnemental est plutôt basée sur les valeurs promues par une société ou certaines portions de celle-ci (Sadar, 1994). Les composantes présentant un intérêt environnemental élevé sont celles appelées *éléments valorisés de l'écosystème (EVE)*.

L'intérêt peut provenir de la rareté de la composante, de son rôle fondamental dans le fonctionnement de l'écosystème concerné ou dans les activités socio-économiques, de sa grande influence sur d'autres composantes du milieu (source de nombreuses autres répercussions), etc. Il ne dépend donc pas uniquement de la nature de la composante environnementale mais également du contexte dans lequel celle-ci est considérée (Canter, 1996).

Contrairement à la sensibilité, nous considérons que l'intérêt environnemental d'une composante ne dépend pas de la répercussion qui l'affecte. Il s'agit plutôt d'une caractéristique constante des diverses composantes du milieu qui doit être incluse à la base de connaissances au début de l'étude. Cette caractéristique serait intégrée à la gestion de l'importance des répercussions, tout comme l'envergure des phénomènes sources et la sensibilité des composantes à ces phénomènes sources.

L'orientation donnée aux études devrait permettre un examen plus approfondi des impacts identifiés comme étant les plus significatifs après l'évaluation de ces paramètres.

5.3 Critères et mécanismes d'arrêt d'une étude

Tel qu'il a été indiqué au chapitre 1, les études réalisées par le système informatique prennent fin lorsque la base de règles d'expertise disponibles a été épuisée. Tous conviendront qu'il serait plus approprié de baser l'interruption d'une étude sur un critère rationnel. Comme nous l'avons brièvement proposé précédemment, ce critère pourrait reposer sur l'évolution de la qualité des connaissances avec l'avancement d'une étude.

Ainsi, on pourrait considérer que l'obtention, pour plusieurs itérations consécutives, d'une fiabilité en deçà d'un certain seuil critique indique une connaissance globale insuffisante des composantes mises en jeu. Le système en informerait l'usager et mettrait fin à l'étude.

On peut également envisager l'arrêt du processus d'identification des impacts en fonction de la précision désirée pour l'étude. En effet, la précision requise pour les résultats fournis diffère selon qu'une étude se situe à l'étape préliminaire, à celle de

l'avant-projet ou à la phase d'exécution. La précision des informations augmentant, généralement, avec la progression d'une étude, cette dernière pourrait être interrompue dès que la précision requise, indiquée par l'usager au début de l'étude, serait atteinte.

5.4 Gestion de la fiabilité des connaissances

Les études de cas présentées au chapitre précédent ont montré que la méthodologie de gestion de la fiabilité conduit presque systématiquement à une baisse trop rapide de la fiabilité des résultats. L'orientation donnée à la gestion, principalement deux des principes directeurs, explique ce phénomène.

D'abord, le premier de ces deux principes établit que la fiabilité maximale d'une réponse est égale à la fiabilité de la règle dont elle est issue. Ensuite, le second principe énonce que, pour que cette fiabilité maximale soit atteinte, les composantes impliquées par la règle doivent toutes être très fiables. Si cette condition n'est pas respectée, la fiabilité du résultat s'en trouve diminuée par rapport à celle de la règle.

Comme peu de règles d'expertise, exception faite des règles numériques, ont une fiabilité *très élevée*, la fiabilité des résultats est pratiquement toujours inférieure à *très élevée*. Lorsqu'ils sont utilisés en tant que données dans les règles appliquées subséquemment, ils produisent donc une fiabilité inférieure à celle des règles. Ceci est particulièrement fréquent lors de l'application de règles contenant des conditions nécessaires avec lesquelles la fiabilité globale des composantes ne peut être supérieure à leur fiabilité individuelle.

Il serait donc pertinent de revoir les règles de gestion de la fiabilité de façon à les rendre moins contraignantes. Dans cette optique, une des possibilités à examiner serait la diminution de la fiabilité individuelle requise pour les composantes. De plus, la fiabilité

des règles d'expertise ayant une influence déterminante sur celle de la réponse, l'établissement des degrés de fiabilité de règles validées devrait faire l'objet d'une attention particulière.

Il faudrait veiller, toutefois, à ne pas enlever toute sensibilité à la gestion. En effet, le but d'une gestion de la qualité des connaissances est de permettre de discriminer entre des connaissances de bonne qualité et celles de qualité insuffisante, ce qui ne peut être atteint qu'avec un minimum de sensibilité. Une gestion ayant une forte sensibilité est donc préférable à une gestion très peu sensible.

5.5 Caractérisation des travaux envisagés

Enfin, pour produire des études complètes, il faudrait considérer l'ensemble des travaux envisagés lors de réfections de centrales hydroélectriques. La décomposition en actions élémentaires de tous les travaux permettrait l'identification de la totalité des répercussions environnementales potentielles.

Une décomposition précise des travaux devrait indiquer la localisation et la durée des actions projetées. En considérant ces informations, les répercussions seraient identifiées, validées et évaluées beaucoup plus précisément. Toutefois, pour y arriver, les règles d'expertise doivent aussi intégrer ces paramètres. Il faut alors déterminer à quel moment intervient la localisation des actions dans le processus d'identification et de validation des répercussions.

D'une part, elle peut être considérée comme un critère de sélection des règles en étant incluse dans la conclusion de ces dernières. Par exemple, à partir de l'action projetée "dragage du lit en aval du barrage", le système sélectionnerait la règle "transport des sédiments du lit en aval du barrage". Différentes règles étudiant un même phénomène

doivent alors être définies en fonction de la localisation possible du phénomène en question.

D'autre part, la localisation d'une action peut entrer en jeu au cours de la validation d'une répercussion. La déclaration de l'action mentionnée précédemment conduirait alors à la sélection de l'unique règle étudiant le transport des sédiments du lit et la conclusion serait endossée si la vérification des conditions confirmait la présence des composantes requises en aval du barrage.

CONCLUSIONS

L'établissement d'une nouvelle méthodologie de gestion des connaissances reliées à l'identification des répercussions environnementales lors de réfections de centrales hydroélectriques constituait le principal objectif du projet présenté. Pour bien s'adapter à la problématique étudiée, cette méthodologie devait assurer l'intégration des diverses expertises concernées tant au plan technique qu'environnemental, la considération de l'importance relative des connaissances impliquées et, particulièrement, la gestion d'informations qualitatives, parfois subjectives et pratiquement toujours incertaines.

Le second objectif des travaux était de développer un système informatisé d'aide à la décision dont la structuration des connaissances serait basée sur la méthodologie élaborée. La programmation de ce système devait permettre de valider les principes définis en vérifiant la logique.

Le premier objectif a été pleinement atteint. En effet, la gestion des connaissances reproduit les principales étapes du raisonnement suivi par les experts et respecte les hypothèses émises en ce qui concerne l'évaluation environnementale.

La gestion de la qualité des informations utilisées et inférées au cours d'une étude, par ses règles pragmatiques et universelles, répond aux attentes fixées. Elle permet l'intégration d'informations tant qualitatives que numériques et de fiabilité fort variable. Elle assure ainsi l'amélioration progressive de la connaissance et oriente la recherche d'information lorsque celle-ci est déficiente. De plus, les tests de validation ont confirmé la cohérence de la gestion et ont mis en évidence sa sensibilité à des variations de la qualité des connaissances.

Ceci nous amène à discuter du deuxième objectif du projet, soit la validation de la méthodologie par son intégration à un outil informatique. Bien que le système développé soit incomplet et requière des travaux supplémentaires pour produire des études réalistes, son utilisation a permis de vérifier les règles d'inférence de la méthodologie de gestion des connaissances.

Ainsi, la sélection des règles d'expertise à partir des sources de répercussions potentielles, la vérification des conditions d'application de ces règles, l'évaluation de la fiabilité des résultats obtenus et l'intégration de ces résultats à la base de données ont été validées.

Une réserve a été émise à propos de la forte sensibilité de la gestion de la qualité des connaissances. Lorsque la fiabilité des connaissances de départ est plus ou moins bonne, la fiabilité des résultats décroît rapidement avec l'enchaînement des règles d'expertise. Une telle sensibilité est souhaitée, nécessaire même, mais restreint de façon appréciable les études effectuées par le système.

De plus, l'intégration au système de règles d'expertise validées et la caractérisation complète des activités de réfection sont essentielles à la production d'études réelles. La réalisation de ces deux étapes pourrait ainsi faire l'objet de futurs travaux de recherche.

La méthodologie de gestion des connaissances développée, si elle est bien adaptée à l'évaluation environnementale de petits projets, est difficilement applicable à des projets de très grande envergure, par exemple, les aménagements du complexe hydroélectrique Grande Baleine. À cette échelle, les études environnementales requièrent une quantité d'informations que le système n'arriverait pas à étudier de manière intégrée - même en ne considérant que les principaux enjeux - sans en rester à des conclusions générales pour l'obtention desquelles l'utilisation d'un outil de ce genre n'est pas pertinente.

Nous entrevoyons, toutefois, la possibilité de transposer le formalisme établi à une problématique autre que celle des études environnementales, soit la planification des mesures d'urgence en cas de catastrophe. Notre gestion ainsi appliquée au domaine de la protection civile permettrait d'identifier, à partir d'un élément déclencheur - par exemple, le bris d'un barrage ou l'incendie d'un réservoir de pétrole - et de la caractérisation de la région où il se produit, les menaces potentielles pour la collectivité.

Dans ce domaine, il importe de concentrer les études sur les grands enjeux que constituent la sécurité et la santé de la population. La définition de telles priorités restreint le champ d'étude aux considérations fondamentales, évitant ainsi de noyer les éléments importants dans un flot d'informations moins pertinentes, comme on l'a parfois reproché aux études d'impacts environnementaux.

BIBLIOGRAPHIE

BEANLANDS, G.E. et DUINKER, P.N. (1983). *Un cadre écologique pour l'évaluation environnementale au Canada*, Institute for Resource and Environmental Studies, Université Dalhousie, Halifax et Bureau fédéral d'examen des évaluations environnementales, Hull, 132 p.

BELLOT, P. (1994). *Objectif Prolog*, Masson, Paris, 151 p.

BÉRON, P., VALIQUETTE, L. et PATRY, G. (1979). *Indices de qualité des eaux du G.R.É.M.U.*, Département de génie civil, Groupe de recherche sur l'eau en milieu urbain, École Polytechnique de Montréal, 90 p.

BONNEFILLE, R. (1980). *Cours d'hydraulique maritime*, 2^e éd. révisée, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, Masson, Paris, 171 p.

CANTER, L.W. (1996). *Environmental impact assessment*, 2^e éd., McGraw-Hill, New York, 660 p.

CLOCKSIN, W.F. et MELLISH, C.S. (1985). *Programmer en Prolog*, Eyrolles, Paris, 303 p.

COHEN, P.R. (1986). *Heuristic reasoning about uncertainty: an artificial intelligence approach*, Pitman, Londres, 204 p.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA (1983). *Les conséquences écologiques du dragage et de l'élimination des résidus du dragage*, Comité associé sur les critères scientifiques concernant l'état de l'environnement, préparé par C.D. Levings pour le sous-comité de l'eau, Publication CNRC, 150 p.

CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DES RESSOURCES ET DE L'ENVIRONNEMENT (1988). *L'évaluation environnementale au Canada: sommaire des pratiques actuelles*. Bureau fédéral d'examen des évaluations environnementales, 57 p.

FRENETTE, M. (1993). *Aménagement des ressources hydriques*, Notes de cours, Département de génie civil, Université Laval, Québec, 57 p.

GIANNESINI, F., KANOUL, H., PASERO, R. et VAN CANEGHEM, M. (1985). *Prolog*, InterÉditions, Paris, 318 p.

HENDERSON, F.M. (1966). *Open channel flow*, Macmillan Series in Civil Engineering, 522 p.

HERBICH, J.B. (1992). *Handbook of dredging engineering*, McGraw-Hill, New York, 740 p.

JACOBS, P. (1993). L'évaluation environnementale: défis actuels et orientations futures, tiré de 'Delisle, C.E., Bouchard, M.A. et Lauzon, L., eds., 1993, *L'évaluation environnementale: un outil essentiel de planification*; Actes du 17e Congrès annuel de l'Association des biologistes du Québec; Sainte-Foy, novembre 1992; Université de Montréal, Collection Environnement, vol. 15", 440 p., pp. 5-15.

JULIEN, B. et al. (1991). *An environmental impact identification system*, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, 17 p.

LELIÈVRE, M. et SÉRODES, J.-B. (1993). *Nouvelle approche pour l'évaluation environnementale: identification des enjeux environnementaux d'un projet linéaire*. conférence pour le Colloque régional sur l'environnement "Vert une rentabilité propre: compétitivité et environnement", Université Laval, Québec, 23 septembre 1993, 14 p.

OUZILLEAU, F. (1988). *Développement d'un système à base de connaissances pour l'évaluation des impacts environnementaux*, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 160 p.

PELIZZARI, C. (1994). *Évaluation et caractérisation des impacts en rivière de différents paramètres physico-chimiques*, Rapport de stage, École Polytechnique de Montréal, 66p.

PODESTO, M. (1993). *Aide informatisée à l'identification et à l'évaluation des répercussions environnementales appréhendées lors de réfections de centrales hydroélectriques*, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, 132 p.

RITTENHOUSE, R.C. (1986). Upgrading: new life for hydroelectric systems, *Power Engineering*, vol. 90, no. 3, pp. 18-24.

ROBERT, B. (1989). *Un système d'aide à la conception hydraulique*, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 130 p.

ROBERT, B. et PODESTO, M. (1995). Environmental assessment: transition of a decision support system to the environmental management of projects, *International Association for Impact Assessment*, vol. 13, no. 2, pp. 117-133.

ROCHON, Y. (1993). Application de l'informatique à l'évaluation environnementale, tiré de 'Delisle, C.E., Bouchard, M.A. et Lauzon, L., eds., 1993, *L'évaluation environnementale: un outil essentiel de planification*; Actes du 17e Congrès annuel de l'Association des biologistes du Québec; Sainte-Foy, novembre 1992; Université de Montréal, Collection Environnement, vol. 15", 440 p., pp. 159-176.

ROLSTON, D.W. (1988). *Principles of artificial intelligence and expert systems development*, McGraw-Hill Book Company, New York, 257 p.

SADAR, M.H. (1994). *Évaluation des impacts environnementaux*, Carleton University Press pour Impact Assessment Centre, Carleton University, Ottawa, 153 p.

STELCZER, K. (1981). *Bed-load transport: theory and practice*, Water Resources Publications, 295 p.

VAN RIJN, L.C. (1985). *Sediment transport*, Delft Hydraulics Laboratory, Publication no. 334, 74 p.

YALIN, M.S. (1977). *Mechanics of sediment transport*, 2^e éd., Pergamon Press, 298 p.

ANNEXE I**LEXIQUE**

LEXIQUE

Composante environnementale: élément du milieu naturel ou humain susceptible d'être affecté par les travaux de réfection.

Composante technique: composante décrivant les travaux à effectuer ou les aménagements à réhabiliter.

Conclusion d'une règle: phénomène susceptible de se produire sur le site des travaux et que la règle en question permet d'étudier.

Condition d'application d'une règle: affirmation exprimant la valeur qu'une composante environnementale doit avoir pour endosser ou exclure la conclusion de la règle étudiée.

Condition d'endossement: condition d'application dont la vérification concourt à l'endossement de la conclusion de la règle qui la contient.

Condition d'exclusion: condition d'application dont la vérification concourt à l'exclusion de la conclusion de la règle qui la contient.

Condition nécessaire: condition d'application (d'endossement ou d'exclusion) qui doit obligatoirement être vérifiée pour que la conclusion de la règle soit endossée ou exclue. Si plusieurs conditions nécessaires sont présentes dans une règle, elles doivent toutes être vérifiées pour permettre l'endossement ou l'exclusion. Elles contiennent les composantes principales d'une règle.

Condition suffisante: condition d'application (d'endossement ou d'exclusion) dont la vérification, à elle seule, permet l'endossement l'endossement ou l'exclusion de la conclusion de la règle qui la contient. Ainsi, la conclusion de la règle est endossée (exclue) dès qu'une des conditions d'endossement (d'exclusion) suffisantes est vérifiée. Elles contiennent les composantes principales d'une règle.

Condition supportive: condition d'application d'endossement dont la vérification ne permet pas de prendre une décision (endossement ou exclusion de la conclusion de la règle) mais renforce une décision arrêtée à partir des conditions nécessaires ou suffisantes. Elles contiennent les composantes secondaires d'une règle. Les conditions de ce type sont aussi utilisées pour indiquer un potentiel d'existence du phénomène exprimé par la conclusion d'une règle qui n'a pu être endossée ou exclue par l'étude des conditions nécessaires ou suffisantes.

Endossement de la conclusion d'une règle: confirmation, suite à la vérification des conditions d'endossement de la règle, de l'existence du phénomène étudié qui constitue la conclusion de cette règle.

Étude: processus d'examen au cours duquel les incidences d'un projet sur les milieux naturel et humain sont identifiées et évaluées. La précision de l'étude dépend de la phase du projet à laquelle elle se situe, soit la phase préliminaire, d'avant-projet ou d'exécution du projet.

Exclusion de la conclusion d'une règle: preuve de l'inexistence du phénomène étudié, suite à la non vérification des conditions d'endossement qui rend impossible l'acceptation de la conclusion de la règle ou suite à la vérification des conditions d'exclusion.

Fiabilité d'une composante: mesure de la confiance qu'on accorde à la valeur de la composante.

Fiabilité d'une règle: mesure de l'exactitude avec laquelle la règle représente le phénomène décrit par sa conclusion.

Importance relative d'une composante dans une règle: mesure de l'influence qu'a la composante sur le phénomène décrit par la conclusion de la règle.

Règle d'expertise: mécanisme, numérique ou qualitatif, mettant en relation divers paramètres techniques et environnementaux connus afin d'en inférer de nouveaux. Les paramètres sont intégrés à l'intérieur des règles sous forme de conditions qui doivent être vérifiées pour que la conclusion de la règle soit acceptée.

Répercussion environnementale: incidence, directe ou indirecte, des activités de réfection sur les composantes environnementales.

Sensibilité d'une règle à une composante: dans une règle numérique, évaluation de l'importance relative des composantes. Elle est mesurée par l'importance de la variation de la valeur de la réponse fournie par la règle en fonction d'une variation de la valeur de la composante.

Source d'une répercussion environnementale: phénomène, physique ou biologique, naturel ou non, qui a une incidence sur le milieu récepteur. Les actions projetées constituent les sources des premières répercussions identifiées.

ANNEXE II

REGROUPEMENT DES FIGURES

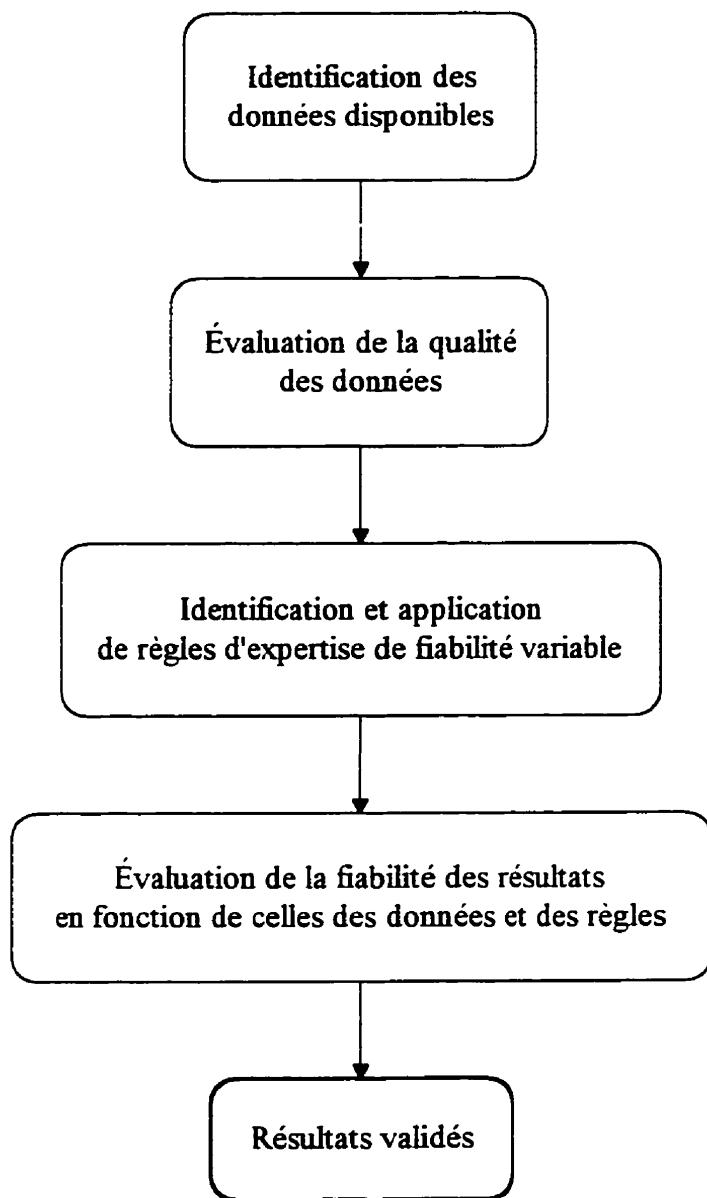


Figure 2.1 Principales étapes du raisonnement des experts

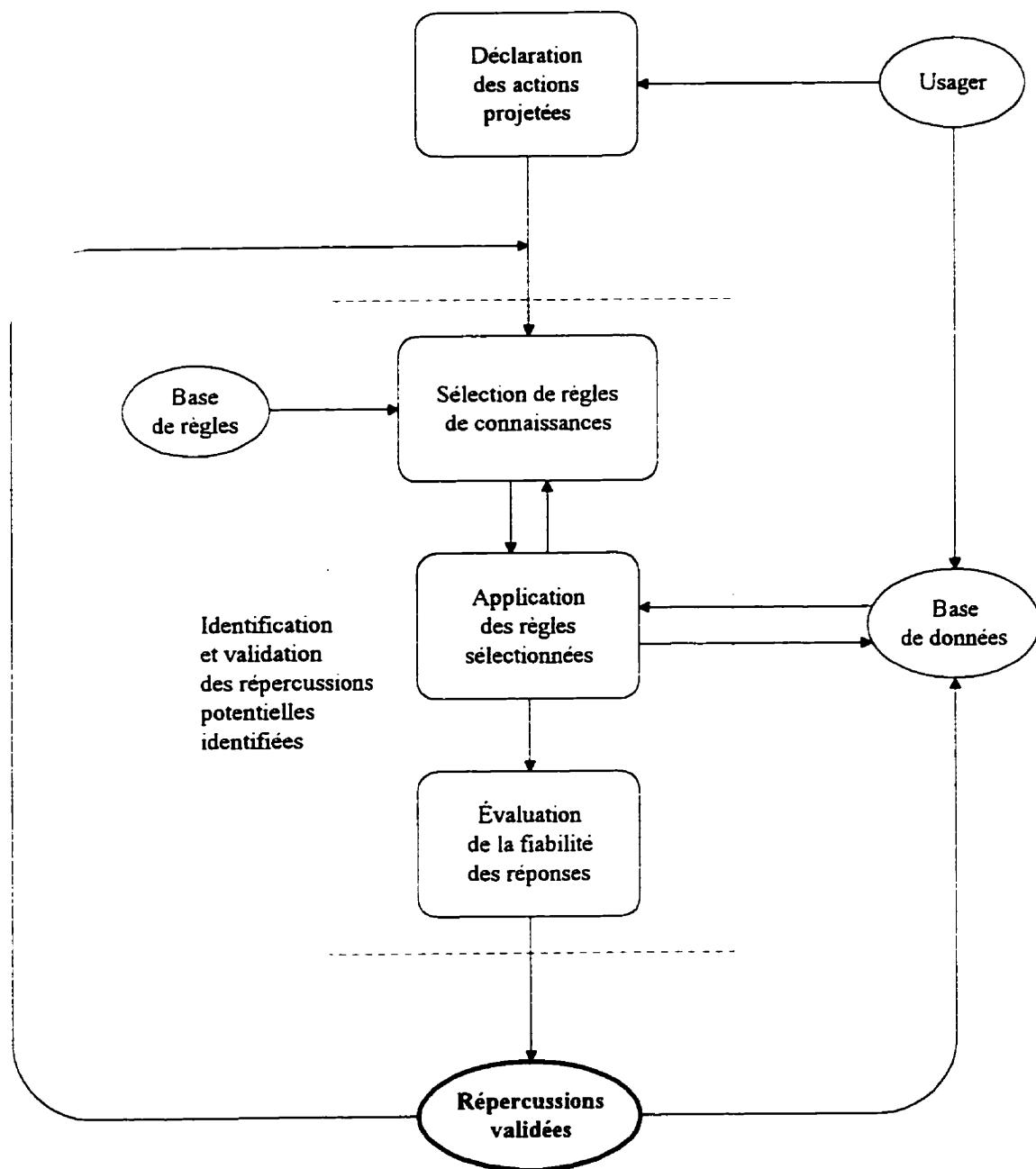


Figure 2.2 Nouvelle structure de raisonnement

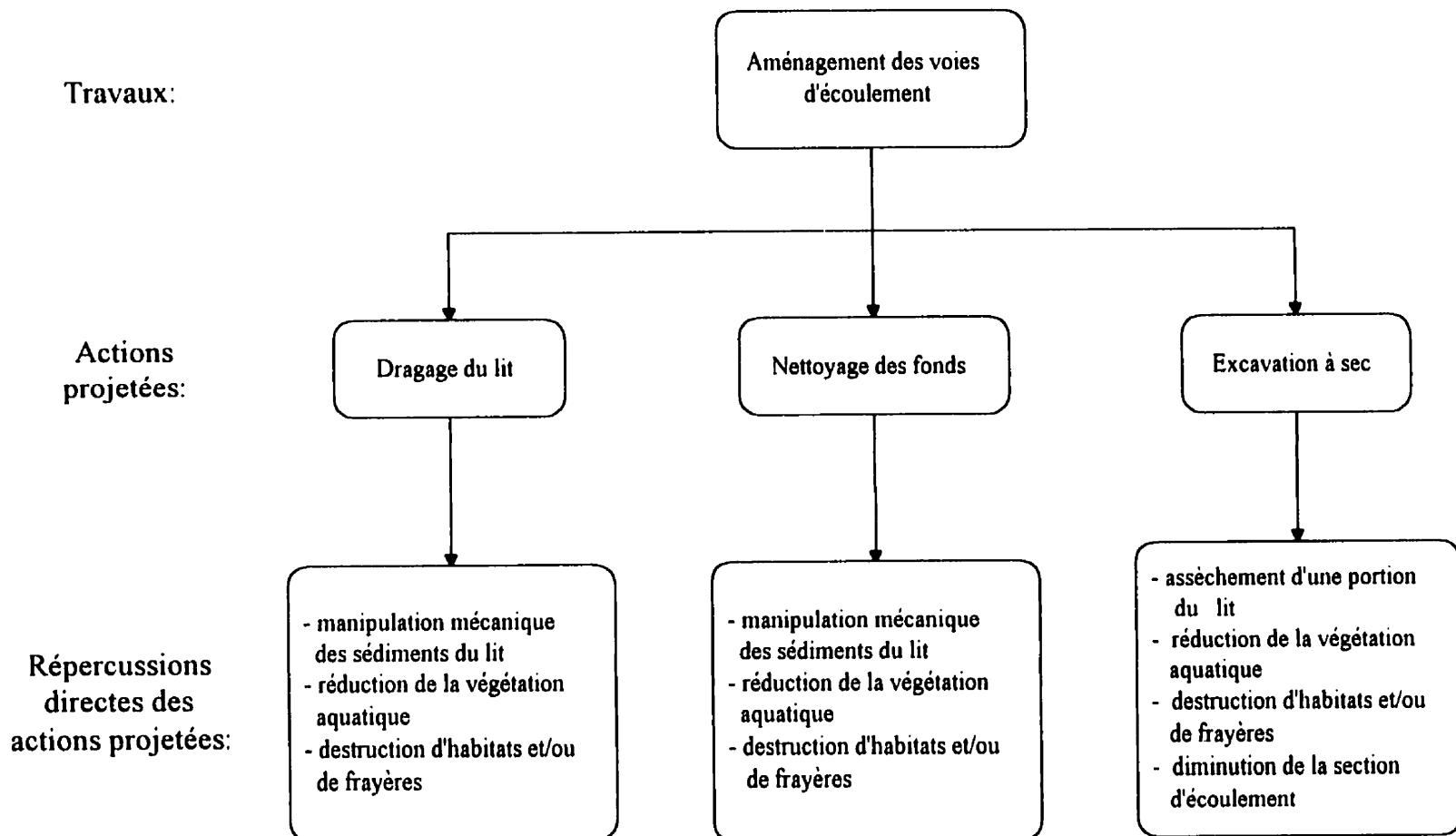


Figure 2.3 Exemple de la décomposition des travaux en actions élémentaires et identification de leurs répercussions directes

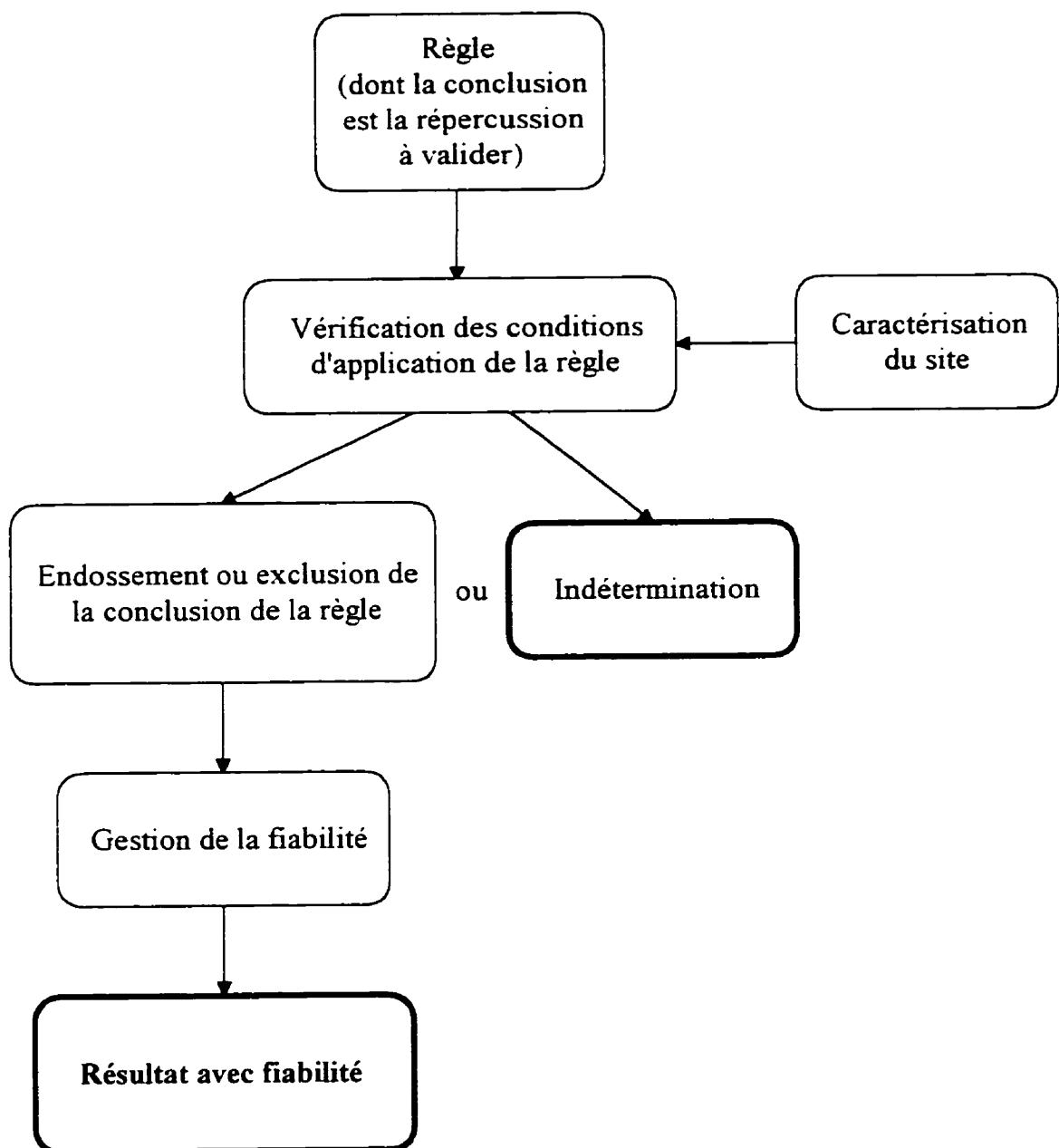


Figure 2.4 Validation d'une répercussion potentielle

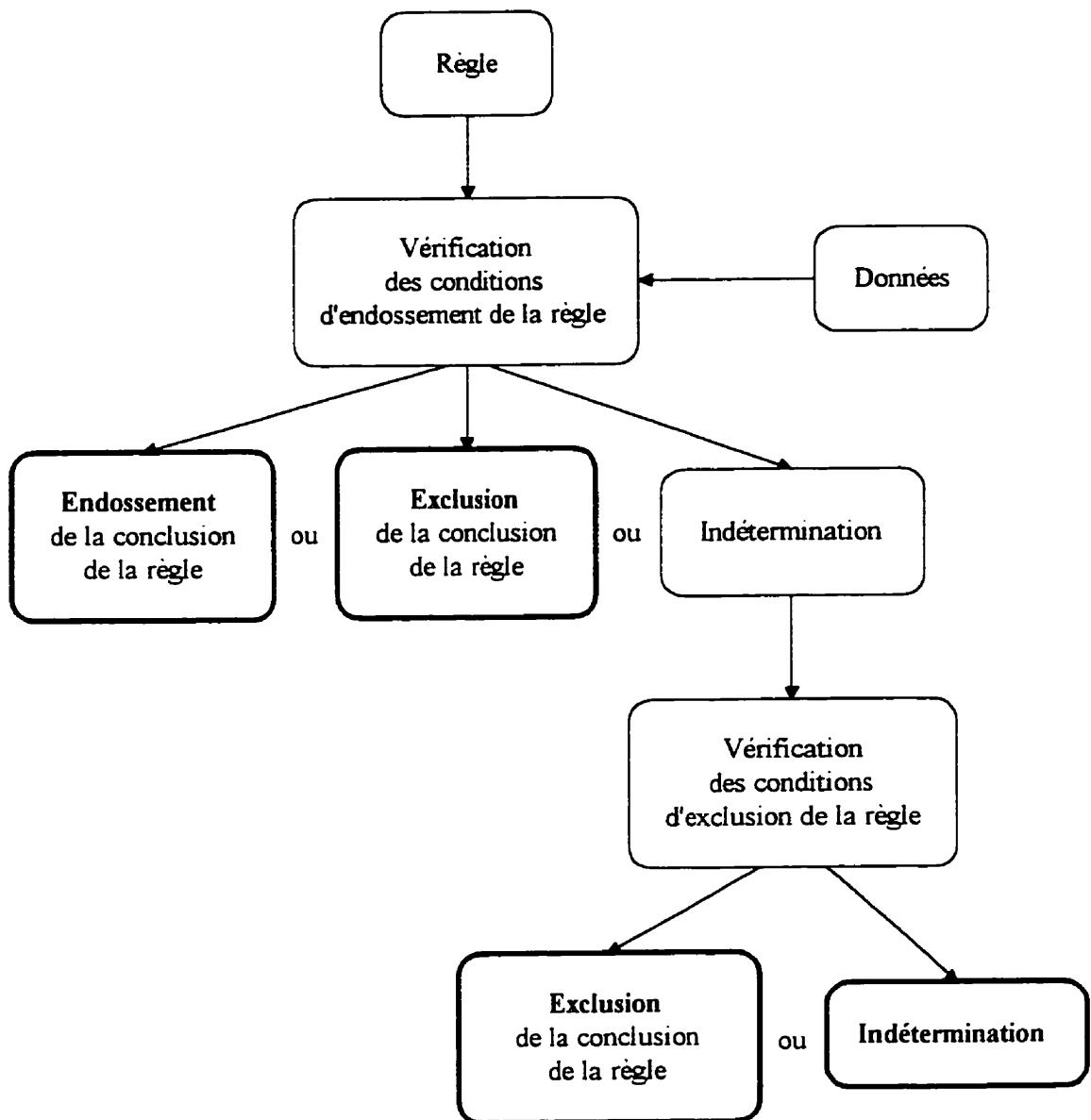


Figure 2.5 Application d'une règle

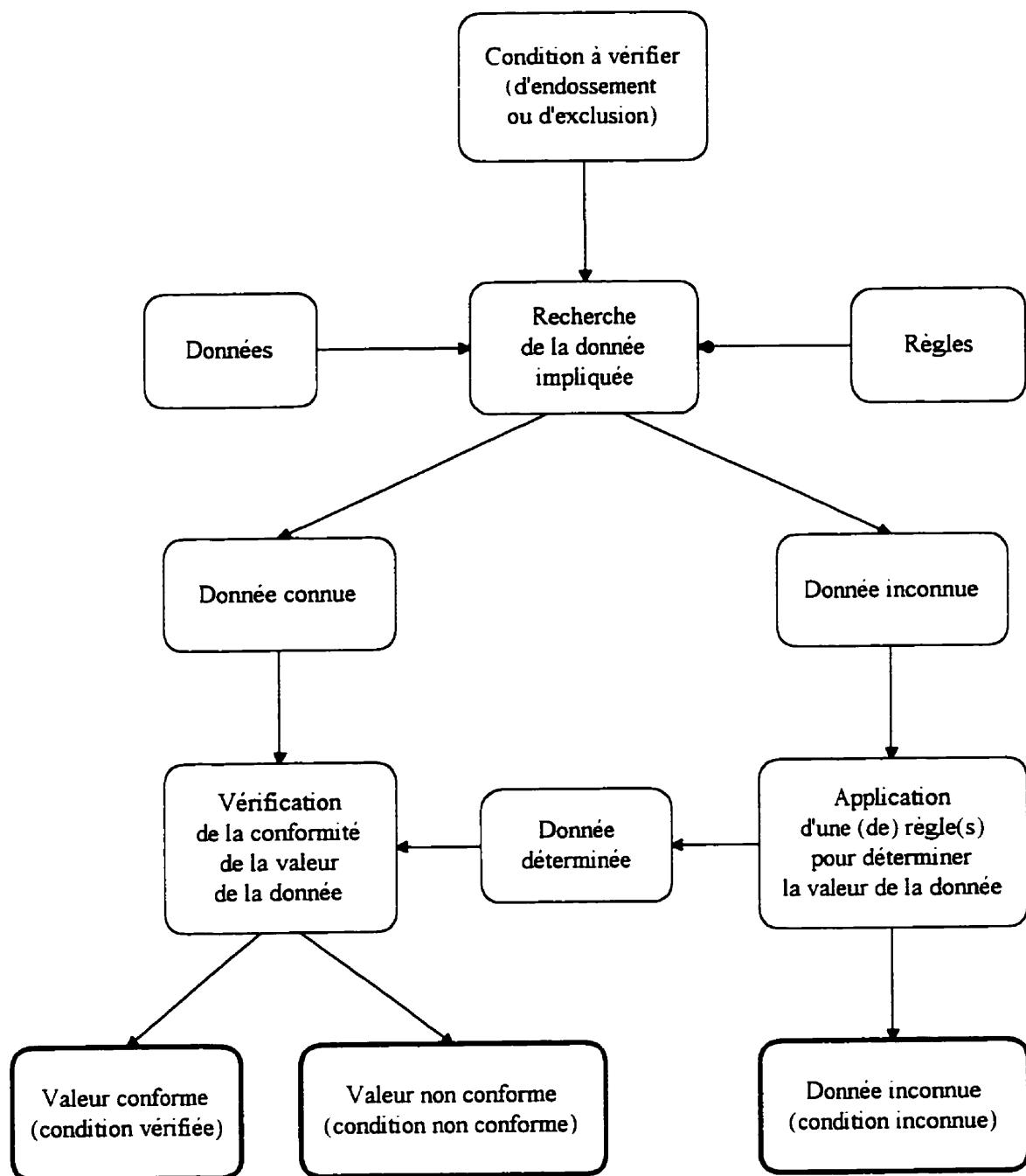


Figure 2.6 Vérification d'une condition

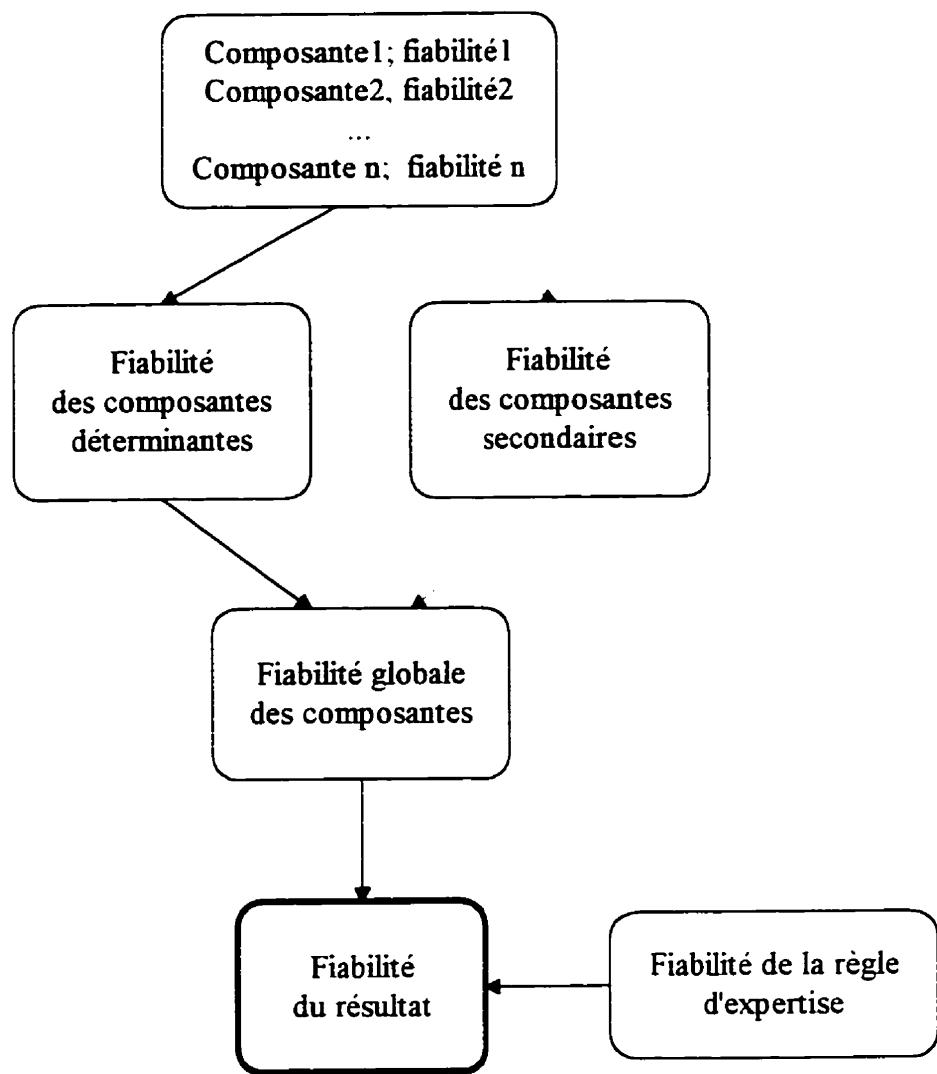


Figure 2.7 Gestion globale de la fiabilité

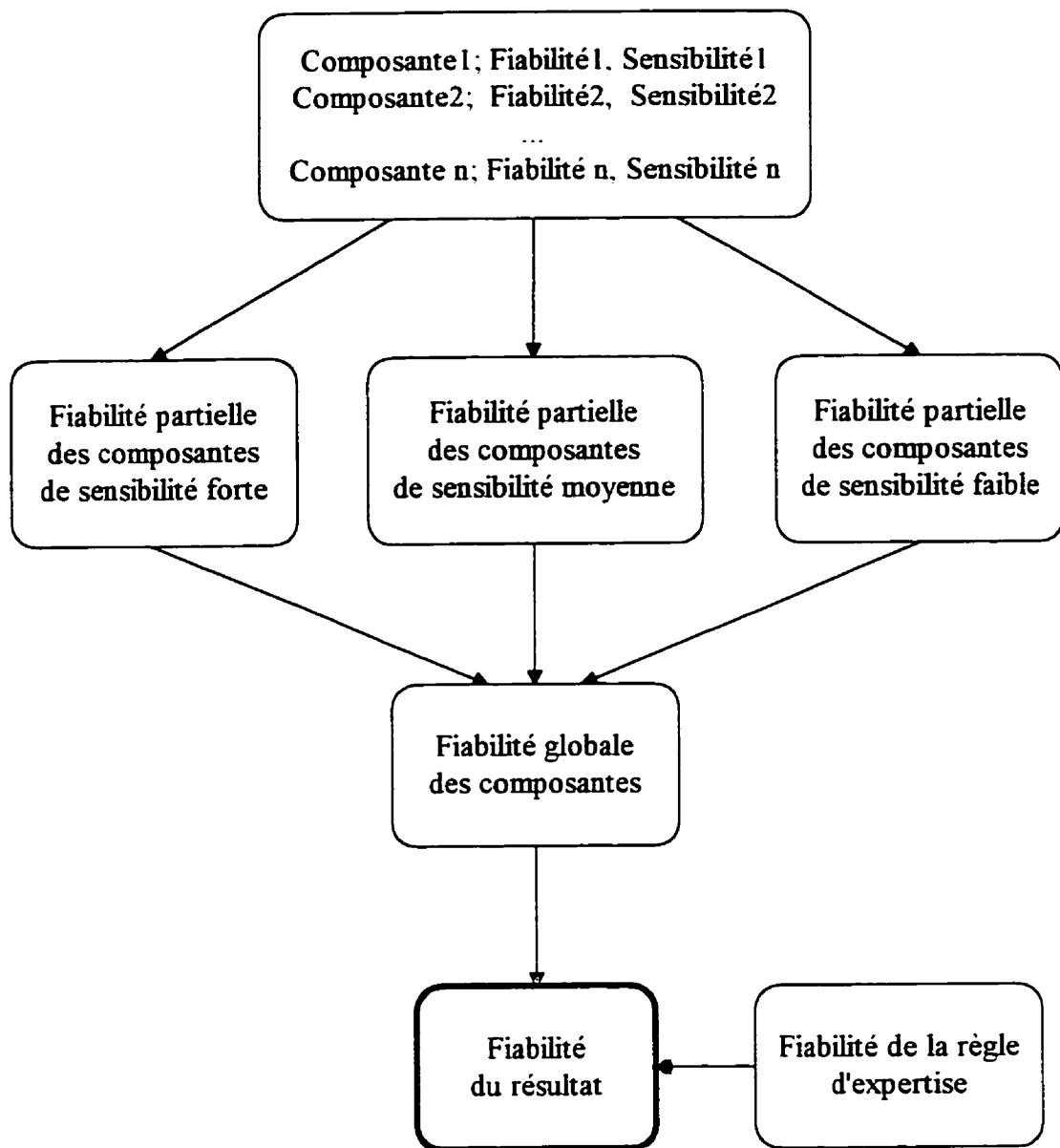
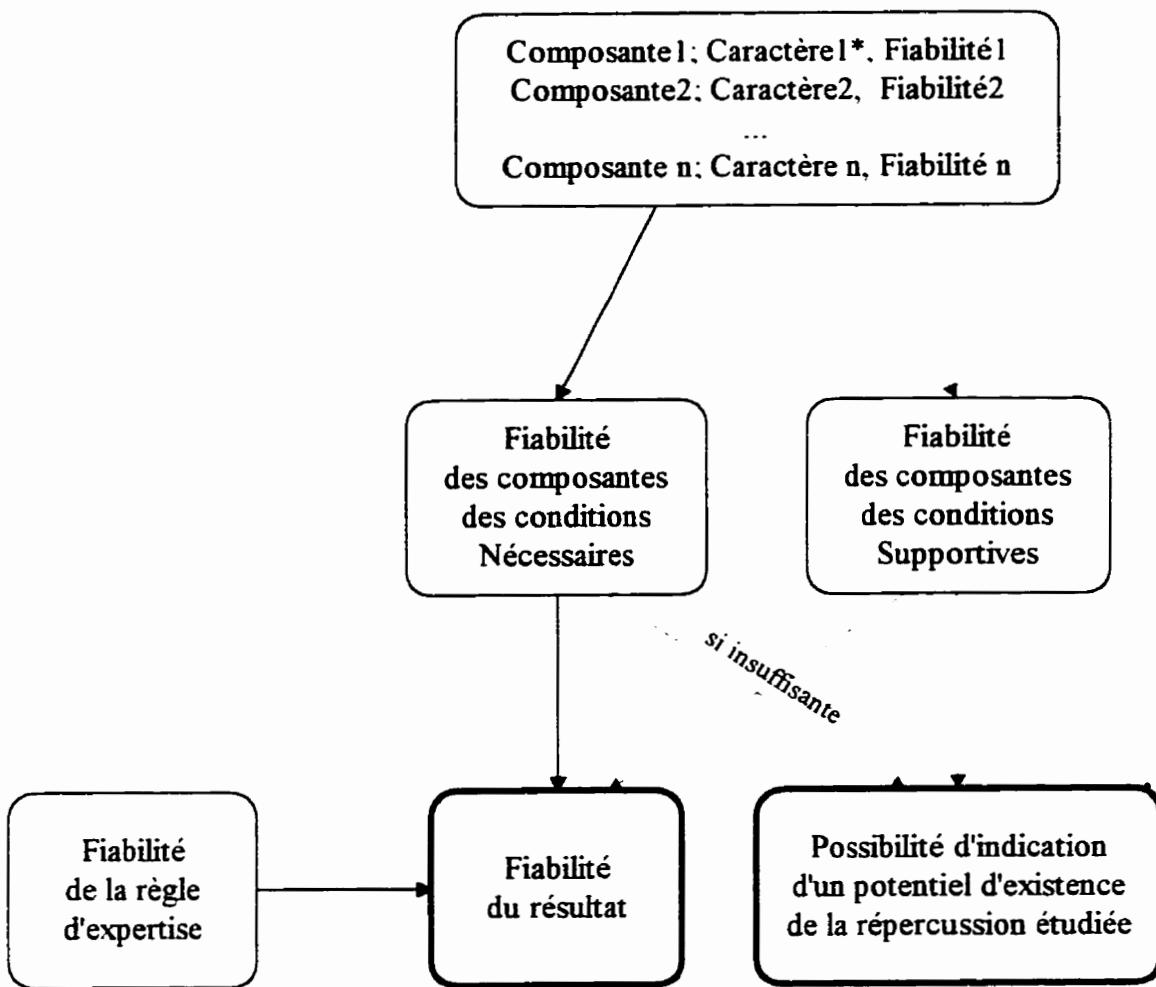
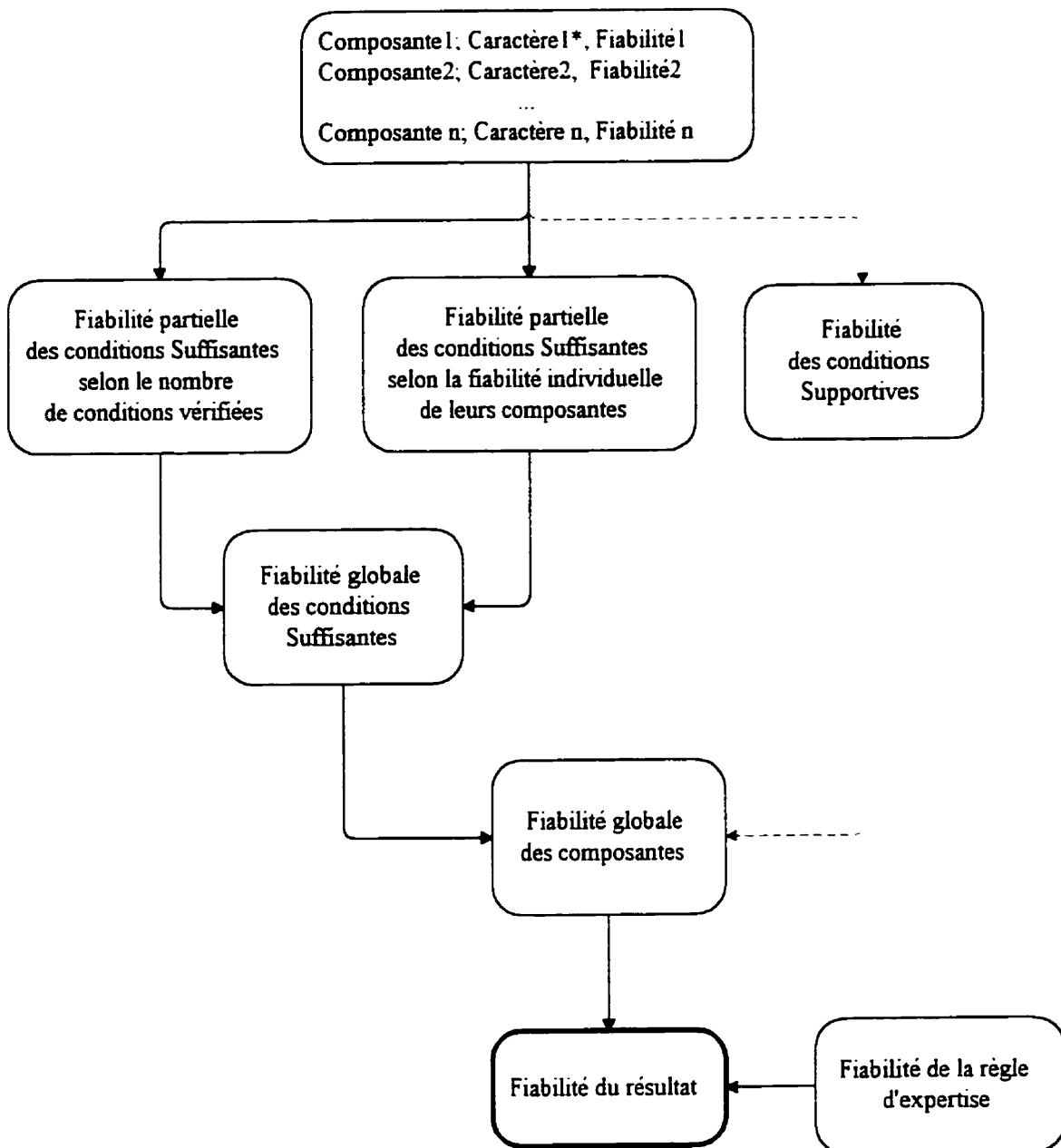


Figure 2.8 Gestion de la fiabilité des règles numériques



* Caractère: Nécessaire ou Supportive

Figure 2.9 Gestion de la fiabilité des règles qualitatives contenant des conditions Nécessaires



* Caractère: Suffisante ou Supportive

**Figure 2.10 Gestion de la fiabilité des règles qualitatives
contenant des conditions Suffisantes**

règle(Conclusion de la règle, Fiabilité de la règle,
 [condition1(endossement, Caractère1, Énoncé1, Fiabilité de la composante1,
 Sensibilité à la composante1),
 condition2(endossement, Caractère2, Énoncé2, Fiabilité de la composante2,
 Sensibilité à la composante2),
 ...
 condition i(endossement, Caractère i, Énoncé i, Fiabilité de la composante i,
 Sensibilité à la composante i)],
 [conditionA(exclusion, CaractèreA, ÉnoncéA, Fiabilité de la composanteA,
 Sensibilité à la composanteA),
 conditionB(exclusion, CaractèreB, ÉnoncéB, Fiabilité de la composanteB,
 Sensibilité à la composanteB),
 ...
 condition(exclusion, Caractère n, Énoncé n, Fiabilité de la composante n,
 Sensibilité à la composante n)]).

a) Structure générale

règle(est(taux de croissance des poissons, réduit), moyenne,
 [condition(endossement, nécessaire, est(diminution de la concentration en oxygène dissous,
 existant), Fiabilité_cOD, moyenne),
 condition(endossement, nécessaire, est(diminution du pH, existant),
 Fiabilité_pH, moyenne),
 condition(endossement, supportive, est(augmentation de la température, existant),
 Fiabilité_temp, faible),
 condition(endossement, supportive, est(augmentation de la dureté, existant),
 Fiabilité_d, faible)],[]).

b) Exemple d'une règle intégrée au système (d'après Pelizzari, 1994)

Figure 3.1 Structure informatique d'une règle d'expertise

| | | | | | | | | | |
|--|------|------|--------|------|-------|--------|--|------|--|
| | File | Edit | Buffer | Info | Debug | Switch | | Help | |
| 2- étude. | | | | | | | | | |
| Le dragage du lit du cours d'eau est prévu: (o/n) <input type="radio"/> o. | | | | | | | | | |
| Avec quelle fiabilité? élevée. | | | | | | | | | |
| Le nettoyage des fonds du cours d'eau est prévu: (o/n) <input type="radio"/> o. | | | | | | | | | |
| Avec quelle fiabilité? élevée. | | | | | | | | | |
| Le déboisement des berges du cours d'eau est prévu: (o/n) <input type="radio"/> n. | | | | | | | | | |

Figure 3.2 Transcription d'un écran de saisie des données

| File | Edit | Buffer | Info | Debug | Switch | | Help |
|------|------|--------|------|-------|--------|--|------|
| | | | | | | | |

?- Règle: est(infiltration des berges, faible)

La conclusion de la règle étudiée ne peut être endossée puisque certaines composantes environnementales mises en jeu par les conditions nécessaires à l'endossement sont inconnues. Les conditions non vérifiées pour cette raison sont les suivantes:

est(sol des berges, saturé)

Si la règle contient des conditions d'exclusion, leur étude sera entreprise pour vérifier si la conclusion de la règle peut être exclue.

Figure 3.3 Transcription de l'envoi, à l'écran, d'un message à l'usager

ANNEXE III

RÈGLES DE GESTION DE LA FIABILITÉ DES CONNAISSANCES

GESTION DE LA FIABILITÉ DES CONNAISSANCES

1. Fiabilité des composantes

1.1 Conditions d'application nécessaires

1.1.1 *Gestion partielle des composantes par classe de sensibilité*

1.1.1.1 Classe Forte

Fiabilité pour les composantes et la classe: Moyenne

La fiabilité obtenue pour la classe est:

- Très Élevée si au moins 70 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée
 ou au moins 60 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée
 et pas plus de 20 % des composantes ont une fiabilité Moyenne
- Élevée si au moins 40 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée
 ou au moins 30 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée
 et pas plus de 50 % des composantes ont une fiabilité Moyenne
 ou pas plus de 40 % des composantes ont une fiabilité Moyenne
- Moyenne si plus de 40 % des composantes ont une fiabilité Moyenne
 et moins de 30 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée
 ou plus de 50 % des composantes ont une fiabilité Moyenne
 et moins de 40 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée
 ou plus de 60 % des composantes ont une fiabilité Moyenne

1.1.1.2 Classe Moyenne

La fiabilité obtenue pour la classe est:

- Très Élevée si au moins 80 % des composantes ont une fiabilité Élevée
 ou au moins 70 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée

et aucune des composantes n'a une fiabilité Faible
 ou au moins 60 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée
 et pas plus de 20 % des composantes ont une fiabilité Moyenne
 et aucune des composantes n'a une fiabilité Faible
 - Élevée si au moins 60 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée
 ou au moins 50 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée
 et pas plus de 30 % des composantes ont une fiabilité Moyenne
 ou au moins 40 % des composantes ont une fiabilité Très Élevée
 et pas plus de 20 % des composantes ont une fiabilité Moyenne
 ou au moins 70 % des composantes ont une fiabilité Élevée
 ou au moins 60 % des composantes ont une fiabilité Élevée
 et aucune des composantes n'a une fiabilité Faible
 - Moyenne si au moins 40 % des composantes ont une fiabilité Élevée
 ou pas plus de 40 % des composantes ont une fiabilité Faible
 - Faible si plus de 40 % des composantes ont une fiabilité Faible
 et moins de 40 % des composantes ont une fiabilité Élevée
 ou plus de 60 % des composantes ont une fiabilité Faible

1.1.1.3 Classe Faible

La fiabilité obtenue pour la classe est:

- Élevée si au moins 70 % des composantes ont une fiabilité Élevée
 - Moyenne si au moins 60 % des composantes ont une fiabilité Moyenne
 ou au moins 40 % des composantes ont une fiabilité Élevée
 - Faible si plus de 40 % des composantes ont une fiabilité Faible
 et moins de 60 % des composantes ont une fiabilité Élevée
 ou plus de 60 % des composantes ont une fiabilité Faible

1.1.2 *Fiabilité globale des composantes*

La fiabilité globale des composantes est:

- Très Élevée si les classes Forte et Moyenne ont une fiabilité Très Élevée
 ou la classe Forte a une fiabilité Très Élevée
 et les classes Moyenne et Faible ont une fiabilité Élevée
- Élevée si les classes Forte et Moyenne ont une fiabilité Élevée
 ou la classe Forte a une fiabilité Élevée
 et la classe Moyenne a une fiabilité Moyenne
 et la classe Faible a une fiabilité Élevée
- Moyenne si les classes Forte et Moyenne ont une fiabilité Moyenne
 ou la classe Forte a une fiabilité Moyenne
 et la classe Faible a une fiabilité Élevée
- Faible si la classe Forte a une fiabilité au plus Faible
 ou la classe Forte a une fiabilité au plus Moyenne
 et la classe Faible a une fiabilité au plus Faible

Note: Si une règle d'expertise ne contient des composantes que de deux classes, les mêmes règles peuvent être appliquées. La fiabilité globale des composantes est alors déterminée par la règle de gestion contenant une combinaison des deux classes qui donne la fiabilité la plus élevée. Si la règle d'expertise ne comporte qu'une classe de composantes, la fiabilité globale des composantes est la même que celle de cette classe.

1.2 Conditions d'application suffisantes ou supportives

1.2.1 *Fiabilité partielle selon la proportion de conditions vérifiées*

La fiabilité partielle selon la proportion de conditions vérifiées est:

- Très Élevée si plus de 75 % des conditions sont vérifiées
(attribution de la valeur numérique 4)

- **Élevée** si plus de 50 % des conditions sont vérifiées
(attribution de la valeur numérique 3)
- **Moyenne** si plus de 25 % des conditions sont vérifiées
(attribution de la valeur numérique 2)
- **Faible** si 25 % ou moins des conditions sont vérifiées
(attribution de la valeur numérique 1)

1.2.2 Fiabilité partielle selon la fiabilité individuelle des composantes des conditions vérifiées

La fiabilité partielle est égale à la moyenne des degrés de fiabilité individuelle des composantes (attribution d'une valeur numérique située entre 1 et 4).

1.2.3 Fiabilité globale des composantes

La fiabilité globale des composantes est égale à la moyenne des deux degrés de fiabilité partielle. La valeur numérique obtenue est reconvertie en degré qualitatif:

- **Très Élevée** si la fiabilité globale est supérieure à 3,5;
- **Élevée** si la fiabilité globale est supérieure à 2,5 et inférieure à 3,5;
- **Moyenne** si la fiabilité globale est supérieure à 1,5 et inférieure à 2,5;
- **Faible** si la fiabilité globale est inférieure à 1,5.

Note: Lorsque la fiabilité globale des composantes des conditions suffisantes se situe entre deux degrés de fiabilité, la fiabilité des conditions supportives est étudiée. La fiabilité globale des conditions suffisantes est augmentée au degré supérieur si la valeur numérique de la fiabilité globale des conditions supportives est supérieure ou égale à 3. Sinon, elle est diminuée au degré inférieur.

1.3 Fiabilité de la réponse

- Pour les règles d'expertise dont la fiabilité est **Très Élevée**, la fiabilité globale des composantes doit être **Très Élevée ou Élevée**.

La fiabilité de la réponse:

- reste **Très Élevée** si la fiabilité globale des composantes est **Très Élevée**
- devient **Élevée** si la fiabilité globale des composantes est **Élevée**

- Pour les règles d'expertise dont la fiabilité est **Élevée**, la fiabilité globale des composantes doit être **Très Élevée, Élevée ou Moyenne**.

La fiabilité de la réponse:

- reste **Élevée** si la fiabilité globale des composantes est **Très Élevée ou Élevée**
- devient **Moyenne** si la fiabilité globale des composantes est **Moyenne**

- Pour les règles d'expertise dont la fiabilité est **Moyenne**, la fiabilité de la réponse:

- reste **Moyenne** si la fiabilité globale des composantes est **Très Élevée ou Élevée**
- devient **Faible** si la fiabilité globale des composantes est **Moyenne ou Faible**

Pour les règles d'expertise dont la fiabilité est **Faible**, la fiabilité de la réponse est **Faible**, peu importe la fiabilité des composantes.

ANNEXE IV

DONNÉES ET RÉSULTATS DES ÉTUDES DE CAS

Tableau 4.1 Données de départ des études

| Nom de la composante | Valeur | Fiabilité |
|---|---------------|-------------|
| sédiments du sol des berges | fins | élevée |
| intensité des pluies | élevée | élevée |
| perméabilité du sol des berges | faible | élevée |
| teneur en eau du sol des berges | élevée | élevée |
| pente des berges | faible | élevée |
| végétation des berges | peu abondante | élevée |
| intensité des vents | élevée | moyenne |
| hauteur d'eau (m) | 1.2 | élevée |
| pente du lit | 0.00027 | très élevée |
| D ₅₀ des sédiments du lit (m) | 0.0008 | élevée |
| D ₅₀ des sédiments des berges (m) | 0.00015 | moyenne |
| constante de Von Karman | 0.4 | très élevée |
| vitesse du vent (m/s) | 13 | moyenne |
| D ₉₀ des sédiments du lit (m) | 0.0019 | moyenne |
| D ₉₀ des sédiments berges (m) | 0.00048 | moyenne |
| masse volumique des sédiments du lit (kg/m ³) | 2660 | très élevée |
| masse volumique des sédiments des berges (kg/m ³) | 2660 | très élevée |
| masse volumique de l'eau (kg/m ³) | 1000 | très élevée |
| accélération gravitationnelle (m/s ²) | 9.81 | très élevée |
| température de l'eau (°C) | 11 | élevée |
| teneur du sol en carbonates | élevée | moyenne |

Tableau 4.2 Répercussions confirmées lors de la première étude
(Actions projetées: dragage du lit et nettoyage des fonds du cours d'eau)

| Répercussion | Fiabilité |
|---|-----------|
| manipulation mécanique des sédiments du lit | moyenne |
| réduction de la végétation aquatique | élevée |
| mise en mouvement des sédiments du lit | élevée |
| suspension des sédiments du lit | élevée |
| suspension de sédiments | moyenne |
| augmentation de la turbidité | moyenne |
| diminution de la luminosité | faible |
| augmentation de la concentration en ions Ca ²⁺ | faible |
| augmentation du pH | faible |
| difficultés respiratoires chez les poissons | faible |

Tableau 4.3 Déroulement de l'identification et de la validation des répercussions lors de la première étude

| Source de répercussion | Conclusion des règles sélectionnées |
|--|---|
| 1^{ère} itération: <ul style="list-style-type: none"> - dragage du lit du cours d'eau - nettoyage des fonds | <ul style="list-style-type: none"> - manipulation mécanique des sédiments du lit (endossée, fiabilité moyenne) - réduction de la végétation aquatique (endossée, fiabilité élevée) - idem |
| 2^e itération: <ul style="list-style-type: none"> - manipulation mécanique des sédiments du lit - réduction de la végétation aquatique | <ul style="list-style-type: none"> - mise en mouvement des sédiments du lit (endossée, fiabilité élevée) - augmentation de la luminosité (indéterminée) |
| 3^e itération: <ul style="list-style-type: none"> - mise en mouvement des sédiments du lit | <ul style="list-style-type: none"> - charriage des sédiments du lit (exclue, fiabilité élevée) - suspension des sédiments du lit (endossée, fiabilité élevée) |
| 4^e itération: <ul style="list-style-type: none"> - suspension des sédiments du lit | <ul style="list-style-type: none"> - suspension de sédiments (endossée, fiabilité moyenne) |
| 5^e itération: <ul style="list-style-type: none"> - suspension de sédiments | <ul style="list-style-type: none"> - augmentation de la concentration en ions Ca^{2+} (endossée, fiabilité faible) - augmentation de la turbidité (endossée, fiabilité moyenne) - charge sédimentaire transportée en suspension (indéterminée) |
| 6^e itération: <ul style="list-style-type: none"> - augmentation de la concentration en ions Ca^{2+} - augmentation de la turbidité | <ul style="list-style-type: none"> - augmentation de la dureté (indéterminée) - augmentation du pH (endossée, fiabilité faible) - diminution de la luminosité (endossée, fiabilité faible) - difficultés respiratoires chez les poissons (endossée, fiabilité faible) |

**Tableau 4.4 Répercussions confirmées lors de la deuxième étude
(Actions projetées: déboisement des berges du cours d'eau)**

| Répercussion confirmée | Fiabilité |
|---|------------------|
| réduction du couvert végétal des berges | élevée |
| couvert végétal des berges peu dense | moyenne |
| ruissellement sur les berges | faible |
| érosion des berges par le vent | faible |
| érosion des berges | moyenne |

**Tableau 4.5 Déroulement de l'identification et de la validation
des répercussions lors de la deuxième étude**

| Source de répercussion | Conclusion des règles sélectionnées |
|---|--|
| 1^{ère} itération: - déboisement des berges | - réduction du couvert végétal des berges (endossée, fiabilité élevée) |
| 2^e itération: - réduction du couvert végétal des berges | - couvert végétal peu dense (endossée, fiabilité moyenne) |
| 3^e itération: - couvert végétal peu dense | - ruissellement sur les berges (endossée, fiabilité faible) - érosion des berges par le vent (endossée, fiabilité faible) |
| 4^e itération: - ruissellement sur les berges - érosion des berges par le vent | - érosion des berges par le ruissellement (indéterminée) - érosion des berges (endossée, fiabilité moyenne) |
| 5^e itération: - érosion des berges | - charriage des sédiments des berges (exclue, élevée) - augmentation de la turbidité (indéterminée) - charge sédimentaire transportée en suspension (indéterminée) |

**Tableau 4.6 Répercussions confirmées lors de la troisième étude
(Actions projetées: dragage du lit et déboisement des berges du cours d'eau)**

| Répercussion confirmée | Fiabilité |
|---|-----------|
| manipulation mécanique des sédiments du lit | élevée |
| mise en mouvement des sédiments du lit | élevée |
| réduction de la végétation aquatique | élevée |
| réduction du couvert végétal des berges | élevée |
| couvert végétal des berges peu dense | moyenne |
| charriage des sédiments du lit | élevée |
| érosion des berges par le ruissellement | faible |
| érosion des berges par le vent | faible |
| érosion des berges | moyenne |
| colmatage de frayères | faible |

**Tableau 4.7 Déroulement de l'identification et de la validation
des répercussions lors de la troisième étude**

| Source de répercussion | Conclusion des règles sélectionnées |
|--|---|
| 1^{ère} itération: <ul style="list-style-type: none"> - dragage du lit du cours d'eau - nettoyage des fonds - déboisement des berges | <ul style="list-style-type: none"> - manipulation mécanique des sédiments du lit (endossée, fiabilité élevée) - réduction de la végétation aquatique (endossée, fiabilité élevée) - idem - réduction du couvert végétal des berges (endossée, fiabilité élevée) |
| 2^e itération: <ul style="list-style-type: none"> - manipulation mécanique des sédiments du lit - réduction de la végétation aquatique - réduction du couvert végétal des berges | <ul style="list-style-type: none"> - mise en mouvement des sédiments du lit (endossée, fiabilité élevée) - augmentation de la luminosité (indéterminée) - couvert végétal des berges peu dense (endossée, fiabilité moyenne) |
| 3^e itération: <ul style="list-style-type: none"> - mise en mouvement des sédiments du lit - couvert végétal des berges peu dense | <ul style="list-style-type: none"> - charriage des sédiments du lit (endossée, fiabilité élevée) - suspension des sédiments du lit (exclue, fiabilité élevée) - érosion des berges par le vent (endossée fiabilité faible) |
| 4^e itération: <ul style="list-style-type: none"> - érosion des berges par le vent - charriage des sédiments du lit | <ul style="list-style-type: none"> - érosion des berges (endossée, fiabilité moyenne) - colmatage de frayères (endossée, fiabilité faible) |

Tableau 4.8 Répercussions confirmées lors de la quatrième étude
(Actions projetées: dragage du lit, nettoyage des fonds et déboisement des berges)

| Répercussion confirmée | Fiabilité |
|---|------------------|
| manipulation mécanique des sédiments du lit | élevée |
| mise en mouvement des sédiments du lit | moyenne |
| réduction de la végétation aquatique | élevée |
| réduction du couvert végétal | élevée |
| couvert végétal des berges peu dense | moyenne |
| érosion des berges par le vent | faible |

**Tableau 4.9 Déroulement de l'identification et de la validation
des répercussions lors de la quatrième étude**

| Source de répercussion | Conclusion des règles sélectionnées |
|--|---|
| 1^{re} itération: <ul style="list-style-type: none"> - dragage du lit - nettoyage des fonds - déboisement des berges | <ul style="list-style-type: none"> - manipulation mécanique des sédiments du lit (endossée, fiabilité élevée) - réduction de la végétation aquatique (endossée, fiabilité élevée) - idem - réduction du couvert végétal des berges (endossée, fiabilité élevée) |
| 2^e itération: <ul style="list-style-type: none"> - manipulation mécanique des sédiments du lit - réduction de la végétation aquatique - réduction du couvert végétal des berges | <ul style="list-style-type: none"> - mise en mouvement des sédiments du lit (endossée, fiabilité moyenne) - augmentation de la luminosité (indéterminée) - couvert végétal peu dense (endossée, fiabilité moyenne) |
| 3^e itération: <ul style="list-style-type: none"> - mise en mouvement des sédiments du lit - couvert végétal peu dense | <ul style="list-style-type: none"> - chargement des sédiments du lit (indéterminée) - suspension des sédiments du lit (indéterminée) - érosion des berges par le ruissellement (indéterminée) - érosion des berges par le vent (endossée, fiabilité faible) |

ANNEXE V

LISTE DES RÈGLES D'EXPERTISE

RÈGLES D'EXPERTISE INTÉGRÉES AU SYSTÈME

- 1- `regle(est(manipulation_mecanique_des_sediments_du_lit,existant),elevee,`
`[condition(endossement,suffisante,est(drageage_du_lit,existant),Fiabilite_dragage,moyenne),`
`condition(endossement,suffisante,est(dynamitage,existant),Fiabilite_dyn,moyenne),`
`condition(endossement,suffisante,est(excavation,existant),Fiabilite_exc,moyenne),`
`condition(endossement,suffisante,est(nettoyage_des_fonds,existant),Fiabilite_net,moyenne)],[]).`
- 2- `regle(est(mise_en_mouvement_des_sediments_du_lit,existant),elevee,`
`[condition(endossement,suffisante,est(manipulation_mecanique_des_sediments_du_lit,existant),Fiabilite_mms,moyenne),`
`condition(endossement,suffisante,est(erotion_du_lit,existant),Fiabilite_er,moyenne),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_du_debit,existant),Fiabilite_q,faible),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_vitesse,existant),Fiabilite_v,faible),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_hauteur,existant),Fiabilite_h,faible)],[]).`
- 3- `regle(est(erosion_des_berges,existant),elevee,`
`[condition(endossement,suffisante,est(erosion_des_berges_par_le_ruisseaulement,existant),Fiabilite_eau,moyenne),`
`condition(endossement,suffisante,est(erosion_des_berges_par_le_vent,existant),Fiabilite_vent,moyenne),`
`[condition(exclusion,suffisante,est(grains_du_sol_des_berges,gros),Fiabilite_gr,moyenne),`
`condition(exclusion,suffisante,est(vegetation_des_berges,tres_dense),Fiabilite_veg,moyenne)]).`
- 4- `regle(est(erosion_des_berges_par_le_ruisseaulement,existant),moyenne,`
`[condition(endossement,necessaire,est(ruisseaulement_sur_les_berges,existant),Fiabilite_r,forte),`
`condition(endossement,necessaire,est(grains_du_sol_des_berges,fins),Fiabilite_gr,forte),`
`condition(endossement,necessaire,est(couvert_vegetal_des_berges,peu_dense),Fiabilite_veg,forte),`
`condition(endossement,supportive,est(pente_des_berges,forte),Fiabilite_p,faible)],[]).`

- 5- **regle**(est(errosion_des_berges_par_le_vent,existant),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_cisaillement_du_vent,U_cisaill_vent),Fiabilite_U,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_cisaillement_critique_du_vent,U_cisaill_vent_crtq),Fiabilite_Ucrtq,forte),
 condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(U_cisaill_vent,U_cisaill_vent_crtq),Fiabilite_composantes,_)],[])).
- 6- **regle**(est(errosion_des_berges_par_le_vent,existant),moyenne,
 [condition(endossement,necessaire,est(vents,forts),Fiabilite_v,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(grains_du_sol_des_berges,fins),Fiabilite_gr,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(couvert_vegetal_des_berges,peu_dense),Fiabilite_veg,forte),
 condition(endossement,supportive,est(pente_des_berges,forte),Fiabilite_p,faible)],[])).
- 7- **regle**(est(ruisseau_sur_les_berges,existant),moyenne,
 [condition(endossement,necessaire,est(pluie,forte),Fiabilite_pl,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(infiltration_des_berges,faible),Fiabilite_i,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(couvert_vegetal_des_berges,peu_dense),Fiabilite_veg,forte),
 condition(endossement,supportive,est(pente_des_berges,forte),Fiabilite_p,faible)],
 [condition(exclusion,necessaire,est(vegetation_des_berges,tres_dense),Fiabilite_veg,moyenne)]).
- 8- **regle**(est(couvert_vegetal_des_berges,peu_dense),moyenne,
 [condition(endossement,suffisante,est(reduction_du_couvert_vegetal,existant),Fiabilite_rcv,moyenne),
 condition(endossement,suffisante,est(vegetation_des_berges,peu_abondante),Fiabilite_v,moyenne)],[])).
- 9- **regle**(est(reduction_du_couvert_vegetal,existant),elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(deboisement_des_berges,existant),Fiabilite_d,forte)],[])).
- 10- **regle**(est(infiltration_des_berges,faible),elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(permeabilite_du_sol_des_berges,faible),Fiabilite_cap,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(sol_des_berges,sature),Fiabilite_sat,forte)],[])).

- 11- regle(est(augmentation_de_la_turbidite,existant),elevee,
 [condition(endossement,suffisante,est(suspension_des_sediments_du_lit,existant),Fiabilite_sspl,moyenne),
 condition(endossement,suffisante,est(suspension_des_sediments_des_berges,existant),Fiabilite_sspb,moyenne),
 condition(endossement,supportive,est(augmentation_du_pH,existant),Fiabilite_pH,faible),
 condition(endossement,supportive,est(proliferation_d Algues,augmente),Fiabilite_alg,faible)],[]).
- 12- regle(est(proliferation_d Algues,existant),moyenne,
 [condition(endossement,necessaire,est(apport_d_elements_nutritifs,existant),Fiabilite_aen,forte),
 condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_temperature,existant),Fiabilite_t,faible)],[]).
- 13- regle(est(augmentation_de_la_durete,existant),elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(augmentation_de_la_concentration_en_ions_Ca2,existant),Fiabilite_Ca,forte)],[]).
- 14- regle(est(diminution_de_la_durete,existant),elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(diminution_de_la_concentration_en_ions_Ca2,existant),Fiabilite_Ca,forte)],[]).
- 15- regle(est(augmentation_de_la_luminosite,existant),moyenne,
 [condition(endossement,suffisante,est(diminution_de_la_turbidite,existant),Fiabilite_tb,moyenne),
 condition(endossement,suffisante,est(diminution_du_pH,existant),Fiabilite_pH,moyenne),
 condition(endossement,suffisante,est(diminution_de_la_hauteur_d_eau,existant),Fiabilite_h,moyenne),
 condition(endossement,supportive,est(deboisement_des_berges,existant),Fiabilite_rb,faible)],[]).
- 16- regle(est(diminution_de_la_luminosite,existant),moyenne,
 [condition(endossement,suffisante,est(augmentation_de_la_turbidite,existant),Fiabilite_tb,moyenne),
 condition(endossement,suffisante,est(augmentation_du_pH,existant),Fiabilite_pH,moyenne),
 condition(endossement,suffisante,est(augmentation_de_la_hauteur_d_eau,existant),Fiabilite_h,moyenne),
 condition(endossement,supportive,est(reboisement_des_berges,existant),Fiabilite_rb,faible)],[]).
- 17- regle(est(reduction_de_la_vegetation_aquatique,existant),elevee,
 [condition(endossement,suffisante,est(drageage_du_lit,existant),Fiabilite_d,moyenne),
 condition(endossement,suffisante,est(nettoyage_des_fonds,existant),Fiabilite_nf,moyenne),
 condition(endossement,supportive,est(diminution_de_la_temperature,existant),Fiabilite_t,faible)],[]).

- 18- **regle**(est(**croissance_de_la_vegetation_aquatique**,existant),moyenne,
 [condition(**endossement**,**necessaire**,est(**apport_d_elements_nutritifs**,existant),**Fiabilite_aen**,forte),
 condition(**endossement**,**supportive**,est(**augmentation_de_la_temperature**,existant),**Fiabilite_t**,faible)],[]).
- 19- **regle**(est(**augmentation_de_la_concentration_en_ions_Ca2**,existant),moyenne,
 [condition(**endossement**,**necessaire**,est(**presence_d_ions_Ca2_dans_les_sediments**,existant),**Fiabilite_Ca2**,forte),
 condition(**endossement**,**necessaire**,est(**suspension_de_sediments**,existant),**Fiabilite_ssp**,forte)],[]).
- 20- **regle**(est(**diminution_de_la_concentration_en_ions_Ca2**,existant),moyenne,
 [condition(**endossement**,**necessaire**,est(**teneur_du_sol_en_carbonates**,elevee),**Fiabilite_Ca2**,forte),
 condition(**endossement**,**necessaire**,est(**deposition_de_sediments**,existant),**Fiabilite_ssp**,forte)],[]).
- 21- **regle**(est(**diminution_du_pH**,existant),moyenne,
 [condition(**endossement**,**suffisante**,est(**diminution_de_la_concentration_en_ions_Ca2**,existant),**Fiabilite_Ca2**,moyenne)],[]).
- 22- **regle**(est(**augmentation_du_pH**,existant),moyenne,
 [condition(**endossement**,**suffisante**,est(**augmentation_de_la_concentration_en_ions_Ca2**,existant),**Fiabilite_Ca2**,moyenne)],[]).
- 23- **regle**(est(**augmentation_de_la_temperature**,existant),moyenne,
 [condition(**endossement**,**suffisante**,est(**augmentation_de_la_luminosite**,existant),**Fiabilite_l**,moyenne),
 condition(**endossement**,**suffisante**,est(**diminution_de_la_hauteur_d_eau**,**Fiabilite_h**,moyenne)],[]).
- 24- **regle**(est(**diminution_de_la_temperature**,existant),moyenne,
 [condition(**endossement**,**suffisante**,est(**diminution_de_la_luminosite**,existant),**Fiabilite_l**,moyenne),
 condition(**endossement**,**suffisante**,est(**augmentation_de_la_hauteur_d_eau**,**Fiabilite_h**,moyenne)],[]).
- 25- **regle**(est(**diminution_de_la_concentration_en_oxygene_dissous**,existant),elevee,
 [condition(**endossement**,**suffisante**,est(**apport_de_matieres_organiques**,existant),**Fiabilite_cmo**,moyenne),
 condition(**endossement**,**suffisante**,est(**augmentation_de_la_temperature**,existant),**Fiabilite_tp**,moyenne),
 condition(**endossement**,**supportive**,est(**augmentation_de_la_turbidite**,existant),**Fiabilite_tb**,faible)],[]).
- 26- **regle**(est(**apport_d_elements_nutritifs**,existant),moyenne,
 [condition(**endossement**,**necessaire**,est(**rejet_d_eaux_usees_non_traitees_en_amont**,existant),**Fiabilite_rj**,forte)],[]).

- 27- `regle(est(apport_de_matières_organiques,existant),moyenne,`
`[condition(endossement,nécessaire,est(rejet_d_eaux_usees_non_traitées_en_amont,existant),Fiabilité_rj,forte)],[]).`
- 28- `regle(est(difficultés_respiratoires_chez_les_poissons,existant),moyenne,`
`[condition(endossement,suffisante,est(diminution_de_la_concentration_en_oxygène_dissous,existant),Fiabilité_co,moyenne),`
`condition(endossement,suffisante,est(augmentation_de_la_turbidité,existant),Fiabilité_tu,moyenne),`
`condition(endossement,suffisante,est(augmentation_de_la_concentration_en_métaux_lourds,existant),Fiabilité_cm,moyenne),`
`condition(endossement,suffisante,est(diminution_du_pH,existant),Fiabilité_ph,moyenne),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_température,existant),Fiabilité_te,faible),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_conductivité,existant),Fiabilité_cd,faible),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_dureté,existant),Fiabilité_d,faible)],[]).`
- 29- `regle(est(taux_de_mortalité_des_poissons,accru),moyenne,`
`[condition(endossement,nécessaire,est(diminution_de_la_concentration_en_oxygène_dissous,existant),Fiabilité_co,moyenne),`
`condition(endossement,nécessaire,est(diminution_du_pH,existant),Fiabilité_ph,moyenne),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_température,existant),Fiabilité_te,faible),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_concentration_en_métaux_lourds,existant),Fiabilité_cm,moyenne),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_dureté,existant),Fiabilité_d,faible)],[]).`
- 30- `regle(est(taux_de_croissance_des_poissons,réduit),moyenne,`
`[condition(endossement,nécessaire,est(diminution_de_la_concentration_en_oxygène_dissous,existant),Fiabilité_co,moyenne),`
`condition(endossement,nécessaire,est(diminution_du_pH,existant),Fiabilité_ph,moyenne),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_température,existant),Fiabilité_te,faible),`
`condition(endossement,supportive,est(augmentation_de_la_dureté,existant),Fiabilité_d,faible)],[]).`
- 31- `regle(est(corrosion_des_ouïes_des_poissons,existant),moyenne,`
`[condition(endossement,nécessaire,est(augmentation_du_pH,existant),Fiabilité_pH,forte)],[]).`
- 32- `regle(est(ulcération_des_opercules_des_poissons,existant),moyenne,`
`[condition(endossement,nécessaire,est(augmentation_du_pH,existant),Fiabilité_pH,forte)],[]).`

- 33- regle(est(erosion_du_lit,existant),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(teta,Teta),Fiabilite_t,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(teta_crtq_lit,T_crtq),Fiabilite_tc,forte),
 condition(endossement,necessaire,est_superieur_ou_egal_a(Teta,Teta_crtq),Fiabilite_composantes,_),[]].)
- 34- regle(est(vitesse_de_cisaillement_du_vent,U_cisail_vent),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(vitesse_du_vent,U_vent),Fiabilite_Uvent,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(cie_Von_Karmann,K),Fiabilite_k,faible),
 condition(endossement,necessaire,est(d50_berges,D50),Fiabilite_d50,moyenne),
 condition(endossement,necessaire,est_calcul(U_cisail_vent,U_vent*K/ln(1/6/D50)),Fiabilite_composantes,_),[]].)
- 35- regle(est(vitesse_de_cisaillement_critique_du_vent,U_cisail_vent_crtq),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est_calcul(U_cisail_vent,D50),Fiabilite_d50,forte),
 condition(endossement,necessaire,est_calcul(U_cisail_vent_crtq,14.3*sqrt(D50)),Fiabilite_composantes,_),[]].)
- 36- regle(est(charriage_des_sediments_du_lit,existant),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(mise_en_mouvement_des_sediments_du_lit,existant),Fiabilite_mmvt,moyenne),
 condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_cisaillement,U_cis),Fiabilite_U,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_chute_des_sediments_du_lit,Ws),Fiabilite_ws,forte),
 condition(endossement,necessaire,est_de(Rapport_des_vitesse,U_cis/Ws),Fiabilite_rp,_),
 condition(endossement,necessaire,est_inferieur_a(Rapport_des_vitesse,0.4),Fiabilite_cp,_),[]].)
- 37- regle(est(charriage_des_sediments_des_berges,existant),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(erosion_des_berges,existant),Fiabilite_erb,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_cisaillement,U_cis),Fiabilite_U,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_chute_des_sediments_des_berges,Ws),Fiabilite_ws,forte),
 condition(endossement,necessaire,est_calcul(Rapport_des_vitesse,U_cis/Ws),Fiabilite_rp,_),
 condition(endossement,necessaire,est_inferieur_a(Rapport_des_vitesse,0.4),Fiabilite_cp,_),[]].)

- 38- `regle(est(deposition_des_sediments,existant),elevée,`
`[condition(endossement,suffisante,est(deposition_des_sediments_du_lit,existant),Fiabilite_ssp,moyenne),`
`condition(endossement,suffisante,est(deposition_des_sediments_des_berges,existant),Fiabilite_sspb,moyenne)],[]).`
- 39- `regle(est(suspension_des_sediments,existant),elevée,`
`[condition(endossement,suffisante,est(suspension_des_sediments_du_lit,existant),Fiabilite_sspl,moyenne),`
`condition(endossement,suffisante,est(suspension_des_sediments_des_berges,existant),Fiabilite_ssplb,moyenne)],[]).`
- 40- `regle(est(suspension_des_sediments_du_lit,existant),tres_elevée,`
`[condition(endossement,necessaire,est(mise_en_mouvement_des_sediments_du_lit,existant),Fiabilite_mmv),forte),`
`condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_cisaillement,U_cis),Fiabilite_U,forte),`
`condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_chute_des_sediments_du_lit,Ws),Fiabilite_ws,forte),`
`condition(endossement,necessaire,est(calculate(Rapport_des_vitesses,U_cis/Ws),Fiab_rp),`
`condition(endossement,necessaire,est_superieur_ou_egal_a(Rapport_des_vitesses,0.4),Fiab_rapport,_),[]).`
- 41- `regle(est(suspension_des_sediments_des_berges,existant),tres_elevée,`
`[condition(endossement,necessaire,est(erosion_des_berges,existant),Fiabilite_erb,forte),`
`condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_cisaillement,U_cis),Fiabilite_U,forte),`
`condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_chute_des_sediments_des_berges,Ws),Fiabilite_ws,forte),`
`condition(endossement,necessaire,est_de(Rapport_des_vitesses,U_cis/Ws),Fiab_rp),`
`condition(endossement,necessaire,est_superieur_ou_egal_a(Rapport_des_vitesses,0.4),Fiab_cp),[]).`
- 42- `regle(est(deposition_des_sediments_du_lit,existant),tres_elevée,`
`[condition(endossement,necessaire,est(suspension_des_sediments_du_lit,existant),Fiabilite_ssp,forte),`
`condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_cisaillement,U_cis),Fiabilite_U,forte),`
`condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_chute_des_sediments_du_lit,Ws),Fiabilite_ws,forte),`
`condition(endossement,necessaire,est_calculate(Rapport_des_vitesses,U_cis/Ws),Fiab_rp),`
`condition(endossement,necessaire,est_inferieur_a(Rapport_des_vitesses,0.4),Fiab_rapport,_),[]).`

43- **regle(est(deposition_des_sediments_des_berges,existant),tres_elevee,**
[condition(endossement,necessaire,est(suspension_des_sediments_des_berges,existant),Fiabilite_ssp,forte),
condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_cisaillement,U_cis),Fiabilite_U,forte),
condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_chute_des_sediments_des_berges,Ws),Fiabilite_ws,forte),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(Rapport_des_vitesses,U_cis/Ws),Fiab_rp,_),
condition(endossement,necessaire,est_inferieur_a(Rapport_des_vitesses,0.4),Fiab_rapport,_)],[]).

44- **regle(est(pH,PH),elevee,**
[condition(endossement,necessaire,est(concentration_en_ions_Ca2,CCa2),Fiabilite_ca2,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(PH,5.7+1.7*0.4343*ln(CCa2)),Fiabilite_composantes,_)],[]).

45- **regle(est(vitesse,Vitesse),tres_elevee,**
[condition(endossement,necessaire,est(hauteur,H),Fiabilite_h,forte),
condition(endossement,necessaire,est(pente,I),Fiabilite_i,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(manning,N),Fiabilite_n,forte),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(Vitesse,H^(2/3)*sqrt(I)/N),Fiabilite_composantes,_)],[]).

46- **regle(est(charge_sedimentaire_du_lit_transportee_par_charriage,Qsc),tres_elevee,**
[condition(endossement,necessaire,est(charriage_des_sediments_du_lit,existant),Fiabilite_ssp,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(parametre_du_stade_de_transport_des_sediments_du_lit,T),Fiabilite_t,forte),
condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_du_lit,D_sed),Fiabilite_d,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(d50_lit,D50),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_du_lit,S),Fiabilite_s,faible),
condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitationnelle,G),Fiabilite_g,faible),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(Qsc,0.053*T^2.1*sqrt(G*(S-1))*D50^1.5/D_sed^0.3),Fiab_composantes,_)],[]).

47- regle(est(charge_sedimentaire_des_berges_transportee_par_charriage,Qsc),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(charriage_des_sediments_des_berges,existant),Fiabilite_ssp,moyenne),
 condition(endossement,necessaire,est(parametre_du_stade_de_transport_des_sediments_des_berges,T),Fiabilite_t,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_des_berges,D_sed),Fiabilite_d,moyenne),
 condition(endossement,necessaire,est(d50_berges,D50),Fiabilite_d50,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_des_berges,S),Fiabilite_s,faible),
 condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitationnelle,G),Fiabilite_g,faible),
 condition(endossement,necessaire,est_calcule(Qsc,0.053*T^2.1*sqrt(G*(S-1)*D50^1.5/D_sed^0.3),Fiab_composantes,_)],[]).
 48- regle(est(charge_sedimentaire_transportee_par_charriage,Qsc),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(charge_sedimentaire_du_lit_transportee_par_charriage,Qscl),Fiabilite_qscl,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(charge_sedimentaire_des_berges_transportee_par_charriage,Qscb),Fiabilite_qscb,forte),
 condition(endossement,necessaire,est_calcule(Qsc, Qscl+Qscb),Fiabilite_composantes,_)],[]).
 49- regle(est(parametre_du_stade_de_transport_des_sediments_du_lit,T),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(teta_prime_lit,T_prime),Fiabilite_tp,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(teta_crtq_lit,T_crtq),Fiabilite_tc,forte),
 condition(endossement,necessaire,est_calcule(T,(T_prime-T_crtq)/T_crtq),Fiabilite_composantes,_)],[]).
 50- regle(est(parametre_du_stade_de_transport_des_sediments_des_berges,T),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(teta_prime_berges,T_prime),Fiabilite_tp,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(teta_crtq_berges,T_crtq),Fiabilite_tc,forte),
 condition(endossement,necessaire,est_calcule(T,(T_prime-T_crtq)/T_crtq),Fiabilite_composantes,_)],[]).
 51- regle(est(teta_prime_lit,T_prime),tres_elevee,
 [condition(endossement,necessaire,est(vitesse,Vitesse),Fiabilite_v,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(chezy_prime,C_prime),Fiabilite_cp,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(d50_lit,D50),Fiabilite_d50,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_du_lit,S),Fiabilite_s,moyenne),
 condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_prime,Vitesse^2/(C_prime^2*(S-1)*D50)),Fiabilite_composantes,_)],[]).

```

52- regle(est(teta_prime_berges,T_prime),tres_elevee,
[condition(endossement,necessaire,est(vitesse,Vitesse),Fiabilite_v,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(chezy_prime,C_prime),Fiabilite_cp,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(d50_berges,D50),Fiabilite_d50,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_des_berges,S),Fiabilite_s,moyenne),
 condition(endossement,necessaire,est(calculate(T_prime,Vitesse^2/(C_prime^2*(S-1)*D50)),Fiabilite_composantes,_),[]]).

53- regle(est(chezy_prime,C_prime),tres_elevee,
[condition(endossement,necessaire,est(hauteur,H),Fiabilite_h,faible),
 condition(endossement,necessaire,est(d90_lit,D90),Fiabilite_d90,faible),
 condition(endossement,necessaire,est(calculate(C_prime,18*0.4343*ln(12*H/3/D90)),Fiabilite_composantes,_),[]]).

54- regle(est(charge_sedimentaire_du_lit_transportee_en_suspension,Qss),tres_elevee,
[condition(endossement,necessaire,est(suspension_des_sediments_du_lit,existant),Fiabilite_ssp,moyenne),
 condition(endossement,necessaire,est(vitesse,Vitesse),Fiabilite_v,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(vitesse_crtq_lit,V_crtq),Fiabilite_vc,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(d50_lit,D50),Fiabilite_d50,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_du_lit,D_sed),Fiabilite_d_sed,moyenne),
 condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_du_lit,S_sed),Fiabilite_s_sed,moyenne),
 condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitационnelle,G),Fiabilite_B,faible),
 condition(endossement,necessaire,est(calculate(Qss,0.012*((Vitesse-V_crtq)/sqrt(D50*(S_sed-1)*G)))^2.4*D50*D_sed*(-0.6)*Vitesse),Fiabilite_composantes,_),[]]).

55- regle(est(charge_sedimentaire_des_berges_transportee_en_suspension,Qss),tres_elevee,
[condition(endossement,necessaire,est(suspension_des_sediments_des_berges,existant),Fiabilite_ssp,moyenne),
 condition(endossement,necessaire,est(vitesse,Vitesse),Fiabilite_v,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(vitesse_crtq_berges,V_crtq),Fiabilite_vc,forte),
 condition(endossement,necessaire,est(d50_berges,D50),Fiabilite_d50,forte),

```

```

condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_des_berges,D_sed),Fiabilite_d_sed,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_des_berges,S_sed),Fiabilite_s_sed,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitationnelle,G),Fiabilite_g_faible),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(Qss,0.012*((Vitesse_V_crtq)/sqrt(D50*(S_sed-1)*G)))^2.4*D50*
D_sed^(gamma-0.6)*Vitesse),Fiabilite_composantes,_),[]).

56- regle(est(vitesse_crtq_lit,V_crtq),tres_elevee,
[condition(endossement,necessaire,est(d50_lit,D50),Fiabilite_d50,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_superieur_ou_egal_a(D50,0.0001),Fiabilite_d50,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D50,0.0005),Fiabilite_d50,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(d90_lit,D90),Fiabilite_d90,faible),
condition(endossement,necessaire,est(d90_hauteur,H),Fiabilite_h,faible),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(V_crtq,0.19*D50^0.1*0.4343*ln(12*H/3/D90)),Fiabilite_composantes,_),[]]).

57- regle(est(vitesse_crtq_berges,V_crtq),tres_elevee,
[condition(endossement,necessaire,est(d50_berges,D50),Fiabilite_d50,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_superieur_ou_egal_a(D50,0.0001),Fiabilite_d50,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D50,0.0005),Fiabilite_d50,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(d90_lit,D90),Fiabilite_d90,faible),
condition(endossement,necessaire,est(hauteur,H),Fiabilite_h,faible),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(V_crtq,0.19*D50^0.1*0.4343*ln(12*H/3/D90)),Fiabilite_composantes,_),[]]).

58- regle(est(erosion_du_lit,existant),tres_elevee,
[condition(endossement,necessaire,est(teta,T),Fiabilite_t,forte),
condition(endossement,necessaire,est(teta_crtq_lit,T_crtq),Fiabilite_tc,forte),
condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(T,T_crtq),Fiabilite_composantes,_),[]])).

```

```

59- regle(est(teta_crtq_lit,T_crtq),tres_elevee,Conditions_endossement,[]):-
    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_du_lit,D_sed),
                                         Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(D_sed,1),Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D_sed,4),Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_crtq,0.24/D_sed),Fiabilite_composantes,_)]);

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_du_lit,D_sed),
                                         Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(D_sed,4),Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D_sed,10),Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_crtq,0.14*D_sed^(-0.64)),Fiabilite_composantes,_)]);

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_du_lit,D_sed),
                                         Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(D_sed,10),Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D_sed,20),Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_crtq,0.04*D_sed^(-0.1)),Fiabilite_composantes,_)]);

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_du_lit,D_sed),
                                         Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(D_sed,20),Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D_sed,150),Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_crtq,0.013*D_sed^(0.29)),Fiabilite_composantes,_)]);

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_du_lit,D_sed),
                                         Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(D_sed,150),Fiabilite_d,forte),
                               condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_crtq,0.055),Fiabilite_composantes,_)]).

```

```

60- regle(est(teta_crtq_berges,T_crtq),tres_elevee,Conditions_endossement,[]):-  

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_des_berges,D_sed),  

        Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(D_sed,1),Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D_sed,4),Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_crtq,0.24*D_sed),Fiabilite_composantes,_)],  

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_des_berges,D_sed),  

        Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(D_sed,4),Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D_sed,10),Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_crtq,0.14*D_sed^(Y-0.64)),Fiabilite_composantes,_)]),  

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_des_berges,D_sed),  

        Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(D_sed,10),Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D_sed,20),Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_crtq,0.04*D_sed^(Y-0.1)),Fiabilite_composantes,_)]),  

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_des_berges,D_sed),  

        Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(D_sed,20),Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D_sed,150),Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_crtq,0.013*D_sed^(Y-0.29)),Fiabilite_composantes,_)]),  

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(diametre_sedimentologique_des_sediments_des_berges,D_sed),  

        Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(D_sed,150),Fiabilite_d,forte),  

        condition(endossement,necessaire,est_calcule(T_crtq,0.055),Fiabilite_composantes,_)]).

```

```

61- regle(est(teta,T),tres_elevee,
  [condition(endossement,necessaire,est(hauteur,H),Fiabilite_h,forte),
   condition(endossement,necessaire,est(pente,I),Fiabilite_i,forte),
   condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_du_lit,S),Fiabilite_s,moyenne),
   condition(endossement,necessaire,est(d50_lit,D50),Fiabilite_d50,forte),
   condition(endossement,necessaire,est_calcule(T,H*I/(S-1)/D50),Fiabilite_composantes,_)],[]).

62- regle(est(viscosite_de_l_eau,Nu),tres_elevee,
  [condition(endossement,necessaire,est(temperature_de_l_eau,Temper),Fiabilite_t,moyenne),
   condition(endossement,necessaire,est_calcule(Nu,(1.14-0.031*(Temper-15)+0.00068*(Temper-15)^2)*0.000001),
   Fiabilite_composantes,_)],[]).

63- regle(est(vitesse_de_cisaillement,U_cisaill),tres_elevee,
  [condition(endossement,necessaire,est(hauteur,H),Fiabilite_U,forte),
   condition(endossement,necessaire,est(pente,I),Fiabilite_i,forte),
   condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitationnelle,G),Fiabilite_g,faible),
   condition(endossement,necessaire,est_calcule(U_cisaill,sqrt(G*H*I)),Fiabilite_composantes,_)],[]).

64- regle(est(nombre_de_Reynolds,Re),tres_elevee,
  [condition(endossement,necessaire,est(d50_lit,D50),Fiabilite_d50,forte),
   condition(endossement,necessaire,est(viscosite_de_l_eau,Nu),Fiabilite_v,moyenne),
   condition(endossement,necessaire,est(vitesse_de_cisaillement,U_cisaill),Fiabilite_U,forte),
   condition(endossement,necessaire,est_calcule(Re,U_cisaill*D50/Nu),Fiabilite_composantes,_)],[]).

65- regle(est(regime_d_ecoulement,Regime),elevee,Conditions_endossement,[]):-
  Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(nombre_de_Reynolds,Re),Fiabilite_re,moyenne),
                             condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(Re,5),Fiabilite_re,moyenne),
                             condition(endossement,necessaire,est_attribue(Regime,laminaire),Fiabilite_composantes,_)]

```

```
Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(nombre_de_Reynolds,Re),Fiabilite_re,moyenne),
                           condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(Re,5),Fiabilite_re,moyenne),
                           condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(Re,70),Fiabilite_re,moyenne),
                           condition(endossement,necessaire,est_attribue(Regime,transitoire),Fiabilite_composantes,_))];
```

```
Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(nombre_de_Reynolds,Re),Fiabilite_re,moyenne),
                           condition(endossement,necessaire,est_superieur_a(Re,70),Fiabilite_re,moyenne),
                           condition(endossement,necessaire,est_attribue(Regime,turbulent),Fiabilite_composantes,_))].
```

- 66- regle(est(**contrainte_de_cisaillement**,Tau),tres_elevee,
[condition(endossement,necessaire,est(hauteur,H),Fiabilite_h,forte),
condition(endossement,necessaire,est(pente,I),Fiabilite_i,forte),
condition(endossement,necessaire,est(masse_volumique_de_l_eau,Ro_eau),Fiabilite_ro,faible),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(Tau,Ro_eau*G*H*I),Fiabilite_composantes,_)],[])).
- 67- regle(est(**densite_des_sediments_du_lit**,S_sed),tres_elevee,
[condition(endossement,necessaire,est(masse_volumique_de_l_eau,Ro_eau),Fiabilite_eau,faible),
condition(endossement,necessaire,est(masse_volumique_des_sediments_du_lit,Ro_sed),Fiabilite_sol,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(S_sed,Ro_sed/Ro_eau),Fiabilite_composantes,_)],[])).
- 68- regle(est(**densite_des_sediments_des_berges**,S_sed),tres_elevee,
[condition(endossement,necessaire,est(masse_volumique_de_l_eau,Ro_eau),Fiabilite_eau,faible),
condition(endossement,necessaire,est(masse_volumique_des_sediments_des_berges,Ro_sed),Fiabilite_sol,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(S_sed,Ro_sed/Ro_eau),Fiabilite_composantes,_)],[])).
- 69- regle(est(**manning**,N),elevee
[condition(endossement,necessaire,est(d90_lit,D90),Fiabilite_d,faible),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(N,(3*D90)^(1/6)/24),Fiabilite_composantes,_)],[])).

- 70- **regle(est(diametre_sedimentologique_des_sediments_du_lit,D_sed),tres_elevee,**
[condition(endossement,necessaire,est(d50_lit,D50),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_du_lit,S),Fiabilite_s_faible),
condition(endossement,necessaire,est(viscosite_de_l_eau,Nu),Fiabilite_v_moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitationnelle,G),Fiabilite_B_faible),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(D_sed,((S-1)*G/Nu^2)^(1/3)*D50),Fiabilite_composantes,_)],).
- 71- **regle(est(diametre_sedimentologique_des_sediments_des_berges,D_sed),tres_elevee,**
[condition(endossement,necessaire,est(d50_berges,D50),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_des_berges,S),Fiabilite_s_faible),
condition(endossement,necessaire,est(viscosite_de_l_eau,Nu),Fiabilite_v_moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitationnelle,G),Fiabilite_B_faible),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(D_sed,((S-1)*G/Nu^2)^(1/3)*D50),Fiabilite_composantes,_)],).
- 72- **regle(est(diametre_critique,D_critq),elevee,**
[condition(endossement,necessaire,est(d50_lit,D50),Fiabilite_d50,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(hauteur,H),Fiabilite_h,forte),
condition(endossement,necessaire,est(pente,I),Fiabilite_i,forte),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(D_critq,1*I*H*I),Fiabilite_composantes,_)],).
- 73- **regle(est(vitesse_de_chute_des_sediments_du_lit,Ws),elevee,Conditions_endossement,[,]),-**
Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(d50_lit,D50),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egal_a(D50,0.0001),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_du_lit,S),Fiabilite_s_moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitationnelle,G),Fiabilite_B_faible),
condition(endossement,necessaire,est(viscosite_de_l_eau,Nu),Fiabilite_nu_moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(Ws,1/18*(S-1)*G*D50^2/Nu),Fiabilite_composantes,_)],

```

Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(d50_lit,D50),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est_superieur_ou_egual_a(D50,0,0001),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egual_a(D50,0,001),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_du_lit,S),Fiabilite_s,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitationnelle,G),Fiabilite_g,faible),
condition(endossement,necessaire,est(viscosite_de_l_eau,Nu),Fiabilite_nu,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(Ws,10*Nu/D50*(sqrt(1+0.01*(S-1)*G*D50^3/Nu^2)-1)),  

    Fiabilite_composantes,_)).  

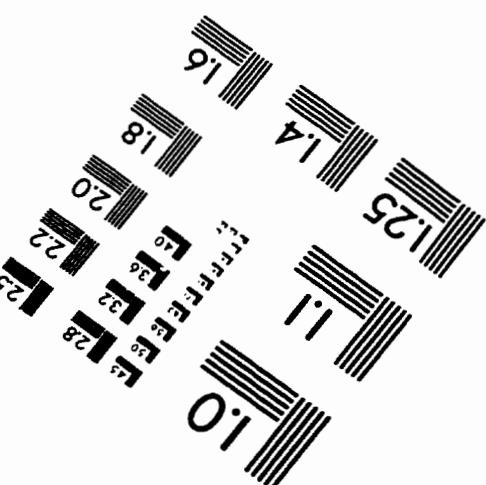
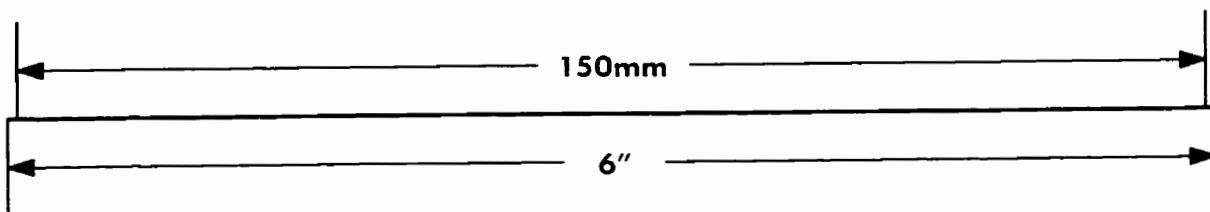
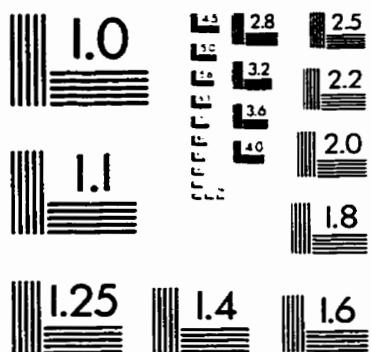
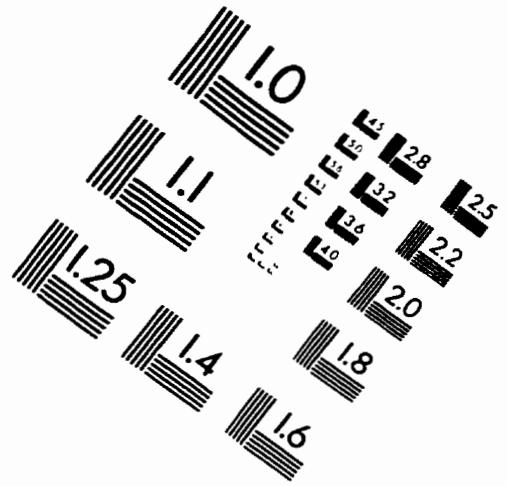
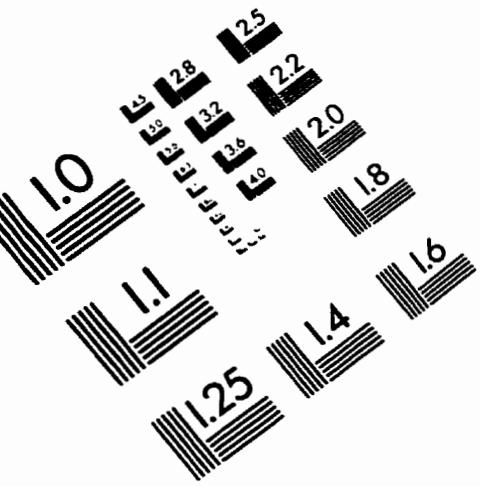
    regle(est(vitesse_de_chute_des_sediments_des_berges,Ws),elevee,Conditions_endossement,[])) :-  

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(d50_berges,D50),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egual_a(D50,0,0001),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_des_berges,S),Fiabilite_s,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitationnelle,G),Fiabilite_g,faible),
condition(endossement,necessaire,est(viscosite_de_l_eau,Nu),Fiabilite_nu,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(Ws,1/18*(S-1)*G*D50^2/Nu),Fiabilite_composantes,_)),  

    Conditions_endossement = [condition(endossement,necessaire,est(d50_berges,D50),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est_superieur_ou_egual_a(D50,0,0001),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est_inferieur_ou_egual_a(D50,0,001),Fiabilite_d50,forte),
condition(endossement,necessaire,est(densite_des_sediments_des_berges,S),Fiabilite_s,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est(acceleration_gravitationnelle,G),Fiabilite_g,faible),
condition(endossement,necessaire,est(viscosite_de_l_eau,Nu),Fiabilite_nu,moyenne),
condition(endossement,necessaire,est_calcule(Ws,10*Nu/D50*(sqrt(1+0.01*(S-1)*G*D50^3/Nu^2)-1)),  

    Fiabilite_composantes,_)].
```

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc.
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved

