N° d'ordre 2008-ISAL-0116 Année 2008

Thèse

Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous

présentée devant
L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

pour obtenir
le grade de docteur

Formation doctorale : Génie Civil
Ecole doctorale : Mécanique, Energétique, Génie civil, Acoustique

Spécialité : Génie civil urbain

par
Mazen IBRAHIM

Soutenue le 15 décembre 2008 devant la Commission d'examen

Jury

M. Daniel BOISSIER	Professeur, Université Clermont II	Rapporteur
M. Youssef DIAB	Professeur, Université Paris - Est	Rapporteur
M. Alain MAILHOT	Professeur, INRS, Québec (Canada)	
M. Marcel MIRAMOND	Professeur, INSA - Lyon	
Mme Caty WEREY	Ingénieur divisionnaire chargé de recherche, Cemagref - Strasbourg	
M. Pascal LE GAUFFRE	Maître de conférences – HDR, INSA - Lyon	Directeur de thèse
M Frédéric CHERQUI	Maître de conférences , Université Lyon 1	Directeur de thèse

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale de l'INSA de Lyon. Quelques lignes ne pourront jamais exprimer la reconnaissance que j'éprouve envers tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué par leurs conseils, leurs encouragements ou leur amitié à l'aboutissement de cette thèse.

Je tiens à remercier en premier lieu, **le professeur Bernard CHOCAT** pour m'avoir accueilli dans le laboratoire et avoir permis que ce travail se déroule dans les meilleures conditions.

Je remercie tout particulièrement mes directeurs de thèse, **Dr Pascal LE GAUFFRE et Dr Fréderic CHERQUI,** qui ont accepté d'encadrer cette thèse, qui m'ont témoigné leur soutien, leur confiance et pour leur patience. Ils ont su me faire bénéficier de leur expérience et de leurs compétences.

Je tiens à remercier **Dr Sylvie BARRAUD**, ma "maman du labo", pour son soutien moral et affectif qui a été souvent décisif dans les moments durs.

J'exprime ma sincère reconnaissance aux membres du jury, **Pr Daniel BOISSIER et Pr Youssef DIAB** d'avoir accepté de rapporter cette thèse et **Dr Caty WEREY, Pr Marcel MIRAMOND, Pr Alain MAILHOT** pour m'avoir fait l'honneur de faire partie du jury.

Des remerciements particuliers vont au **Dr Christiane DUJET et au Dr Denis MORAND** pour les conseils précieux qu'ils m'ont apportés.

Je remercie tous les chercheurs, enseignants et membres du personnel du laboratoire. Ce travail n'aurait jamais pu aboutir sans leur aide précieuse et leur gentillesse **: Pr Jean-Luc, Dr Jean Pascal**, **Dr Gislain, Valérie,** Christian, Renée, Dominique. Je ne saurais oublier mes camarades et collègues de laboratoire pour leur cordialité grâce à laquelle cette thèse s'est déroulée dans un climat stimulant et sympathique. Je tiens à remercier : **Hatem et Mohamed, Damien, Farah, Hamouda,** Abel, Céline, Marjolaine**,** David, Jérôme, Antoine, Andreas, Yvan, Adrien, Miguel, Priscilla.

Papa, Maman et mon frère Maher pour votre aide sentimentale, morale et financière tout au long de mes études. Je ne voudrais, non plus, oublier le rôle de **mes soeurs Maha, Mayada, Abir et Saad** qui a été capital tout au long de ces années. Enfin que ma chère épouse, **Alaa, et mon fils Taym**, sachent que leur mari et papa n'a pu aller au bout de cette aventure que parce qu'ils étaient là, et qu'elle n'aurait eu aucun sens sans eux.

Avant de terminer, je souhaite remercier mon pays la **Syrie** et son **président Dr Bashar Al Assad** pour leur aide financière.

Résumé

Les réseaux d'assainissement se dégradent plus ou moins rapidement dans le temps. La gestion patrimoniale doit donc établir des programmes afin d'évaluer et de réduire cette dégradation. En France, le projet national RERAU (Réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains) a proposé une méthodologie pour évaluer l'état des réseaux et ses évolutions probables et hiérarchiser des tronçons prioritaires vis-à-vis d'investigations et de réhabilitations. Cependant cette méthodologie nécessite encore des calages, des améliorations et des expérimentations pour permettre son application par les gestionnaires. La thèse constitue un prolongement des recherches menées dans le cadre du PN RERAU et s'inscrit dans le programme INDIGAU (Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains – ANR – PRGCU 2006).

Le premier volet de la recherche porte sur une analyse critique des indicateurs et des critères RERAU. Ce volet comprend deux tâches :

- tâche 1 : construction d'indicateurs de dysfonctionnement précis évalués à partir de résultats d'inspections visuelles. L'ensemble des observations obtenues sur un tronçon est résumé par une note qui est ensuite comparée à trois valeurs seuils. Cette tâche traite du calage des paramètres de calcul de la note de synthèse et du calage des trois seuils délimitant les quatre niveaux de gravité. Nous proposons un critère de calage qui permet de prendre en compte les impacts de plusieurs types d'erreurs possibles.

- tâche 2 : analyse critique de la formulation des critères de réhabilitation de *RERAU*. Les formulations des critères sont modélisées numériquement afin de les tester. Des indices sont proposés et calculés pour permettre de vérifier si la formulation d'un critère est en accord avec les intentions des experts.

Le second volet de la recherche présente une approche basée sur la théorie des sous ensembles flous pour les indicateurs et les critères RERAU. Nous proposons une approche floue à la fois plus robuste pour évaluer les critères et plus fine pour représenter la hiérarchie des priorités. Ce volet comprend les deux tâches suivantes :

- tâche 3 : modèle de fusion des indicateurs. Le « modèle RERAU » ne traite pas explicitement de la qualité des données utilisées et des connaissances (règles d'agrégation). Nous proposons un modèle de fusion basé sur l'inférence floue ainsi que des règles floues dérivées des règles RERAU.

- tâche 4 : indicateurs flous évalués à partir de résultats d'inspections visuelles, permettant d'exprimer l'imprécision de la transition entre deux niveaux d'état de santé. Un critère de calage d'un seuil flou est proposé.

Les méthodes de calage proposées sont expérimentées avec des données issues du projet INDIGAU. Les résultats obtenus démontrent la valeur opérationnelle de nos propositions.

Mots clés :
Gestion patrimoniale, réseaux d'assainissement, réhabilitation, évaluation, agrégation, critère, indicateur, flou.

Abstract

The condition of urban sewer networks is deteriorating over time. To face this ageing process, sewer asset management has to define suitable programs for assessing and limiting degradations. In France, the R&D RERAU programme proposed a methodology to assess the current condition and likely evolution of sewer pipes, and to decide which sewer segments are priority projects for investigation or for rehabilitation. However, this methodology needs further calibrations, improvements and experiments to enable its implementation in waste water utilities. These needs are tackled by this research that is part of the INDIGAU project (*Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains* – ANR – PRGCU 2006).

The first part of this research is a critical analysis and improvements of indicators and criteria that were developed within the RERAU programme. This part consists of two tasks:

-task 1: construction of crisp dysfunction indicators derived from visual inspection data. Step 1: a score is calculated by using single scores relating to observed defects. Step 2: this score is compared to crisp cut-off thresholds for defining a condition grade. We propose a calibration process and a calibration criterion that take into account several types of assignment errors.

-task 2: critical analysis of the formulation of rehabilitation criteria. The criteria calculation process has been computerized and numerical experiments have been conducted. Some numerical indices are proposed and used in order to identify anomalies and to improve criteria formulations.

The second part of this research deals with fuzzy indicators and fuzzy aggregation. This part consists of two tasks:

-task 3: fuzzy rules for assessing rehabilitation criteria. The RERAU programme provided crisp rules for aggregating base indicators within composite indicators and criteria. To allow imprecise knowledge and conclusions to be used, we propose a fuzzy fusion model and fuzzy rules.

-task 4: calibration process of fuzzy cut-off thresholds for evaluating performance indicators derived from visual inspection data.

The proposed calibration processes have been experimented, within the INDIGAU project, with data provided by French utilities. The results obtained demonstrate the operational value of our proposals.

KEYWORDS:

Asset management, sewer network, rehabilitation, assessment, aggregation, criteria, indicator, fuzzy.

Sommaire

Remerciements **5**

Résumé **7**

Abstract **9**

Sommaire **11**

Introduction générale **13**

1 Chapitre 1. Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : fusion d'informations et critères de réhabilitation **18**

1.1 Introduction 18

1.2 Généralités sur la gestion patrimoniale 19

1.3 Les différents modes de réhabilitation des réseaux d'assainissement 23

1.4 Approches pour l'organisation de la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement 25

1.5 Cadre théorique de la thèse 28

2 Chapitre 2. Indicateurs précis évalués à partir de résultats d'inspections visuelles **41**

2.1 Introduction : de l'observation à l'évaluation 41

2.2 Codage des défauts et évaluation des dysfonctionnements 43

2.3 Critère de calage proposé 47

2.4 Procédure de calage des seuils pour un échantillon avec avis d'experts 50

2.5 Calage des seuils pour un échantillon local représentatif du patrimoine à évaluer 55

2.6 Calage des seuils pour un échantillon local non représentatif du patrimoine à évaluer 59

2.7 Conclusion 63

3 Chapitre 3. Analyse critique de la formulation des critères RERAU **66**

3.1 Objectifs 66

3.2 Démarche suivie 66

3.3 Indices pour l'analyse de la formulation d'un critère 69

3.4 Bilan de l'analyse de la formulation des critères 80

3.5 Conclusion et discussion 82

4 Chapitre 4. Modèles de fusion des indicateurs RERAU **84**

4.1 Introduction 84

4.2 Etude des règles de fusion issues du PN RERAU 86

4.3 Problématiques associées au modèle RERAU 87

4.4 Cadres théoriques possibles 89

4.5 Modèle de fusion floue proposé 97
4.6 Conclusion et discussion 107

5 Chapitre 5. Indicateurs flous évalués à partir de résultats d'inspections visuelles 109
5.1 Introduction : positionnement des problèmes dus à l'approche RERAU 109
5.2 Procédure de calage sans pondération des erreurs d'affectation 111
5.3 Procédure de calage avec pondération des erreurs d'affectation 118
5.4 Comparaison des seuils précis et flous 120
5.5 Conclusion et discussion 121

6 Chapitre 6. Expérimentation 123
6.1 Objectifs 123
6.2 Présentation des cas réels 123
6.3 Application de la méthode de calage des seuils précis 125
6.4 Application des méthodes de calage des seuils flous 133
6.5 Comparaison des seuils précis et des seuils flous 135
6.6 Conclusion et discussion 135

Conclusion générale 137

Références bibliographiques 141

Table des figures 153

Table des tableaux 157

7 Annexes 161
7.1 Annexe 1 : systèmes de notation 162
7.2 Annexe 2 : critères de décision en situation d'incertitude 167
7.3 Annexe 3 : synthèse de l'étude numérique des différents critères 168
7.4 Annexe 4 : synthèse de l'étude des critères 172
7.5 Annexe 5 : la logique floue 179
7.6 Annexe 6 : inférence floue 184
7.7 Annexe 7 : choix de systèmes d'opérateurs pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles 186
7.8 Annexe 8 : contrôler l'hésitation (masse de flou) entre 2 modalités de la table d'agrégation 191

Généralités

Le réseau d'assainissement constitue un élément important et nécessaire pour assurer un niveau de qualité de vie des usagers. Les tronçons des réseaux d'assainissement urbains souffrent du vieillissement et de dommages continus et le vieillissement des réseaux urbains constitue depuis plusieurs années une préoccupation majeure des gestionnaires publics et privés (AGHTM, 2003). Cela explique les exigences de réhabilitations des réseaux d'assainissement qui sont proposées pour essayer de remédier aux dysfonctionnements observés (Le Gauffre *et al.*, 2004).

La gestion patrimoniale d'un réseau d'assainissement vise à maintenir l'infrastructure dans un état satisfaisant vis-à-vis d'enjeux sanitaires, environnementaux, économiques, etc. Elle comprend l'acquisition d'informations enregistrées dans des bases de données, l'évaluation des performances de l'infrastructure et la réhabilitation d'éléments ou de sous-systèmes considérés comme défaillants ou à risque.

La maintenance et la réhabilitation des réseaux deviennent indispensables. Nous nous trouvons donc devant une problématique de gestion technique dont les enjeux sont très variés ; ils peuvent être d'ordre économique, social, ou/et environnemental et concernent deux échelles de temps :

- la construction d'une stratégie de réhabilitation à long terme : il s'agit de prévoir l'évolution de l'état et des performances d'un réseau, puis de construire et évaluer des stratégies d'action ;
- la construction des programmes annuels ou pluriannuels de réhabilitation et d'inspection : il s'agit de hiérarchiser les tronçons pour sélectionner les tronçons prioritaires à réhabiliter ou à inspecter compte tenu de la stratégie retenue et des budgets effectivement disponibles.

Contexte de la thèse

De 1992 à 2004, la conduite du Projet National RERAU a permis de faire naître diverses méthodologies concernant l'auscultation et la réhabilitation des réseaux d'assainissement. Concernant la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement, deux guides méthodologiques sont apparus successivement dans le cadre des projets RERAU 1 (RERAU, 1998) et RERAU 5/6 (Le Gauffre *et al.*, 2004).

La gestion des patrimoines bâtis constitue une préoccupation croissante pour les maîtres d'ouvrage. On peut définir les objectifs d'une gestion patrimoniale de la manière suivante : « constituer et maintenir un patrimoine de données et de connaissances, pour maintenir un patrimoine physique et anticiper les besoins futurs » (Le Gauffre *et al.*, 2004). Élaboré dans le cadre du Projet National RERAU (*Réhabilitation*

des Réseaux d'Assainissement Urbains), l'ouvrage[1] « *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains* » propose un ensemble de critères pour l'organisation des investigations et des réhabilitations. Ces critères sont construits par agrégation d'indicateurs de performance issus de sources complémentaires (données d'exploitation du réseau, modèles de vieillissement, résultats d'inspections visuelles, mesures en réseau…).

La méthodologie RERAU d'aide à la gestion des collecteurs vise à définir des priorités, tant en inspection qu'en réhabilitation. Elle est fondée sur un ensemble d'indicateurs : indicateurs d'état, indicateurs de dysfonctionnement, indicateurs de vulnérabilité, indicateurs d'impact. Certains indicateurs correspondent à des situations avérées, d'autres à des risques ou présomptions. L'échelle de base de définition des indicateurs est le tronçon, mais des informations plus globales, à l'échelle du bassin versant sont également utilisées. Ces indicateurs sont ensuite combinés pour obtenir des critères de priorité des deux types d'action (investigation, réhabilitation) vis-à-vis de différents types d'impact.

La méthodologie RERAU permet donc d'exploiter des informations variées dans un cadre standardisé : chaque indicateur et chaque critère est évalué sur une échelle à 4 niveaux (de « G1-pas de déficience » à « G4-déficience majeure »). Les indicateurs sont agrégés au moyen d'opérateurs exprimés sous la forme de tables 4x4**.**

L'action 2 de RERAU 5/6 s'appuie en particulier sur l'utilisation des inspections visuelles et de la norme européenne EN 13508 relative à la codification des observations. Les inspections visuelles par caméra (inspection télévisées, ITV) jouent un rôle essentiel dans la connaissance de l'état des canalisations lorsque le réseau ne permet pas le passage d'un homme.

Objectifs de la thèse et organisation du mémoire

Le problème de la gestion du patrimoine auquel nous nous intéressons dans cette thèse concerne la construction des critères de réhabilitation des réseaux d'assainissement. L'objectif principal de cette thèse est de compléter, critiquer et fiabiliser l'approche RERAU Dans cette thèse, nous essayons de développer une approche floue à la fois plus robuste pour évaluer les critères et plus fine pour représenter la hiérarchie des priorités. La thèse s'inscrit dans le projet INDIGAU. Le mémoire est formé de six chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Dans ce chapitre, nous présentons des éléments de principe sur la gestion patrimoniale. Nous présentons ensuite les généralités sur la réhabilitation des réseaux d'assainissement ainsi que les différents types organisés de gestion. Nous détaillons l'approche retenue dans le PN RERAU, les différents indicateurs et critères de réhabilitation, les limites ainsi que les développements proposés dans le cadre du projet INDIGAU et la situation de la thèse par rapport à ce projet de recherche. L'idée

[1] Le Gauffre, P., Joannis, C., Breysse, D., Gibello, C., Desmulliez, J.J. Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Guide méthodologique. Lavoisier Tec&Doc, Paris, 2004, 416 p.

directrice de la méthode RERAU est d'identifier des tronçons prioritaires vis-à-vis d'opérations d'investigation ou de réhabilitation, en basant cette hiérarchisation sur l'impact des défauts détectés ou susceptibles de l'être. Les objectifs de la thèse sont de compléter l'outil RERAU, de définir des règles et des procédures pour faciliter son utilisation. A partir de ces objectifs nous avons pu définir les différentes tâches de travail qui seront étudiées dans les chapitres suivants.

Le deuxième chapitre présente d'une façon détaillée les indicateurs de dysfonctionnement basés sur des résultats d'ITV. Nous proposons une approche de calage pour la construction des indicateurs de dysfonctionnement évalués à partir des défauts observés. Pour cela un échantillon a été créé pour confronter les notes calculées (N) et des avis d'experts. Puis des seuils destinés à définir un niveau de dysfonctionnement à partir de la note de synthèse retenue sont calés. Le critère de calage qui est proposé permet de prendre en compte les coûts associés aux différentes erreurs d'affectation. Enfin des procédures sont proposées pour le calage des seuils (S1, S2, S3) pour un échantillon local (représentatif ou non représentatif) du patrimoine à évaluer.

Le troisième chapitre est un réexamen de la formulation des critères RERAU d'un point de vue numérique. Tout d'abord nous faisons un prototype d'outil informatique programmé en Visual Basic. Ce dernier permet de modéliser la formulation de chaque critère numériquement sous Excel. Puis nous proposons plusieurs indices permettant de tester la formulation du critère. Les indices proposés permettent d'évaluer la formulation globale d'un critère RERAU, de juger de l'importance relative de chaque indicateur pour l'évaluation d'un critère et également d'identifier des anomalies potentielles dans la formulation. Enfin, l'étude des différents indices associés aux indicateurs constituant un critère peut être résumée dans un tableau. Ce type de tableau permet de vérifier si la formulation du critère est en accord avec les intentions des experts à partir du classement des indicateurs.

Le chapitre quatre étudie la fusion des indicateurs RERAU. Le « modèle RERAU » ne traite pas explicitement de la qualité des données utilisées (les incertitudes, les imprécisions et l'incomplétude) et des connaissances (les tableaux). Dans un premier temps les caractéristiques des données et des connaissances manipulées sont identifiées et les enjeux de la représentation de la qualité des données et des connaissances sont évalués. Puis, quelques éléments théoriques sur la fusion d'informations et différentes techniques de modélisation des incertitudes et des imprécisions sont rappelées : approche probabiliste et réseaux bayésiens, fonctions de croyance, approche floue et approche possibiliste. Enfin, un modèle de fusion floue est présenté. Le modèle de fusion floue proposé se base sur la technique d'inférence floue.

Le chapitre cinq porte sur le calage d'indicateurs flous, évalués à partir de résultats d'inspections visuelles. La valeur d'un indicateur précis évalué à partir des résultats d'une inspection visuelle découle de la comparaison d'une note D avec 3 seuils précis. Les trois seuils précis ne prennent pas en compte les incertitudes et les imprécisions des données (densités de désordres & avis d'expert précis). Cela nous amène à proposer de remplacer chaque seuil précis par un seuil flou permettant d'exprimer l'imprécision

de la limite entre deux niveaux d'état de santé. Pour cela, nous avons proposé un critère de calage de seuil flou entre deux niveaux d'état de santé. Ce critère se base sur l'écart entre l'ensemble des avis d'experts flous (comme référence) et les valeurs calculées par seuil flou.

Le chapitre six présente l'application des méthodes de calage proposées sur un cas réel mené dans le cadre du projet INDIGAU. Cette phase d'expérimentation est essentielle pour adapter au mieux la théorie de la méthodologie proposée aux situations diverses rencontrées par les gestionnaires.

1 Chapitre 1. Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : fusion d'informations et critères de réhabilitation 18

1.1 Introduction 18

1.2 Généralités sur la gestion patrimoniale 19

1.2.1 Patrimoine et patrimoine de R.A.U 19

1.2.2 Principes de gestion patrimoniale 20

1.3 Les différents modes de réhabilitation des réseaux d'assainissement 23

1.3.1 Réhabilitation : définitions et commentaires 23

1.3.2 Réhabilitations corrective, préventive et prévisionnelle 24

1.4 Approches pour l'organisation de la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement 25

1.4.1 Formulation en terme d'optimisation économique 26

1.4.2 Formulation en terme d'aide multicritère à la décision 27

1.5 Cadre théorique de la thèse 28

1.5.1 Les résultats du PN RERAU 29

1.5.2 Les objectifs du projet INDIGAU et la formulation des objectifs de la thèse 37

1 Chapitre 1. Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : fusion d'informations et critères de réhabilitation

1.1 Introduction

Les infrastructures de génie civil, et particulièrement les réseaux d'assainissement, sont nécessaires pour assurer le niveau de qualité de vie des usagers. Ces réseaux d'assainissement urbains sont également en interactions avec le milieu naturel. Les tronçons des réseaux d'assainissement urbains souffrent du vieillissement et de dommages continus. Cela explique les exigences des réhabilitation de réseaux d'assainissement qui sont proposées pour remédier aux dysfonctionnements observés ou réduire les risques de dysfonctionnements (Vasconcelos & Le Gauffre, 2003b; Le Gauffre *et al.*, 2004).

La demande auprès d'organismes de recherche reste forte pour définir des méthodologies de gestion patrimoniale. Cette gestion doit assurer la sécurité et garantir la pérennité des biens et des personnes (Serre, 2005). Elle doit assurer que l'ouvrage remplisse ses fonctions requises et assurer la conservation d'un patrimoine pour une durée déterminée (Cremona, 2002). Les objectifs de l'entretien peuvent être de conserver le patrimoine et offrir un niveau de service adapté aux usagers. Goyon Leroux (2006) définit l'entretien du patrimoine comme « ensemble des actions entreprises pour maintenir la qualité du patrimoine et de ses équipements afin d'assurer à l'usager des conditions de sécurité et de confort définies ». Le réseau d'assainissement peut être considéré comme un patrimoine dans la mesure où il fournit un service, et ceci de manière fiable et pérenne.

La qualité de gestion des réseaux dépend avant tout de la connaissance que l'on en a. L'un des grands principes d'une gestion patrimoniale efficace est « la capitalisation d'informations et de connaissances sur les interactions entre le patrimoine et ses environnements » (Le Gauffre *et al.*, 2001). L'objet de la gestion patrimoniale est de « réunir les conditions permettant de préserver la durée de vie des ouvrages et d'assurer leur renouvellement dans des conditions financières acceptables pour le service et pour l'abonné en particulier » (Vanier, 2001).

Il s'agit donc de maintenir les patrimoines dans les meilleures conditions techniques et économiques (Delfosse, 2001) c'est-à-dire de déterminer quand et comment réhabiliter les éléments des réseaux de la façon la plus efficace et la plus économique possible. **La première difficulté de la gestion du patrimoine est dans l'évaluation de l'état présent d'un patrimoine.**

La méthodologie RERAU préconise l'exploitation d'informations variées : observations visuelles, mesures, plaintes, etc. pour construire un tableau de bord. Ce tableau de bord correspond à un ensemble d'indicateurs de performance et de critères. Ce tableau nous permet d'évaluer et de comparer les tronçons afin de programmer des investigations, des réhabilitations et plans d'entretien. Il permet de quantifier la performance d'un réseau et sa politique de gestion (Le Gauffre *et al.*, 2004 ; Vasconcelos, 2004).

Le premier chapitre de ce mémoire constitue une bibliographie générale sur la gestion patrimoniale pour la réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains. Nous menons une étude sur des méthodologies existantes concernant la gestion patrimoniale et la réhabilitation des réseaux d'assainissement. Ensuite nous présentons les approches pour l'organisation de la gestion et nous nous focalisons sur l'approche du PN RERAU. Nous présentons les différents indicateurs et critères de réhabilitation, les limites du guide méthodologique issu du PN RERAU ainsi que les développements proposés dans le cadre du projet INDIGAU.

1.2 Généralités sur la gestion patrimoniale

Avant de présenter les différentes composantes d'une gestion patrimoniale des infrastructures, il semble indispensable et judicieux d'insister sur quelques définitions du patrimoine et sur quelques informations sur le patrimoine des réseaux d'assainissement urbains (R.A.U).

1.2.1 Patrimoine et patrimoine de R.A.U

Dans la littérature et concernant la notion de patrimoine, plusieurs définitions, complémentaires ou convergentes, peuvent être relevées. Mais en résumé, un patrimoine : « qu'il soit naturel ou technique (une rivière, un réseau d'assainissement, etc.) peut être vu comme un système doté d'autonomie (réserves et capacités de régulation) destiné à, ou utilisé pour, fournir de l'autonomie à son ou ses titulaire(s) » (Le Gauffre *et al.,* 2001). « Les réseaux techniques urbains, en particulier ceux de l'assainissement, constituent un patrimoine car ils fournissent un service et ils disposent de capacités à fournir ce service de façon pérenne. Ceci correspond à des capacités de régulation, d'adaptation, et surtout de maintenance, qui dépendent de l'infrastructure physique considérée mais aussi des pratiques de gestion » (Poinard, 2006).

Ces réseaux présentent en France un linéaire d'environ 246 000 kilomètres de canalisation d'eaux usées ou unitaires selon l'enquête réalisée en 1998 par l'IFEN, le SCEES et les Agences de l'eau (IFEN, 2002). Elles comprennent les ouvrages visitables et les ouvrages non visitables dont la moitié a plus de 40 ans. L'état d'un tronçon est visualisé par l'homme directement ou par l'inspection télévisée. Le taux annuel d'extension s'élevait à 2,2 % et concernait surtout les communes de moins de 3 500 habitants.

Le renouvellement concerne essentiellement les communes de plus de 20 000 habitants car ces communes possèdent un réseau plus ancien (85 % des communes rurales n'ont pas effectué de rénovation). En 1998, environ 1 800 km de canalisation ont été remplacés ou réhabilités, le taux de remplacement annuel est de 2,4 % pour les communes concernées et de 0,7 % pour l'ensemble du territoire. Par ailleurs, selon une étude menée en France par l'OIE (Berland, 2004), entre 5 000 et 35 000 km de canalisation de collecte des eaux usées seraient à réhabiliter dans les années à venir.

Ces réseaux d'assainissement représentent un patrimoine énorme dans les pays développés. Selon Saegrov & Schilling (2004 a ; 2004 b), les villes européennes dépensent une moyenne annuelle d'un milliard d'euros

(entre 800 millions et 1,3 milliards) pour la réhabilitation des réseaux, avec la tendance d'une augmentation du budget annuel dû au processus de vieillissement des réseaux.

1.2.2 Principes de gestion patrimoniale

La gestion patrimoniale, et particulièrement dans le domaine des réseaux urbains comme les voiries, les réseaux d'eau potable et d'assainissement, a fait l'objet de nombreux travaux de recherche et développement ces dernières années. Des outils de gestion patrimoniale sont proposés par plusieurs organismes ou groupements. Avant de présenter les différentes approches existantes pour l'organisation de la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement, nous rappelons brièvement quelques caractéristiques des problèmes de gestion patrimoniale.

La gestion de patrimoine « se caractérise par la recherche de la maîtrise des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance. Elle comprend deux aspects très liés : la gestion technique et la gestion financière » (Lair, 2000). La gestion technique consiste à maintenir un niveau de performance requis pendant une durée de vie donnée. Par ailleurs la gestion financière concerne les coûts liés, à la construction, au fonctionnement, à la maintenance et à la réhabilitation (Serre, 2005 ; Vanier, 2001).

Des buts organisationnels, des politiques et des budgets établissent une philosophie évaluative cohérente. La gestion des biens combine la technologie, les analyses mathématiques, la procédure de gestion et la théorie économique (Voir figure 1).

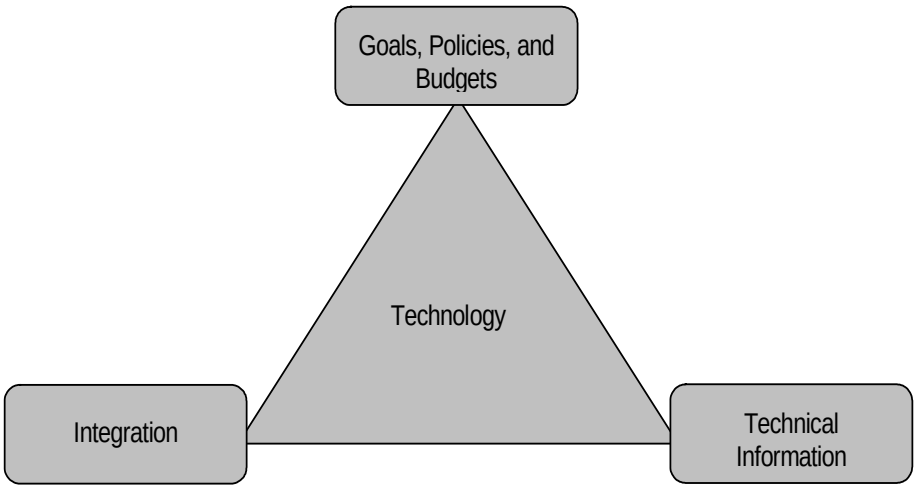


Figure 1 : structuration d'une gestion stratégique du patrimoine (*Strategic Asset Management Framework Requirements*) (FHWA, 1999)

La *Federal Highway Administration* (FHWA, 1999) définit la gestion des patrimoines comme étant « un processus systématique de maintien, de mise à niveau et d'exploitation rentable des biens physiques. Elle associe les principes d'ingénierie, les pratiques commerciales et la théorie économique, et fournit des outils qui favorisent une démarche plus organisée, logique à l'égard du processus de décision ». Le principe de gestion des patrimoines évoqué plus haut est très cité dans la bibliographie (Schulting, 2007). Il constitue la forme « classique » en matière de gestion patrimoniale.

La gestion des patrimoines détermine comment mieux déployer les ressources disponibles afin de réaliser des buts (attentes de l'usager). Elle répond à des demandes croissantes d'un environnement de l'infrastructure, de vieillissement de système, et de ressources limitées. Elle fournit également la capacité de montrer comment, quand, et pourquoi des ressources ont été affectées (Alegre, 2007). En d'autres termes, il s'agit de réhabiliter le bon tronçon, au bon moment, en utilisant la bonne technique de réhabilitation, pour un coût total à minimiser, et ce avant que des problèmes sérieux n'adviennent (Saegrov, 2006) (Voir figure 2).

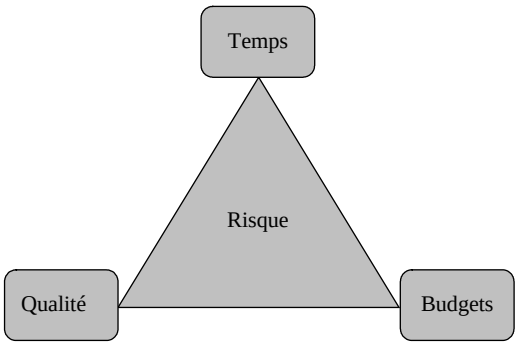


Figure 2 : le principe de base de la gestion patrimoniale

La gestion d'un patrimoniale consiste à connaître, évaluer, planifier et enregistrer toutes les informations (Delfosse, 2001). Pour connaître le patrimoine, il est important de définir ce que l'on souhaite gérer et de déterminer un vocabulaire commun aux acteurs de la gestion. Evaluer le patrimoine consiste à déterminer l'état et la performance des ouvrages à gérer. Planifier consiste à définir des priorités d'interventions sur les ouvrages selon les objectifs en intégrant les coûts de ces interventions (Serre, 2005 ; Alegre, 2007 ; Haskins, 2006).

La figure suivante présente les différentes composantes (hiérarchie entre les différents niveaux) d'une gestion patrimoniale des infrastructures ainsi que leurs relations. Ainsi, de nombreux travaux ont été entamés dans le domaine de la gestion patrimoniale des infrastructures (Goyon Leroux, 2006 ; Sklar &West , 2007 ; Quick, 2007 ; Brueck & Blankenship, 2007 ; Boudon *et al.*, 2007). Ils donnent une base de départ intéressante à toute tentative de mise au point d'outils de gestion de patrimoine. La logique étant de commencer par connaître le patrimoine, sa valeur, son état, afin de mettre en place une priorisation des interventions de maintenance (Vanier & Rahman, 2004).

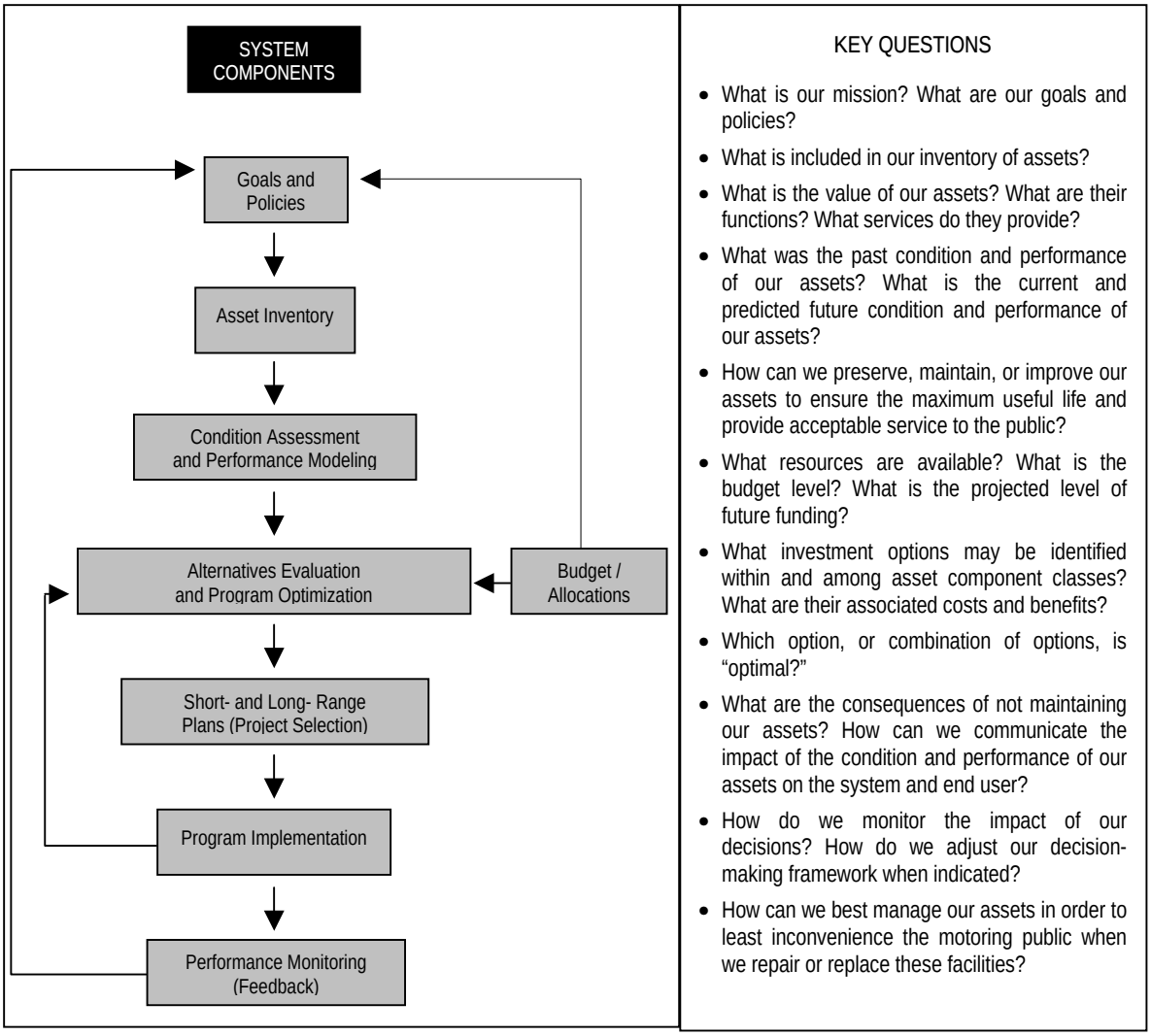


Figure 3 : les différentes composantes d'une gestion patrimoniale ainsi que leurs relations (*A Generic Asset Management System*) (FHWA, 1999)

Ces différentes composantes sont définies par les volets suivants :

Objectifs («*Goals*») : la gestion de patrimoine est une gestion centrée sur les usagers et les besoins perçus du public. Elle exploite l'expression des attentes des usagers («***customer input***») pour la définition des niveaux de service correspondants. Ces niveaux de service sont traduits en buts et en indicateurs de performance.

Constitution du patrimoine («*Asset inventory*») : la gestion implique d'acquérir de l'information sur le patrimoine à gérer.

Modèle d'évaluation de la performance («*Performance Modeling*») : évaluer le patrimoine consiste à déterminer l'état et la performance des ouvrages à gérer. Cette performance doit refléter les objectifs et synthétiser l'état du patrimoine sous la forme d'indicateurs ou critères. Cela implique d'acquérir, de sauvegarder et d'analyser les informations relatives à l'état du patrimoine, à ses dysfonctionnements et aux impacts socio-économiques induits. Ces informations sont des connaissances de diagnostic établies par

comparaison entre la qualité de service observée et les objectifs et les attentes vis-à-vis de la performance. Les impacts sociaux sont les conséquences des dysfonctionnements compte tenu de la sensibilité de l'environnement et des usages.

Évaluation d'alternatives («*Alternatives Evaluation*») : afin de préserver, maintenir (entretenir) ou améliorer notre patrimoine pour fournir au public un service acceptable et le garantir au maximum dans l'avenir, il faut identifier les alternatives d'investissement, leurs dépenses associées, leurs bénéfices (Schulting, 2007 ; EPA, 2003).

Définir une politique d'entretien («*Short- and Long- Range Plans*») : c'est la définition des stratégies d'entretien qui vont ensuite être traduites en termes techniques. Le choix des stratégies d'entretien est une décision définie en cohérence avec les contraintes budgétaires et les attentes des usagers. Cette stratégie choisie sera traduite en un programme d'investissements optimisés.

Mise en oeuvre du programme («*Program Implementation*») : c'est l'application de la stratégie d'entretien retenue qui doit être suivie et calée en liaison avec les unités territoriales et par rapport aux contraintes budgétaires. C'est une démarche itérative.

Surveillance des performances (« *Performance Monitoring* ») : le suivi itératif de la stratégie d'entretien sert à détecter des zones de problèmes, permettant de les prendre en compte à la prochaine itération.

1.3 Les différents modes de réhabilitation des réseaux d'assainissement

Après avoir présenté les différents principes de gestion patrimoniale, il semble indispensable d'insister sur quelques généralités sur la réhabilitation des réseaux d'assainissement. Nous présentons dans les paragraphes qui suivent les définitions de la réhabilitation, de chaque type de réhabilitation et les actions réalisées pour la réhabilitation d'un système.

1.3.1 Réhabilitation : définitions et commentaires

Plusieurs définitions de la réhabilitation peuvent être relevées dans la littérature. En résumé, la norme EN 752-1 (AFNOR, 1996) définit la réhabilitation comme « toute mesure entreprise pour restaurer ou améliorer les performances d'un réseau d'évacuation et d'assainissement urbain ». La réhabilitation peut être réalisée par une action ou une combinaison d'actions telles que remplacement, rénovation ou réparation de composants ou ouvrages. Il est important d'expliquer les frontières entre les différents concepts ou actions de réhabilitation. La figure suivante présente les différents concepts ainsi que leurs relations.

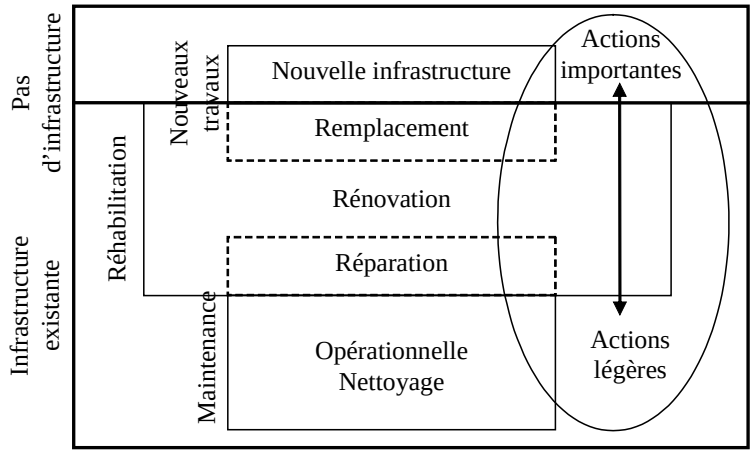


Figure 4 : terminologie utilisée dans la réhabilitation (norme EN 752) et relations avec les autres opérations, par exemple la maintenance des réseaux d'assainissement (AFNOR, 1996)

Ces différents concepts sont définis dans la norme EN 752-1 (AFNOR, 1996) :

- remplacement : « construction d'un ouvrage d'évacuation et d'assainissement neuf sur ou hors de l'emplacement d'une conduite d'évacuation et d'assainissement existante et s'y substituant » ;
- rénovation : « travaux incorporant tout ou partie de l'ouvrage d'évacuation et d'assainissement existant et grâce auxquels les performances actuelles sont améliorées » ;
- réparation : « rectification des défauts localisés ».

1.3.2 Réhabilitations corrective, préventive et prévisionnelle

La norme NF X 60-100 (AFNOR, 1981) définit la maintenance comme l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions de fonctionnement sûres pour assurer un service donné. Ici le terme de maintenance englobe la notion de réhabilitation.

Tableau 1 : types de maintenance selon la norme NF X 60-100

Evénement	Défaillance		Echéancier	Seuil prédéterminé	Evolution des paramètres
Type	Maintenance corrective		Maintenance préventive		
	palliative	curative	systématique	conditionnelle	prévisionnelle
Opération	Dépannage	Réparation	Remplacement		

La maintenance peut prendre plusieurs formes. Elle est **corrective** lorsqu'on exécute un ensemble d'activités de maintenance après détection d'une défaillance, pour remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Les activités de cette maintenance sont à dominante technique, elles comportent la localisation des défaillances et le diagnostic, la remise en état, le contrôle de bon fonctionnement. Elle est **palliative** si elle est à caractère provisoire et elle est **curative** si elle est à caractère permanent.

La maintenance est **préventive** lorsque les activités de maintenance ont pour but de réduire des situations à risque d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'usage (maintenance **systématique**) ou de critères

prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance **conditionnelle**). La maintenance conditionnelle comprend toutes les tâches de restauration de matériels ou de composants non défaillants, entreprises en application d'une évaluation d'état et de la comparaison avec un critère d'acceptation fixé par les normes.

La maintenance **prévisionnelle** est une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de retarder et de planifier les interventions. En d'autres termes, elle permet d'anticiper les besoins à venir, pour éventuellement lisser les investissements sur le long terme.

L'organisation de la réhabilitation des infrastructures urbaines s'appuie sur la théorie de la maintenance. L'adaptation de cette théorie NF X 60-100 à la gestion des infrastructures permet de distinguer deux composantes ou deux volets de la réhabilitation :

- **la réhabilitation corrective** est la part de la réhabilitation qui se base sur le constat de défaillances, nous distinguons deux cas : les interventions non programmées (par exemple, suite à une casse de conduite d'eau potable) et les interventions programmées, après constat d'une fréquence de réparation d'une conduite dépassant un seuil fixé par le gestionnaire et si les différents indicateurs concernant les impacts possibles sur les milieux urbain et naturel et sur les usagers sont suffisants ;

- **la réhabilitation préventive** est la part de la réhabilitation dédiée à la détection et à la réduction des situations de risque. Elle s'appuie sur une représentation des risques et donc sur une représentation des aléas et des facteurs de gravité : indicateurs relatifs à la probabilité de la défaillance (probabilité de casse pour une conduite d'alimentation en eau potable) ; indicateurs relatifs à la gravité des impacts possibles (impacts sur les milieux urbain ou naturel, et impacts sur les usagers du service).

En d'autres termes, cette réhabilitation consiste à hiérarchiser les conduites par classe de criticité et conduit à focaliser les efforts sur les conduites les plus critiques c'est-à-dire à la fois les plus exposées au risque de défaillance et pour lesquelles les conséquences de la défaillance sont les plus préjudiciables pour le réseau et son environnement.

1.4 Approches pour l'organisation de la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement

La gestion des urgences (événement majeur, interruption de service etc.), c'est-à-dire intervenir lorsque la défaillance a eu lieu, constitue la gestion traditionnelle. Cependant, les autres méthodes de gestion des réseaux vont chercher à modéliser la vétusté du réseau. La question de la vétusté peut revêtir de nombreux aspects (techniques, économiques, technologiques, sociales ou réglementaires, contractuelles).

Ainsi, la décision de renouveler ou de réhabiliter un réseau intervient quand ce dernier a atteint une limite de vétusté. Cette limite de vétusté peut faire intervenir plusieurs causes (Berland, 2004 ; Dorchies, 2005) :

- ✓ techniques : le réseau ne répond plus aux critères de performance demandés ;
- ✓ économiques : quand le coût d'exploitation dû à la vétusté dépasse le coût du renouvellement ;
- ✓ technologiques : quand des progrès techniques permettent d'obtenir les mêmes performances à moindre coût ou de meilleures performances pour un coût similaire ;
- ✓ sociales ou réglementaires : dues par exemple à l'augmentation réglementaire des performances des stations d'épuration qui est empêchée par les eaux claires parasites pénétrant un réseau vétuste ;
- ✓ contractuelles : quand le prestataire gérant le réseau s'est engagé à renouveler certains équipements au delà d'un certain âge.

L'enjeu du développement d'outils méthodologiques pour la gestion des infrastructures de services publics réside dans la consolidation de pratiques de gestion patrimoniale : « constituer et maintenir un patrimoine de données et de connaissances, pour maintenir un patrimoine physique et anticiper les besoins futurs **»** (Le Gauffre *et al.,* 2004). Observer et évaluer un réseau, prévoir son évolution, enrichir et fiabiliser les données et les modèles de ce réseau, définir les actions de réhabilitation à mener, constituent des volets indispensables et complémentaires d'une gestion patrimoniale.

Nous allons présenter dans la suite les méthodes de gestion qui modélisent la vétusté du réseau. La modélisation consiste à définir des critères de performance que le réseau doit satisfaire.

1.4.1 Formulation en terme d'optimisation économique

Cette approche constitue la forme « classique » de l'aide à la décision en matière de gestion patrimoniale technique. C'est une approche pour la programmation dans le temps des actions de réhabilitation (Vanrenterghem-Raven *et al.,* 2007 ; Martin *et al.,* 2007). L'approche par optimisation économique à long terme est basée sur l'hypothèse selon laquelle l'état et le fonctionnement de chaque entité du patrimoine sont prédictibles (Ana *et al.,* 2007). Les conséquences multiples de cet état de santé peuvent être prises en compte par la construction de coûts sociaux (Angot, 1991; Werey, 2000; Le Gauffre *et al.,* 2001; Zhao & *Rajani,* 2002; Werey *et al.,* 2004; Werey *et al.,* 2005; Rahman *et al.,* 2005; Werey *et al.,* 2007).

La minimisation d'une fonction coût global permet de définir une date optimale d'intervention pour chaque entité. Dans cette approche, on recherche une date optimale de réhabilitation pour minimiser le coût global d'un équipement (Elkjaer, 2007 ; Heywood *et al.,* 2007). Tout équipement engendre des coûts d'exploitation et d'entretien qui augmentent avec son âge. Le coût actualisé de son renouvellement est une fonction décroissante dans le temps. L'objectif est d'optimiser le coût de remplacement des canalisations en décidant de remplacer l'équipement l'année où son coût total actualisé est minimum comme le montre le schéma ci-dessous.

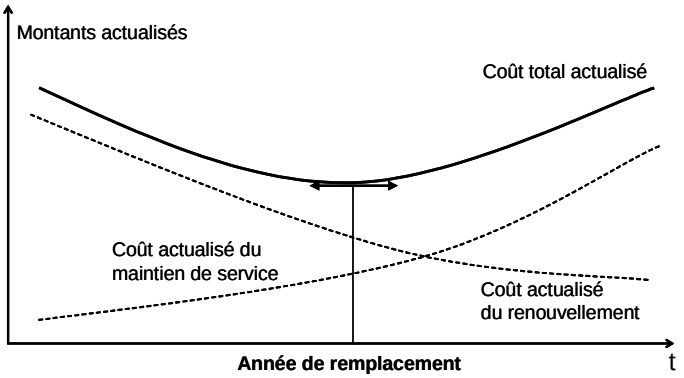


Figure 5 : date optimale de remplacement d'une conduite (Alexandre *et al.*, 1994 ; Werey, 2000 ; Walls & Smith, 1998)

Néanmoins, il faut garder en mémoire les limites de l'approche par optimisation économique (Poinard, 2006 ; Haidar, 2006) :

- certains coûts vont forcement être monétarisés avec une précision très grossière et il faudra donc s'en souvenir pour ne pas, à la fin du processus, arbitrer au centime près entre deux options concurrentes ;
- la projection sur la longue durée des coûts sociaux est liée à des hypothèses fortes sur l'évolution (ou la non évolution) des usages, des attentes, de l'activité économique, etc. ;
- l'évaluation des coûts sociaux sera toujours lourde à faire au niveau de chaque tronçon ou de chaque rue, alors même que c'est apparemment à cette échelle que ces coûts sont discriminants selon Alexandre *et al.* (1994).

1.4.2 Formulation en terme d'aide multicritère à la décision

C'est une critique et une alternative à l'approche par optimisation d'une fonction économique globale. L'utilisation d'une approche multicritère a remis en cause les deux hypothèses de l'optimisation économique (Le Gauffre *et al.*, 2001) :

- l'état et le fonctionnement de chaque entité du patrimoine sont prédictibles et peuvent se réduire à un indicateur (ou quelques indicateurs) dont l'évolution peut être modélisée ;
- les conséquences multiples de cet état de santé conduisent à la construction de « coûts sociaux » autorisant le principe d'agrégation au sein d'une fonction coût global dont la minimisation permet de définir une date optimale d'intervention.

L'approche multicritère propose une alternative à cette vision additive autorisant l'utilisation d'un système d'indicateurs exprimés dans leurs unités propres et non agrégés (approche non compensatoire). Elle autorise ainsi la vision « tableau de bord », l'évaluation en continu et l'adaptation des politiques de gestion par rétroaction sur les hypothèses de ces politiques.

Elle est issue de la théorie de la décision et basée sur **la construction de systèmes d'indicateurs de performance**. Adopter une approche multicritère consiste à construire un modèle appréhendant le problème de décision en prenant explicitement appui sur plusieurs critères. La gestion patrimoniale des

réseaux passe par la définition et l'évaluation de plusieurs critères qui renvoient à des objectifs multiples et variés (réduire des risques, améliorer le service rendu, préserver l'environnement, réduire les coûts, etc.). La prise en compte explicite de plusieurs critères introduit une difficulté qui n'existe pas dans le cas du critère unique : dans la plupart des cas, les critères se trouvent en conflit et il n'existe pas une solution unique qui s'impose d'elle-même et l'élaboration d'une prescription unique en devient plus complexe (Mousseau, 1993). L'apparition et l'utilisation depuis quelques décennies (Roy, 1972) de méthodes d'analyse multicritère pour l'étude de systèmes complexes ont intéressé les différents corps concernés par la gestion des réseaux.

Parmi les propositions disponibles concernant les indicateurs de performance et critères utilisables pour la gestion des réseaux d'assainissement, on trouve le guide méthodologique RERAU 5/6- Action 2 pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains (Le Gauffre *et al.*, 2004). Ce guide a été développé entre 1999 et 2004 avec pour objectif « d'aider à l'organisation des inspections et des réhabilitations nécessaires au maintien ou au rétablissement d'un niveau de service satisfaisant ».

Le guide RERAU propose des méthodologies sur les points suivants :

- indicateurs de performance et critères de décision pour la programmation des investigations ;
- indicateurs de performance et critères de décision pour la programmation d'actions de réhabilitation ;
- principes de construction et d'utilisation de modèles de vieillissement des conduites ;
- esquisse d'indicateurs relatifs à la qualité du patrimoine immatériel : données et modèles du patrimoine physique ;
- mise en perspective de ces outils à l'aide d'un démonstrateur informatique pour la simulation de programmes de gestion.

La méthode RERAU a pour but la mise en oeuvre d'un tableau de bord permettant d'évaluer le patrimoine du réseau d'assainissement. Cette évaluation se fait sur la base d'observations et de résultats de modélisations. Ce tableau de bord a pour but de programmer les investigations et les actions de réhabilitation à entreprendre sur le réseau en identifiant les tronçons prioritaires.

1.5 Cadre théorique de la thèse

Les travaux de recherche présentés dans ce rapport s'appuient sur les travaux élaborés dans le projet national RERAU et poursuivent ces travaux. Les propositions méthodologiques de RERAU s'appuient sur les documents de principe tels que les normes NF EN 752-1 à -7 « Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments : prescriptions de performance ». En outre, le guide a été élaboré durant les années 2000 à 2004, en parallèle avec des démarches complémentaires menées au niveau national ou au niveau international : normes françaises (NF P15 900-1 et -2) ou européennes (NF EN 13508-1 et -2) « Détermination de l'état des réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments :

exigences générales », manuel de bonne pratique et indicateurs de performance élaborés par l'International Water Association (Matos *et al.,* 2003), recommandations françaises « La ville et son assainissement » (CERTU, 2003).

Les paragraphes ci-dessous expliquent le mode de fonctionnement de RERAU. Cela commence par une présentation générale du guide, puis par une description de son mode de fonctionnement, basé sur des critères et indicateurs de performance.

1.5.1 Les résultats du PN RERAU

Les principes de gestion formulés nous permettent de formaliser les besoins en outils pour l'évaluation du patrimoine et pour l'évaluation de sa gestion. Pour cela, rétablir et garantir un niveau de service satisfaisant et un coût acceptable pour les usagers des réseaux d'assainissement urbains, constituent des objectifs principaux de gestion durable de ces réseaux. La gestion durable qui porte sur l'observation, l'évaluation et la réhabilitation des réseaux, a été élaborée dans le cadre du projet national RERAU.

Ce projet a proposé et étudié des concepts et des approches permettant de structurer et d'assister les activités de maintenance et de réhabilitation des réseaux d'assainissement (Le Gauffre *et al.,* 2004). La méthodologie RERAU a exploité des informations variées par la définition des plusieurs familles d'indicateurs de performance (critères de décision) orientés vers la hiérarchisation des investigations et des réhabilitations des conduites de réseaux et par la variété des solutions de réhabilitation hydraulique, environnementale et structurelle (Le Gauffre *et al.,* 2004).

La capitalisation d'informations est relative à l'état des éléments du patrimoine, au fonctionnement du système d'assainissement, et aux impacts induits par ce fonctionnement. Les bases de données des conduites du réseau d'assainissement sont construites par la capitalisation d'informations à travers les différentes activités du service d'assainissement :

- résultats issus de l'auto surveillance ;
- interventions suite à des plaintes ;
- relevés de désordres par inspections visuelles ;
- données obtenues lors des opérations de curage ;
- données relatives à la vulnérabilité de l'environnement, milieux récepteurs, milieu urbain, etc.

A partir de l'observation (observations visuelles, mesures, plaintes, etc.) et de résultats de modélisations, nous pouvons constituer un tableau de bord qui correspond à un ensemble d'indicateurs de performance et de critères. Ces critères regroupent des informations sur l'état de santé, sur le fonctionnement du système, et sur les impacts (Le Gauffre *et al.,* 2004).

Ce tableau nous permet, à travers les indicateurs de performance et les critères, d'évaluer et à de comparer les tronçons afin de programmer des investigations, des réhabilitations et plans d'entretien. Il permet aux

gestionnaires de quantifier la performance de leur réseau et de leur politique de gestion (Le Gauffre *et al.*, 2004).

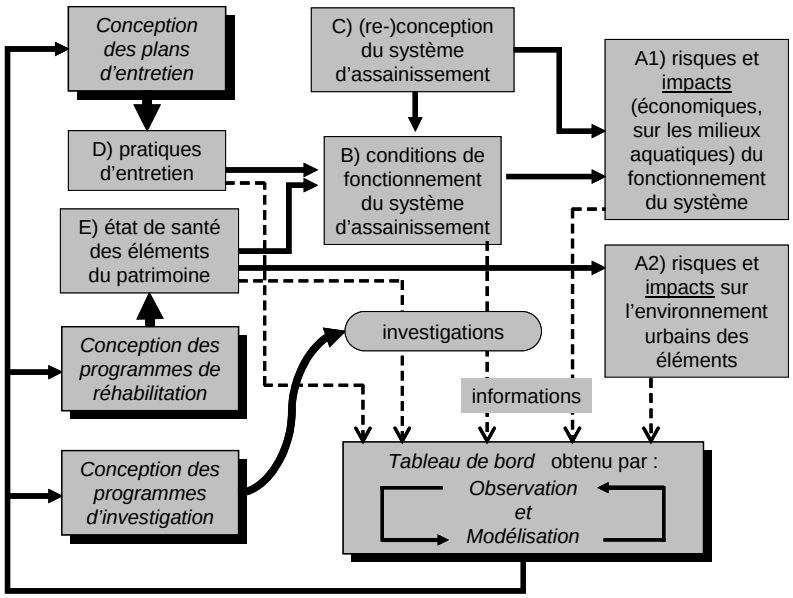


Figure 6 : domaine d'action visé par le guide méthodologique RERAU 5/6, constitution d'un tableau de bord (Le Gauffre *et al.*, 2004)

La figure 6 présente la finalité de la recherche RERAU sur les points suivants :

- enjeux : limiter les impacts (ou les risques d'impacts) du fonctionnement du système (A1) ou sur l'environnement immédiat des conduites (A2) ;
- moyens : améliorer le fonctionnement du réseau (B) par restructuration (reconception) (C), par l'optimisation des pratiques d'entretien (curage, etc.)(D) et par la conservation ou restauration (actions menées) d'un état de santé satisfaisant (E) ;
- les indicateurs de performance (tableau de bord) doivent permettre d'aider les gestionnaires à concevoir les plans d'entretien, les programmes de réhabilitation et les programmes d'investigation (inspections visuelles et auscultations des conduites).

1.5.1.1 Niveaux des indicateurs de performance du PN RERAU

Une série d'indicateurs a été produite, sur lesquels les gestionnaires pourront se baser pour estimer ou prédire l'état de santé du réseau. Ces indicateurs nous permettent de visualiser les résultats des stratégies de maintenance et de réhabilitation d'un patrimoine et de classer les tronçons de manière à intervenir sur les tronçons jugés prioritaires (Vasconcelos *et al.*, 2003a).

Pour arriver à une organisation des investigations et des réhabilitations des réseaux d'assainissement urbains, un ensemble des critères sont construits. Ces critères permettent de hiérarchiser des tronçons prioritaires vis-à-vis d'investigations et de réhabilitation (Le Gauffre *et al.*, 2004). En réalité chaque critère correspond à un couple dysfonctionnement-impact, le dysfonctionnement étant celui qui découle directement des défauts. Les défauts, les dysfonctionnements, les vulnérabilités et les impacts

représentent quatre niveaux des indicateurs de performance. Afin d'interpréter les résultats d'une investigation, plusieurs indicateurs ont été définis. Pour chaque dysfonctionnement et pour chaque impact, ces indicateurs correspondent à l'exploitation et à la traduction de divers types d'informations disponibles selon leur échelle spatiale et leur nature (Le Gauffre *et al.*, 2004).

1.5.1.1.1 Défauts

« Les défauts caractérisent l'état physique des ouvrages. Ils seraient éventuellement inadmissibles en réception d'ouvrages neufs mais ils peuvent n'avoir guère de conséquences pratiques sur des ouvrages en service » (Le Gauffre *et al.*, 2004). Ils sont en général observables par ITV (ex : joint déboîté). Le guide méthodologique RERAU reprend la typologie définie par la norme NF EN 13508-2.

1.5.1.1.2 Dysfonctionnements

Les dysfonctionnements sont les conséquences de défauts sur le fonctionnement des ouvrages. Certains dysfonctionnements sont également observable par ITV (ex : infiltration). D'autres peuvent être estimés sur la base des défauts. Une liste de dysfonctionnements a été définie en cohérence avec les normes NF P 900-2, NF EN 752-2 et NF EN 13508-1, et dans la mesure du possible avec les indicateurs de performance pour les services d'assainissement proposés par l'IWA (Matos *et al.*, 2003). Cette typologie est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 2 : typologie des dysfonctionnements (Le Gauffre *et al.*, 2004)

Code	Dysfonctionnement
INF	infiltration ;
EXF	exfiltration ;
HYD	diminution de la capacité hydraulique ;
DEB	débordements (inondation) ;
DEV	déversements anormaux ;
ENS	ensablement ;
BOU	bouchage ;
DSC	déstabilisation du complexe sol-conduite ;
ATC	attaque chimique en cours ;
RAC	dégradation en cours par intrusion de racines ;
ABR	dégradation en cours par abrasion ;
EFF	altération de l'intégrité structurale, risque d'effondrement ;

1.5.1.1.3 Impacts

Les impacts traduisent le caractère plus ou moins nocif des dysfonctionnements en fonction des facteurs de vulnérabilité (ex : pollution des eaux de surface). Une liste d'impacts a été définie en cohérence avec les normes NF P 900-2, NF EN 752-2 et NF EN 13508-1, et dans la mesure du possible avec les indicateurs de performance pour les services d'assainissement proposés par l'IWA (Matos *et al.*, 2003). Cette typologie est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 3 : typologie des impacts (Le Gauffre *et al.*, 2004)

Code	Impact
POL	pollution des eaux de surface, par débordements, surverses, ou perturbation des filières d'épuration ;
PON	pollution des sols et des eaux souterraines ;
NUH	nuisances « hydrauliques » : interruption de service, odeurs, inondation, en domaine privé ou sur la voie publique ;
TRA	nuisances diverses (y compris celles qui sont dues aux opérations d'exploitation) : atteintes à la sécurité ou à la fluidité du trafic (hors inondations), bruit, gêne pour l'accès aux commerces ;
DOB	dommages au bâti, y compris infiltrations en cave ;
CXR	surcoûts d'exploitation du réseau (y compris le coût de la réduction de la durée de vie des équipements) ;
CXS	surcoûts d'exploitation de la station d'épuration, y compris le déficit d'aides publiques ;
CDV	coût de la réduction de la durée de vie des ouvrages, et surcoût des interventions curatives par rapport à des interventions préventives ou proactives ;

1.5.1.1.4 Vulnérabilités

Les indicateurs de vulnérabilité sont en général identifiés par la combinaison d'un élément vulnérable et d'un impact ou bien d'un élément vulnérable et d'un dysfonctionnement.

Tableau 4 : typologie des indicateurs de vulnérabilité (Le Gauffre *et al.*, 2004)

Elément vulnérable Description	code	Indicateur de vulnérabilité
Performance de la station d'épuration	STEP	V-STEP-INF
Qualité des eaux de surface	ES	V-ES-POL
Qualité des sols et nappes	SN	V-SN-PON
Surcoûts d'exploitation du réseau	CXR	V-CXR-ENS V-CXR-BOU V-CXR-INF
Surcoûts d'exploitation de la station	CXS	V-CXS-INF
Surcoûts par réduction de durée de vie	CDV	V-CDV
Agrément du milieu urbain, vie économique	URB	V-URB-TRA V-URB-NUH V-URB-DOB-EXF V-URB-DOB-EFF

1.5.1.2 Evaluation des indicateurs de performance du PN RERAU

Pour chaque dysfonctionnement et chaque impact, ont été définis plusieurs indicateurs, correspondant à divers types d'informations disponibles. Ces informations ont les caractérisations suivantes :

- concernant l'échelle spatiale :

des indicateurs peuvent être définis à l'échelle du tronçon (repéré par T), ou du bassin versant/secteur (repéré par BV). Les dysfonctionnements et les impacts peuvent être observés et estimés à différentes échelles (tronçon - bassin versant - secteur géographique) (Le Gauffre *et al.*, 2004) :

- le tronçon : correspond à un ensemble de tuyaux emboîtés entre eux, en général délimitée par deux regards. C'est l'échelle de description la plus fine pour ce qui concerne les dysfonctionnements. Cette description résultera souvent d'une agrégation d'informations concernant les défauts définis à une échelle encore plus fine (de l'ordre du mètre ou de l'élément de canalisation) (Le Gauffre *et al.*, 2004) ;

- un bassin versant : correspond à l'ensemble des tronçons situés à l'amont d'un point ou d'un tronçon donné. Ce point peut être un déversoir d'orage, un poste de relèvement, un point de mesure permanent ou temporaire, voire la station d'épuration. L'échelle du bassin n'est donc pas unique, mais spécifique à chaque type d'information disponible (relevé de surverse, enregistrement de débit…) (Le Gauffre *et al.,* 2004). Certaines informations peuvent être disponibles à l'échelle d'un secteur.

- concernant le type d'indicateur :
    1. indicateurs simples ;
    2. indicateurs composites : évalués par agrégation des indicateurs définis selon les règles de combinaison (opérateurs) (Le Gauffre *et al.,* 2004) ;

- concernant la nature des informations utilisées, trois types d'indicateurs de performance ont été distingués ci-dessous :

1.5.1.2.1 Indicateurs évalués par des observations directes

Par exemple les infiltrations peuvent être observées directement. Les impacts sont rarement observés directement sauf dans le cas de la qualité des eaux de surface (Le Gauffre *et al.,* 2004).

1.5.1.2.2 Indicateurs d'estimations issues d'observations

Ils concernent les dysfonctionnements qui peuvent résulter des défauts observés par ITV, mais qui n'ont pas été eux-mêmes observés. L'absence d'observation directe du dysfonctionnement peut avoir deux origines :

- l'observation peut être techniquement difficile (ex : les défauts d'étanchéité permettent d'estimer l'infiltration) ;
- le dysfonctionnement ne s'est pas encore manifesté et n'existe qu'à l'état de risque latent (ex : les risques de débordement).

Une démarche de même type peut être appliquée aux impacts : leur estimation correspond à la combinaison d'un dysfonctionnement observé (ou estimé à partir d'observations) et d'une vulnérabilité. Par exemple l'impact d'un débordement combine sa fréquence et le type d'occupation du sol concerné (Le Gauffre *et al.,* 2004).

1.5.1.2.3 Indicateurs d'estimation à partir de facteurs de risques

En l'absence d'une ITV récente, l'estimation de l'état du tronçon peut être réalisée par l'utilisation de modèles statistiques de vieillissement. Ces modèles sont issus de la connaissance de facteurs de risque, de modèles statistiques ou de modèles de vieillissement. Ils permettent d'évaluer un état de santé probable d'un tronçon avant même de réaliser une ITV. Cet état de santé permet à son tour d'estimer des dysfonctionnements voire des impacts mais il sera à confirmer par une ITV (Le Gauffre *et al.,* 2004).

Les modèles multi-états (fonctions de survie) permettent d'étudier la probabilité d'appartenance à une classe d'état en fonction du temps. Pour cela, le calage du modèle pour une conduite non visitée dépend à la fois du modèle de description et du modèle d'appréciation appliquée sur un échantillon des tronçons de cette conduite. Le modèle de description doit permettre de coder les observations élémentaires selon un standard (ie la norme EN 13508-2) et de les synthétiser par désordre type. Le modèle d'appréciation comprend l'interprétation de l'observation en terme de dysfonctionnement et la détermination de la classe de dysfonctionnement. Baur & Herz (2002) proposent des fonctions de survie associées à différentes catégories de conduites d'assainissement et présentent une utilisation de ces fonctions de survie pour programmer les inspections. La figure 7 illustre ces principes.

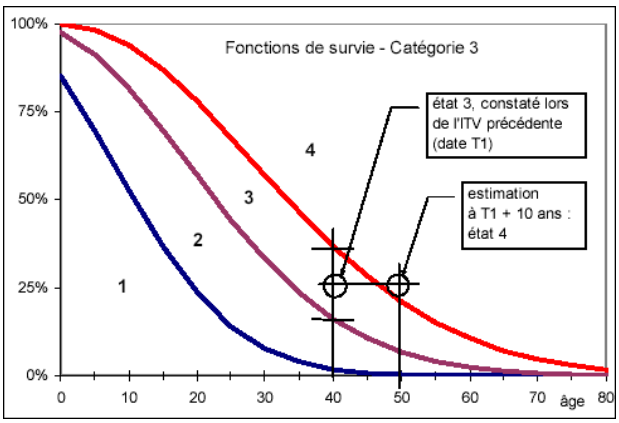


Figure 7 : utilisation des fonctions de survie pour l'estimation de l'état d'un tronçon avec inspection préalable (Le Gauffre *et al.*, 2004)

Les trois fonctions de survie limitant les quatre états considérés sont calées à l'aide de résultats d'inspections d'un échantillon de tronçons ou d'un découpage de l'échantillon étudiée, (par exemple : un découpage en fonction de la période de pose). Elles sont calées, en terme de durées de service attendues, en fonction des caractéristiques de chaque tronçon et de son milieu environnant. Elles correspondent respectivement :

- au pourcentage de tronçons toujours en état G1 à l'age t ;
- au pourcentage de tronçons toujours en état G1 ou G2 à l'age t ;
- au pourcentage de tronçons toujours en état G1, G2 ou G3 à l'age t.

L'évaluation de l'état d'un tronçon peut être fait à partir des fonctions de survie de la catégorie à laquelle appartient ce tronçon, de son âge, et en affectant au tronçon (jamais inspecté) un comportement médian (ligne des 50%) ou en prenant en compte le résultat de l'inspection précédente du tronçon (Le Gauffre *et al.*, 2004).

1.5.1.3 Agrégation des indicateurs de performance

Pour chaque dysfonctionnement et chaque impact ont été définis plusieurs indicateurs (Le Gauffre *et al.*, 2004). Le passage des dysfonctionnements aux impacts nécessite une étape préliminaire de réduction du nombre des indicateurs pour un dysfonctionnement. Cette réduction s'opère par agrégation des

indicateurs définis à l'étape précédente. En réalité chaque critère correspond à un couple dysfonction-impact, les critères sont définies par l'agrégation des indicateurs prédéfinis (Le Gauffre *et al.,* 2004). Il faut donc définir des règles de combinaison, ou opérateurs, permettant d'associer à deux voire trois valeurs d'indicateurs, éventuellement définis à des échelles spatiales différentes, une seule valeur d'un indicateur composite (Le Gauffre *et al.,* 2004).

La figure 8 présente le principe de construction des critères d'investigation et de réhabilitation à partir de trois types d'indicateurs de performance :

- 64 indicateurs de dysfonctionnement (dysfonctionnement observé ou estimé à partir de défauts observés) ;
- 12 indicateurs de vulnérabilité ;
- 40 indicateurs d'impact (impact observé et plus généralement impact estimé par croisement d'un indicateur de dysfonctionnement et d'un indicateur de vulnérabilité) ;

Chaque critère est la combinaison d'un indicateur d'impact et d'un indicateur de dysfonctionnement (au moins) susceptible d'être à l'origine de l'impact.

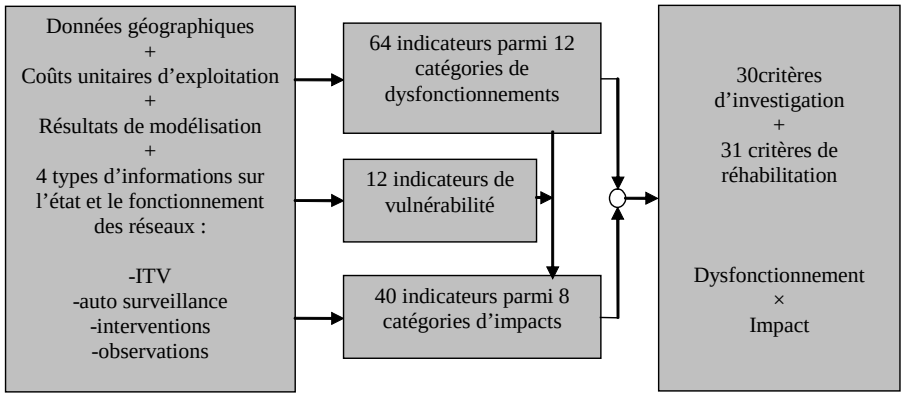


Figure 8 : principe du système d'indicateurs de RERAU (Le Gauffre *et al.,* 2004)

1.5.1.3.1 Tables de décision (opérateurs)

Les « indicateurs composites » résultent chacun de la fusion de deux indicateurs au moyen d'un opérateur de fusion. Ces opérateurs sont en général des tables d'évaluation 4×4 (si les indicateurs ont quatre modalités). Nous distinguons les types suivants :

Conjonction : les deux indicateurs I1 et I2 correspondent à deux causes requises pour déduire une conséquence D;

Disjonction : l'un des deux indicateurs (I1 ou I2) suffit pour conduire à la décision D ;

Compensation : en dehors des situations précédentes, l'utilisation de deux données complémentaires correspond à un raisonnement de compensation ; l'évaluation fournie par une source est modulée par l'évaluation fournie par une seconde source ;

Confrontation de plusieurs sources pouvant aboutir à une confirmation ou à une contradiction :

- ***conflit / contradiction*** : lorsque les deux sources fournissent deux indicateurs I1 et I2 qui vont orienter vers deux conclusions contradictoires ;
- ***confirmation :*** lorsque les deux sources fournissent deux indicateurs I1 et I2 qui vont permettre de faire converger la synthèse vers un nombre restreint de conclusions.

Synergie : ce raisonnement intervient lorsque les deux indicateurs I1 et I2 mesurent deux phénomènes dont les effets se renforcent réciproquement.

Les deux tableaux (tables de décision) ci-dessous présentent deux types de raisonnements employés (règles de combinaison) pour évaluer les deux indicateurs composites suivants :

Tableau 5 : exemple de table de décision 4 × 4 pour agréger les deux indicateurs INF5 et INF1 (Le Gauffre *et al.,* 2004)

		INF5			
		1	2	3	4
INF1	1	1	1	2	3
	2	1	2	3	3
	3	2	3	3	4
	4	3	3	4	4

L'exemple donné dans le tableau précédent illustre la construction d'un indicateur composite d'infiltration (INF7), à l'échelle du tronçon, évalué à partir d'un indicateur estimé à partir d'observation (facteurs de risques) à l'échelle du tronçon (INF5) et d'un indicateur estimé à partir de mesures de débit (issu d'observations) à l'échelle du bassin versant (INF1). La logique de construction de ce tableau correspond à une moyenne « pessimiste » :

- si les deux indicateurs donnent la même note : pas de problème ;
- si le désaccord entre les deux indicateurs n'est que d'un point : on retient le plus défavorable ;
- si le désaccord dépasse un point : la note la plus défavorable est bonifiée (minorée) d'un point ;
- en outre si une des deux informations n'est pas disponible, on retient l'autre. Si les deux informations sont absentes, on attribue une note de 3, assez défavorable.

Tableau 6 : exemple de table de décision 4 × 4 pour agréger les deux indicateurs INF8 et POL3 (Le Gauffre *et al.,* 2004)

		INF8			
		1	2	3	4
POL3	1	1	1	1	1
	2	1	2	2	2
	3	1	2	3	3
	4	1	2	3	4

L'exemple donné dans le tableau précédent illustre la construction du critère R/POL2/DEV-TS/INF *:* (réhabilitation pour infiltrations contribuant à des déversements de temps sec polluant les eaux de surface) à l'échelle du tronçon à partir d'un indicateur composite INF8 (indicateur global d'infiltration

pour décision de réhabilitation) à l'échelle du tronçon et d'un indicateur estimé à partir d'observations POL3 (pollution des eaux de surface par des déversements de temps sec dus aux infiltrations) à l'échelle du bassin versant. La logique de construction de ce tableau correspond à une conjonction (et-min). Il faut la conjonction de l'impact POL3 et du dysfonctionnement INF8 pour justifier la réhabilitation d'un tronçon).

1.5.1.3.2 Critère de réhabilitation

La dernière étape, une fois les indicateurs évalués, consiste à utiliser l'information afin de prioriser les actions. Cela passe donc par la construction de critères. Ce sont des indicateurs particuliers, qui serviront de base à la hiérarchisation des investigations et des réhabilitations, vis-à-vis de chaque type d'impact. Le guide RERAU distingue trois types de combinaisons entre dysfonctionnements et impacts (Le Gauffre *et al.,* 2004) :

- type (A) : l'indicateur d'impact peut être utilisé comme critère, quand l'impact est défini à partir d'un dysfonctionnement, lui-même estimé à partir d'un indicateur d'état (estimé ou observé). Les informations de base utilisées sont les défauts (ex : critère R/DOB/EFF - risque de dommages du à l'effondrement et une vulnérabilité) ;

- type (B) : les critères sont obtenus en croisant l'impact avec l'état estimé ou observé du tronçon. L'impact est défini par observation ou à partir d'un dysfonctionnement observé. Les informations de base utilisées sont les dysfonctionnements observés, les impacts observés et les défauts (ex : critère R/DAB/EXF dommages au bâti dus à des exfiltrations) ;

- type(C) : les critères sont obtenus par mise en relation entre dysfonctionnements définis à l'échelle du tronçon et impacts définis à l'échelle d'un bassin versant ou d'un secteur (ex : critère R/POL/INF pollution des eaux de surface due à des infiltrations).

1.5.2 Les objectifs du projet INDIGAU et la formulation des objectifs de la thèse

L'application de la méthodologie RERAU peut apporter des réponses à des questions de gestion de patrimoine. Elle offre un cadre de référence de nos recherches. Cependant, la méthodologie nécessite encore des tests et des ajustements :

- les modèles proposés nécessitent des paramétrages : notamment la construction des indicateurs de dysfonctionnement évalués à partir des défauts observés ;
- la méthodologie n'est pas encore validée : des critères tels que la capacité de hiérarchisation des priorités d'action ou la robustesse du modèle face au manque de données et des connaissances ne sont pas encore connus.

Les objectifs de nos travaux s'inscrivant dans le projet INDIGAU sont de critiquer et compléter l'outil RERAU, de construire des indicateurs (non flous, flous) et des modèles de fusion. Pour atteindre ces objectifs nous définissons deux volets et quatre tâches (voir figure 9).

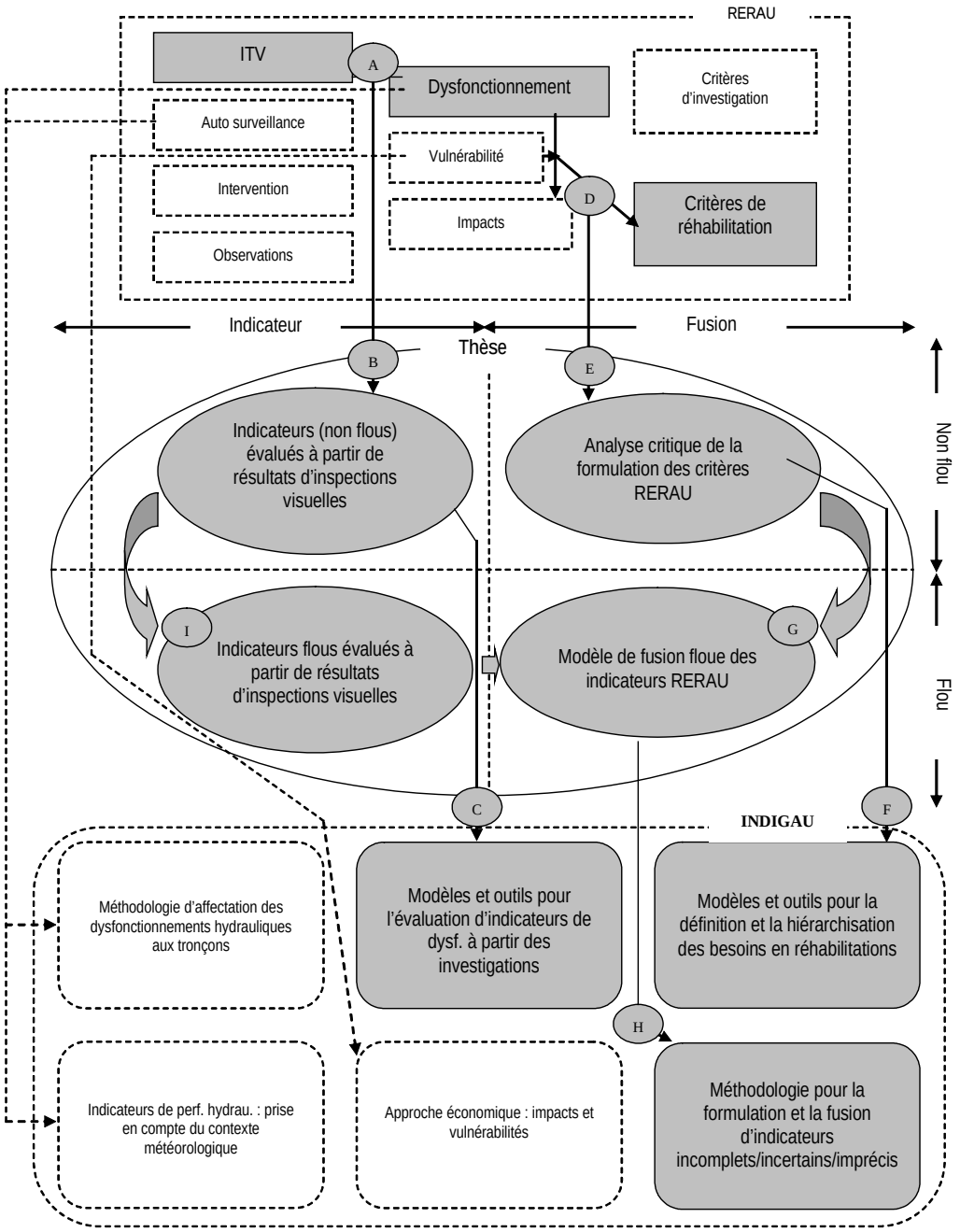


Figure 9 : les différentes tâches du projet INDIGAU et de la thèse, sur fond gris les thèmes abordés dans cette thèse

- volet non flou. Retour sur les indicateurs et critères de RERAU (chapitres 2 et 3). Ce volet comprend deux tâches :

- tâche 1 : retour sur la construction d'indicateurs de dysfonctionnement (non flous) évalués à partir de résultats d'inspections visuelles (**A** → **B** → **C** figure 9 – chapitre 2). C'est l'exploitation des résultats de ces inspections par la traduction en niveau de dysfonctionnement de l'ensemble des observations obtenues sur un tronçon. Cela nécessite d'abord de créer un échantillon de tronçons, de comparer des notes calculées (N) et des avis d'experts (E). Puis de caler des seuils destinés à définir un niveau de dysfonctionnement à partir de la note de synthèse retenue. Un critère de calage est proposé. Ce critère

permet de prendre en compte les coûts associés aux différentes erreurs d'affectation. Enfin des procédures sont proposés pour le calage des seuils (S1, S2, S3) pour un échantillon local (représentatif ou non représentatif) du patrimoine à évaluer.

- tâche 2 : retour sur les critères de réhabilitation de *RERAU* et réexamen de la formulation d'un point de vue numérique (**D → E → F** figure 9 - chapitre 3). Tout d'abord nous faisons un prototype d'outil informatique programmé en Visual Basic. Ce dernier permet de modéliser la formulation de chaque critère numériquement sous Excel et d'évaluer rapidement ce critère à partir de différentes combinaisons d'indicateurs. Puis nous proposons plusieurs indices permettant de tester la formulation du critère. Les indices proposés permettent d'évaluer la formulation globale d'un critère RERAU, de juger de l'importance relative de chaque indicateur pour l'évaluation d'un critère et également d'identifier des anomalies potentielles dans la formulation. Enfin, l'étude des différents indices associés aux indicateurs constituant un critère peut être résumée dans un tableau. Ce type de tableau permet de vérifier si la formulation du critère est en accord avec les intentions des experts à partir du classement des indicateurs.

- volet flou. Passage au flou pour les indicateurs et critères de RERAU (chapitres 4 et 5). Ce volet comprend les deux tâches suivantes :

- tâche 3 : modèles de fusion des indicateurs RERAU (**E → G → H** figure 9 – chapitre 4). Le « modèle RERAU » ne traite pas explicitement de la qualité (les incertitudes, les imprécisions et l'incomplétude) des données utilisées et des connaissances (les tableaux). Dans un premier temps les caractéristiques des données et des connaissances manipulées sont identifiées et les enjeux de la représentation de la qualité des données et des connaissances sont évalués. Puis quelques éléments théoriques sur la fusion d'informations et sur différentes techniques de la modélisation d'imprécisions sont rappelés : approche probabiliste et réseaux bayésiens, fonctions de croyance, approche floue et possibiliste. Enfin, un modèle de fusion floue est présenté. Le modèle de fusion floue proposé se base sur la technique d'inférence floue.

- tâche 4 : indicateurs flous évalués à partir de résultats d'inspections visuelles (**B → I → G → H** figure 9 – chapitre 5). La valeur d'un indicateur (non flou) évalué à partir des résultats d'une inspection visuelle découle de la comparaison d'une note D avec 3 valeurs seuils précises. Les trois seuils précis ne prennent pas en compte les incertitudes des données (densités de désordres & avis d'expert précis). Si D est très proche de l'une des valeurs seuils on hésite entre deux niveaux d'état de santé. Cela nécessite de remplacer chaque seuil précis par un seuil flou (intervalle flou) permettant d'exprimer l'imprécision de la limite entre deux niveaux d'état de santé. Nous proposons un critère de calage de seuil flou entre deux niveaux d'état de santé. Ce critère se base sur l'écart entre l'ensemble des avis d'experts flous (comme référence) et les valeurs calculées par seuil flou.

Enfin le chapitre 6 nous permet de présenter des expérimentations réalisées avec des données réelles obtenues dans le cadre du projet INDIGAU.

2 Chapitre 2. Indicateurs précis évalués à partir de résultats d'inspections visuelles 43

2.1 Introduction : de l'observation à l'évaluation 43

2.2 Codage des défauts et évaluation des dysfonctionnements 45

2.2.1 Norme EN 13508 – 2 45

2.2.2 Système de notation RERAU 46

2.2.3 Problématique du calage des seuils 47

2.3 Critère de calage proposé 49

2.3.1 Caractéristiques d'un test de détection 49

2.3.2 Critère de calage dans un cas simple 50

2.3.3 Généralisation du critère de calage MC à trois seuils 51

2.4 Procédure de calage des seuils pour un échantillon avec avis d'experts 52

2.5 Calage des seuils pour un échantillon local représentatif du patrimoine à évaluer 57

2.5.1 Procédure de calage 58

2.5.2 Etude de sensibilité vis-à-vis des paramètres économiques 59

2.6 Calage des seuils pour un échantillon local non représentatif du patrimoine à évaluer 61

2.6.1 Procédure de calage 61

2.6.2 Etude de sensibilité vis-à-vis des proportions d'état P(Ei) 62

2.6.3 Etude du choix du jeu P(Ei) 63

2.7 Conclusion 65

2 Chapitre 2. Indicateurs précis évalués à partir de résultats d'inspections visuelles

2.1 Introduction : de l'observation à l'évaluation

La méthodologie RERAU propose plusieurs familles d'indicateurs permettant de hiérarchiser des tronçons prioritaires vis-à-vis d'investigations et de réhabilitations (Le Gauffre *et al.*, 2004). Parmi ces indicateurs, on distingue les indicateurs issus d'inspections visuelles. Les inspections télévisées (ITV) constituent une méthode d'investigation privilégiée en vue d'évaluer l'état de santé des réseaux d'assainissement. Elles rendent possible l'acquisition de données concernant l'état de ces réseaux, et ce dans des endroits précédemment inaccessibles. C'est le cas des conduites enterrées de faible diamètre où le passage humain n'est pas possible (AGHTM, 1999 ; Vasconcelos, 2004).

L'exploitation des résultats de ces inspections conduit à l'évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement, sur une échelle à quatre niveaux (de G1 – satisfaisant à G4 – dysfonctionnement majeur) (Dorchies, 2005 ; Werey *et al.*, 2006 ; Vasconcelos, 2005). La question est formulée de la manière suivante : comment traduire en niveau de dysfonctionnement l'ensemble des observations obtenues sur un tronçon ? Cette question s'inscrit dans l'objectif 1, objet de la tâche T3 du projet INDIGAU - modèles et outils pour l'évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir des résultats des investigations (voir chapitre 1 - (1-5-2) - figure 9).

Cette question renvoie à plusieurs étapes et sous problèmes présentés sur la figure 10. La première étape consiste à traduire les observations en une séquence de codes, conformément à un système de codage propre au gestionnaire ou normalisé (un système de conversion peut permettre de relier ces deux codages). Une étape ultérieure concerne la traduction quantitative de ces codes afin d'obtenir une séquence de notes pouvant faire l'objet d'une procédure d'agrégation plus ou moins sophistiquée (calcul d'une note unique et/ou calcul d'un profil longitudinal de l'état de santé) (Dorchies, 2005 ; Werey *et al.*, 2006 ; Werey *et al.*, 2008). Finalement, un niveau de dysfonctionnement est défini en combinant éventuellement trois raisonnements (voir figure 10) :

- l'utilisation de règles exploitant directement la séquence de codes (procédure a), dépend de la présence ou non de défauts majeurs (« Peak Score » - voir annexe 1) (Rahman & Vanier, 2004). En effet, certains défauts observés vont entraîner la classification du tronçon en niveau de gravité 3 ou 4 suivant les règles décrites dans la méthodologie RERAU 5/6. Les règles expertes dépendent du dysfonctionnement étudié ; elles ont un rôle de veto forçant le classement en niveau G3 ou G4 (dysfonctionnement important voire majeur) lors de situations particulières.

- la comparaison de la note de synthèse avec 3 valeurs seuils délimitant les 4 conclusions possibles (procédure b) consiste à faire la somme des notes apportées par tous les défauts du tronçon. Cette note globale (« Total Score » - voir annexe 1) (Rahman & Vanier, 2004) est ensuite ramenée à la longueur du tronçon afin de fournir une densité de note (« Mean Score » - voir annexe 1) (Rahman

& Vanier, 2004). Les seuils sont définis en comparant les densités calculées avec les niveaux de gravité estimés par les experts ;

- l'analyse du profil longitudinal de la conduite (procédure c), reprend le classement par densité mais sur des longueurs à fixer. Le calcul de la densité permet de juger l'état global du tronçon mais ne permet pas de détecter une éventuelle concentration critique de désordres. Afin de pallier ce manque, les notes Ni peuvent être agrégées par unité de longueur afin d'obtenir un profil longitudinal. Des règles doivent ensuite permettre de classer le tronçon selon un niveau de dysfonctionnement (note de la section la plus défavorable par exemple).

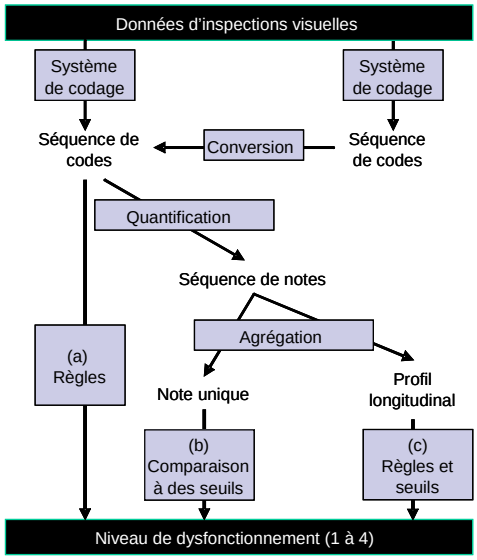


Figure 10 : évaluation d'un indicateur de dysfonctionnement à partir des données d'inspections visuelles d'un tronçon (Ibrahim *et al.*, 2007a)

En ce qui concerne les notes « Peak Score » et « Mean Score » associées aux protocoles présentés par Rahman & Vanier (2004), nous pouvons trouver des similitudes entre ces notes et RERAU. La note maximale (« Peak Score ») correspond à une note de défaut majeur, la note moyenne (« Mean Score ») à une note en densité. La méthode de Rahman & Vanier (2004) et de Zhao *et al.* (2001) attribue une note à chaque cas que nous avons détaillé précédemment dans la méthode RERAU 5/6, c'est-à-dire défaut majeur et densité.

Au final, ces trois raisonnements sont complémentaires : ils permettent de prendre en compte des situations de dégradations localisées ou uniformément réparties sur le tronçon. La détermination du niveau de dysfonctionnement pour le tronçon sera une synthèse de ces trois procédures (a, b et c) : le niveau de gravité globale sera au moins égal au maximum des trois résultats.

Nous examinons ici la question du calage de seuils précis (S1, S2, S3) afin de définir un niveau de dysfonctionnement (procédure b de la figure 10). Le calage se fera par la comparaison de la note de synthèse avec 3 valeurs seuils délimitant les 4 conclusions possibles (Vasconcelos & Le Gauffre, 2003b). Cela nécessite l'évaluation d'un échantillon de tronçons par un panel d'experts et l'utilisation de modèles de

calcul de densités de désordres afin de caler les seuils précis (S1, S2, S3) (voir 2-2-3 figure 11). Tout d'abord, le risque de dysfonctionnement (infiltration, etc.) est estimé en utilisant les résultats des inspections ITV. Les défauts sont codés en utilisant la norme NF EN 13508-2. Les experts ont proposé pour chaque dysfonctionnement un niveau de performance (Werey *et al.*, 2008). Finalement, le calage des valeurs seuils nécessite de comparer des résultats d'affectation de niveaux de dysfonctionnement avec des dires d'experts servant de référence (Le Gauffre *et al.*, 2007 ; Vasconcelos, 2004). Nous proposons un critère de calage qui permet de prendre en compte les coûts associés aux différentes erreurs d'affectation. Les seuils donnent aux gestionnaires un outil simple qui identifie le niveau de performance des tronçons.

Dans ce chapitre nous avons appliqué la méthode de calage proposée sur un cas fictif comme illustration. Cependant, nous avons discuté, dans le chapitre 6, la validité et la sensibilité de ces méthodes de calage proposées et du prototype informatique sur un cas réel.

2.2 Codage des défauts et évaluation des dysfonctionnements

En France, les premières utilisations de caméras dans les réseaux non visitables datent de la fin des années 60. A partir des années 80, l'utilisation des ITV s'est banalisée avec la généralisation des contrôles de réception des travaux neufs (Bruyelle, 1999). Elle consiste à introduire une caméra couleur autotractée pivotante et rotative (360°) dans les réseaux non visitables. Les inspections visuelles détectent les anomalies : fissures, obstructions, obstacles, déformations, etc….. (Breysse *et al.,* 2001a ; Vasconcelos, 2005).

Grâce à l'application récente de la norme européenne NF EN 13508-2 (AFNOR, 2003), la pratique professionnelle a connu une évolution importante concernant le relevé des défauts observés lors des inspections. La norme européenne NF EN 13508-2 uniformise le codage des défauts. Cela garantit la comparabilité des résultats obtenus et permet aussi une mise en commun des données (Dorchies, 2005 ; Werey *et al.*, 2006 ; Werey *et al.*, 2008).

2.2.1 Norme EN 13508 – 2

La norme EN13508-2 a été rédigée par le comité technique « ingénierie des eaux usées » du comité européen de normalisation (CEN/TC 165) (AFNOR, 2003). Cette norme fait suite à la norme EN752-5 qui demandait d'utiliser un système de codage uniforme permettant de comparer les résultats obtenus lors d'ITV (Dorchies, 2005). La partie 2 de la norme 13508 définit un système pour enregistrer de manière objective les informations visuelles de l'inspection (ASTEE, 2004). La norme européenne est applicable depuis septembre 2006 pour toutes les nouvelles inspections. Elle reprend 19 familles de défauts et 70 types de défauts sont utilisés.

A partir des défauts (observations possibles), pouvant être ponctuels ou longitudinaux, il s'agit de décrire l'état global de la canalisation (Breysse & Vasconcelos, 2001b ; Vasconcelos, 2004). La norme NF EN 13508-2 donne une liste détaillée des observations possibles et décrit chaque observation au moyen d'un code

principal composé de trois lettres et d'informations supplémentaires (AFNOR, 2003 ; Le Gauffre *et al.*, 2004) (voir tableau 7).

Tableau 7 : extrait du tableau RERAU regroupant les règles d'évaluation de l'indicateur INF4 : défaut d'étanchéité, évalué à partir d'une inspection

Gravité :	1	α	α^2	α^3	
Désordres significatifs					Étendue
Fissure :	BAB B	-	BAB C	-	L_obs
Rupture/effondrement :	-	-	BAC A	BAC B/C	P
Raccordement défectueux :	-	-	BAH B/C/D	-	P
Sol visible par le défaut :	-	-	-	BAO	P
...					...

- la première lettre décrit l'application du code (observation) : elle est relative à la localisation de l'observation (une canalisation ou à un regard), les observations du tableau 7 sont localisées sur le collecteur (lettre **B**) ;

- la deuxième lettre indique le type de code (observation) ; pour les collecteurs, les débuts des codes peuvent prendre 4 modalités :
    1. codes relatifs à l'état (structure) du collecteur (**BA**x) (voir tableau 7) ;
    2. codes relatifs à l'exploitation (opération) du collecteur (**BB**x) ;
    3. codes d'inventaire (**BC**x) ;
    4. autres codes (**BD**x).

- la troisième lettre détermine l'observation spécifique (la nature de l'observation) :
    1. **BAB** est utilisé pour une fissure (voir tableau 7) ;
    2. un code **BAJ** désigne un joint décalé.

- l'information additionnelle est inscrite avec des lettres (codes) complémentaires qui peuvent apporter des précisions sur l'ampleur et la localisation de l'observation :
    1. « **BAB B A** » indique une fissure fermée qui est parallèle à l'axe de la canalisation ;
    2. « **BAB C B** » désigne une fissure ouverte circonférentielle ;
    3. « **BAB C A** » indique une fissure ouverte longitudinale.

Ainsi, un rapport d'inspection contiendra un ensemble de codes, chaque code étant associé à une distance par rapport au regard de visite de début d'inspection. Le cas échéant, la position angulaire est repérée en notation « horaire » (AFNOR, 2003 ; Le Gauffre *et al.*, 2004 ; Dorchies, 2005).

2.2.2 Système de notation RERAU

Le système de notation retenu permet de traiter ensemble les défauts ponctuels et les défauts répartis et d'attribuer une note globale à chaque tronçon selon la procédure suivante :

- quantifier en une note élémentaire Ni les défauts (observation) répartis (codifiés selon la norme NF EN 13508-2) en multipliant (pondérant) leur gravité (parmi 4 poids possibles : 1, α, α^2, α^3 vis-

à-vis du dysfonctionnement considéré) et leur étendue (L_i longueur équivalente en mètre) (Le Gauffre *et al.,* 2004 ; Vasconcelos, 2004). Pour les défauts ponctuels, on attribue une étendue forfaitaire P, qui constitue avec α un deuxième paramètre de calage du système de notation (voir tableau 7).

$$N_i = \alpha^n \times P \text{ (ou } L_i \text{)}, \text{ avec n = 0, 1, 2, ou 3 et } \alpha = 2, 3, \text{ ou } 4 \qquad [1]$$

Les études de Boinel (1995) et Cherguy (1996) ont proposé une échelle non-linéaire à 4 niveaux pour pondérer la gravité des défauts. Cette échelle a été paramétrée en introduisant un facteur α, qui permet d'ajuster le modèle d'évaluation :

- un défaut mineur (pour un dysfonctionnement) est affecté d'un poids de 1 ;
- des défauts plus graves recevront respectivement des poids α, α^2, α^3.

Par exemple (voir tableau 7), pour P = 5 et α = 3, le raccordement défectueux correspondant au code **BAH B** et à la gravité α^2 est traduit par une note élémentaire $N_i = 3^2 * 5 = 45$. Par contre la fissure, de 3 m, correspondant au code **BAB C** et à la gravité α^2 est traduite par une note élémentaire $N_i = 3^2 * 3 = 27$.

- cumuler à l'échelle du tronçon les notes élémentaires des défauts d'un dysfonctionnement donné afin de calculer la densité (D) par mètre de tronçon (une note unique - procédure b de la figure 10) (Le Gauffre *et al.,* 2004 ; Vasconcelos, 2004). Compte tenu de l'hétérogénéité de longueur des tronçons la note de synthèse la plus appropriée semble être la densité D (Ibrahim *et al.,* 2007b) :

$$D = \sum N_i \big/ LT \text{ avec LT : longueur du tronçon (m)} \qquad [2]$$

Prenons l'exemple d'un tronçon de 50 m présentant **4 BAH B et 1 BAB C**, pour le cas P = 5 et α = 3. Les 4 raccordements défectueux correspondant au code **BAH B** et à la gravité α^2 sont traduits par la somme de notes 180 ($4 * 3^2 * 5$). La fissure de 3 m correspondant au code **BAB C** et à la gravité α^2 est traduite par une note élémentaire Ni = 27. Ce tronçon obtient une note globale N = 180 + 27 = 207 et une densité D = 207/50 = 4,14.

2.2.3 Problématique du calage des seuils

Le niveau de dégradation des conduites, évalué par les méthodes WRC (Water Research Centre) pour l'Angleterre, NRC (Conseil National de Recherche Canada), Winnipeg et Edmonton, est représenté par des échelles qualitatives de modalités ordonnées subjectives. Ces niveaux de dysfonctionnement sont déduits simplement à partir d'un découpage régulier du domaine des valeurs possibles de N, de manière à présenter tous les états de santé possibles des conduites (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao *et al.,* 2001) (voir tableaux 8 et 9).

Tableau 8 : peak Deduct Values for Condition Grade (Rahman & Vanier, 2004)

Condition Grade	Peak Deduct Value Ranges			
	WRc		NRC	
	Structural	Operational	Structural	Operational
0	-	-	0	0
1	< 10	< 1	1 – 4	1 – 2
2	10 – 39	1 – 1.9	5 – 9	3 – 4
3	40 – 79	2 – 4.9	10 – 14	5 – 6
4	80 – 164	5 – 9.9	15 – 19	7 – 8
5	165 and >	10 and >	20 and >	9 - 10

Tableau 9 : comparison of Peak, Mean and Total Scores (Rahman & Vanier, 2004)

Condition Grade	Peak Score		Mean Score		Total Score	
	Winnipeg	Edmonton	Winnipeg	Edmonton	Winnipeg	Edmonton
1	< 10	< 1	< 0.3	< 0.5	< 20	< 100
2	10 – 59	1 – 2	0.3 – 1.49	0.5 – 0.99	20 – 99	100 – 149
3	60 – 99	2.1 – 3	1.5 and >	1 – 1.49	100 and >	150 – 199
4	100 – 149	3.1 – 5	_	1.5 – 2.49	_	200 – 249
5	150 and	5 and >	_	2.5 and >	_	250 and >

La signification de chaque niveau est relative : un tronçon en état 2 (G2) est plus dégradé qu'un tronçon en état 1 (G1), etc... De nombreuses échelles d'évaluation existant dans la littérature (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao *et al.*, 2001) sont présentées dans l'annexe 1. Une étude de Rahman & Vanier, (2004) a comparé différentes méthodes pour conclure qu'il est difficile pour un gestionnaire de choisir parmi ces protocoles le plus adapté à ses problématiques. Nous considérons que la réponse à ce problème réside dans le calage d'un modèle sur des avis de référence.

Dans la procédure b de l'approche RERAU – INDIGAU (voir figure 10) l'ensemble des observations obtenues sur un tronçon est traduit en niveau de dysfonctionnement par la comparaison de la note de synthèse avec 3 valeurs seuils délimitant les 4 conclusions possibles. Dans le cadre de la tâche T1, une définition de chaque état a été établie en concertation avec l'ensemble des partenaires et gestionnaires. Les définitions établies sont les suivantes :

- niveau (état) G1 : en très bon état, peu ou pas de dysfonctionnement constaté ;
- niveau (état) G2 : en état satisfaisant, situation peu grave à surveiller ;
- niveau (état) G3 : en mauvais état mais tolérable, situation grave nécessitant une action mais à prioriser ;
- niveau (état) G4 : en très mauvais état, situation intolérable quel que soit le contexte, nécessitant une action de réhabilitation à effectuer d'urgence.

Le calage des seuils précis (S1, S2, S3) nécessite l'évaluation d'un échantillon de tronçons par un panel d'experts et l'utilisation de modèles de calcul de densités de désordres (N) (cf. 2-2-2). Les valeurs de référence (E) sont fournies par les appréciations des «experts» (gestionnaires, bureaux d'étude, etc.) qui jugent les tronçons en terme de suites à donner (à partir des résultats de l'inspection visuelle). Les experts proposent pour chaque dysfonctionnement un niveau de dégradation parmi 4 niveaux possibles. La figure

11 illustre le problème du calage des seuils destinés à définir un niveau de dysfonctionnement à partir de la note de synthèse retenue.

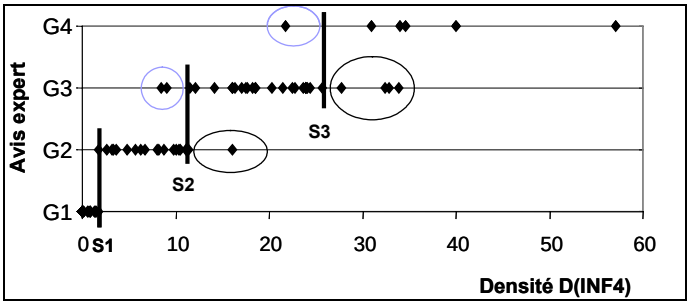


Figure 11 : confrontation entre l'affectation issue du calcul (évaluation d'une note globale puis comparaison à trois seuils) et les avis experts pris pour référence

Les trois seuils précis calibrés (S1, S2, S3) permettent de délimiter les quatre états possibles G1/G2/G3/G4. Afin de définir le niveau du dysfonctionnement, la densité est comparée à ces 3 seuils (S1, S2 et S3) : niveau 1 si $D \leq S1$, niveau 2 si $S1 < D \leq S2$, niveau 3 si $S2 < D \leq S3$ et niveau 4 si $D > S3$. Les points entourés sur la figure correspondent aux erreurs d'affectation, c'est-à-dire aux tronçons jugés par les experts dans un état différent de celui évalué par les seuils. Nous traitons la question du calage de ces seuils en section suivante.

2.3 Critère de calage proposé

Le critère consiste à rechercher les valeurs des paramètres qui, sur un échantillon de tronçons, minimisent les écarts entre les valeurs calculées (C) et les valeurs de référence (E). La minimisation est fixée de manière à faire un compromis entre les deux erreurs d'affectation « faux positif » et « faux négatif » , utilisant la terminologie des tests de détection (Le Gauffre *et al.*, 2007) (voir figure 12). Nous allons présenter dans la suite les différentes caractéristiques d'un test de détection.

2.3.1 Caractéristiques d'un test de détection

Dans le cas simple, les experts (avis de référence) affectent les tronçons de l'échantillon dans un état (défaillant D ou non défaillant ND). Ensuite, la procédure de calcul (comparaison entre note du tronçon et seuil S) classe les tronçons dans un état (défaillant CD ou non défaillant CND) (voir figures 12 et 13).

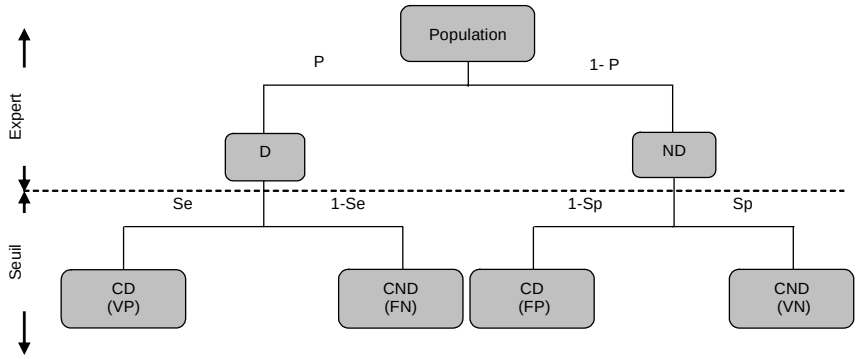


Figure 12 : comportement d'un test de détection -cas simple (Le Gauffre *et al.*, 2004 , Bradley, 1997 ; Fawcett,.2001 , Ancelle, 2002 , Egan, 1975, Ferri *et al.*,2002, Flach .*at al.*, 2003; Hand & Till, 2001; Lane, 2000).

		Par seuil	
		CD	CND
Par expert	D	VP	FN
	ND	FP	VN

Figure 13 : caractéristiques d'un test de détection - cas simple.

Les figures précédentes (12, 13) décrivent le principe des caractéristiques d'un test de détection dans un cas simple. Selon la terminologie des tests de détection, on peut parler ici de faux positif, faux négatif, vrai positif, vrai négatif, sensibilité et spécificité :

D : tronçon Défaillant selon les experts ;

ND : tronçon Non Défaillant selon les experts ;

CD : Résultat positif, le tronçon est Considéré comme Défaillant par seuil ;

CND : Résultat négatif, le tronçon est Considéré comme Non Défaillant par seuil ;

FP, faux positif : tronçon Considéré comme Défaillant (CD) par le seuil et Non Défaillant (ND) par les experts ;

FN, faux négatif : tronçon Considéré comme Non Défaillant (CND) par le seuil et Défaillant (D) par les experts ;

VP, vrai positif : tronçon en mauvais état et bien classé ;

VN, vrai négatif : tronçon en bon état et bien classé ;

P est la proportion de tronçons défaillants (D) dans la population à un moment donné ;

Se, sensibilité : est la probabilité (Pr) qu'une défaillance (D) soit détectée, c'est-à-dire conduise à un résultat positif du test (CD) ;

Sp, spécificité : est la probabilité (Pr) qu'une non défaillance (ND) conduise à un résultat négatif du test (CND).

2.3.2 Critère de calage dans un cas simple

Le critère de calage proposé permet de prendre en compte les coûts associés aux différentes erreurs d'affectation. Il représente la somme des coûts associés aux faux positifs (FP) et aux faux négatifs (FN) relatifs aux résultats d'un test de détection (voir figure 14).

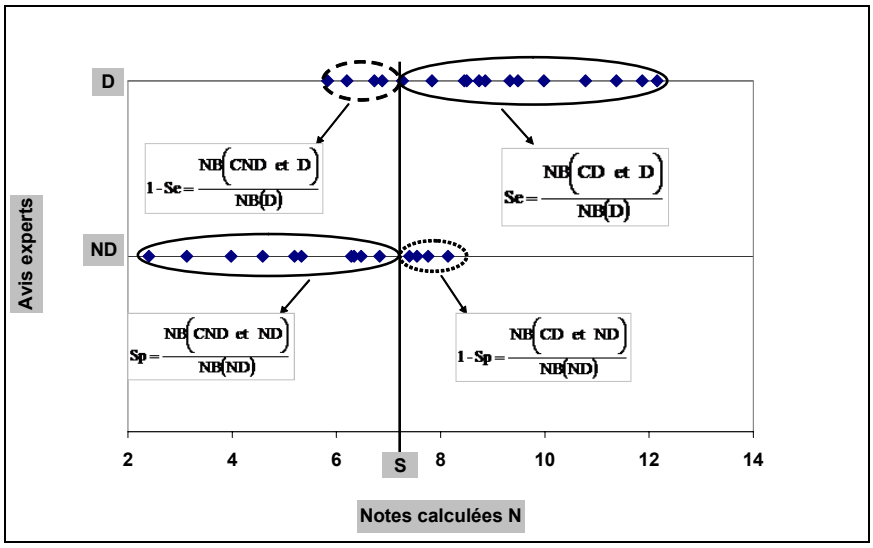


Figure 14 : confrontation entre l'affectation issue du calcul (évaluation d'une note globale puis comparaison à un seuil S) et l'avis d'expert pris pour référence (cas simple).

Ce critère visant à minimiser les conséquences (les coûts) des écarts d'affectation entre calcul et experts est donné par la formule suivante :

$$MC = CFN.(1-Se).P + CFP.(1-Sp).(1-P) \quad (\text{À minimiser}) \qquad [3]$$

avec :

$$P = Pr(D) \qquad [4]$$

$$Se = Pr(CD/D) \qquad [5]$$

$$Sp = Pr(CND/ND) \qquad [6]$$

$$Pr(FN) = (1-Se).P \qquad [7]$$

$$Pr(FP) = (1-Sp).(1-P) \qquad [8]$$

MC, coût global des erreurs d'affectation (« misclassification cost ») (Remaley *et al.*, 1999 ; Jenicek, 1995) ;

CFN, coût associé à un faux négatif FN, tronçon tel que [(avis experts =D) et (valeur calculée =CND)];

CFP, coût associé à un faux positif FP, tronçon tel que [(avis experts =ND) et (valeur calculée =CD)].

2.3.3 Généralisation du critère de calage MC à trois seuils

Les valeurs (S1, S2, S3) les plus adéquates peuvent être recherchées de façon à minimiser une fonction des écarts entre valeurs calculées (C) et valeurs de référence (E). Cette fonction constitue le critère de calage qui peut être le coût global des erreurs d'affectation. Nous proposons une formulation du critère de calage MC qui permet de prendre en compte les coûts associés aux différentes situations de faux positifs et de faux négatifs (voir figure 11) :

$$MC = \sum_{i=1}^{3}\left(\sum_{j=i+1}^{4} CFP(i,j)P(C_j/E_i)P(E_i)\right) + \sum_{i=2}^{4}\left(\sum_{j=1}^{i-1} CFN(i,j)P(C_j/E_i)P(E_i)\right) \qquad [9]$$

avec :

$E_i \in \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$: niveau de dysfonctionnement du tronçon énoncé par les experts pour les tronçons de l'échantillon de calage ;

$C_j \in \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$: niveau de dysfonctionnement calculé (fonction des seuils) ;

$P(C_j/E_i)$: probabilité d'une valeur calculée C_j pour un tronçon en état E_i (est estimée avec un échantillon de calage, et dépend des trois seuils recherchés) ;

$P(E_i)$: probabilité qu'un tronçon soit en état Ei ; cette probabilité dépend de la population sur laquelle on souhaite appliquer la procédure ;

$CFP(i, j)$: coût associé à un faux positif FP(i,j) (état Ei et valeur calculée Cj , j>i) ;

$CFN(i, j)$: coût associé à un faux négatif FN(i,j), (état Ei et valeur calculée Cj , j<i)].

Ce critère « coût global des erreurs d'affectation » repose sur l'expression de différents coûts $CFP(i, j)$ et $CFN(i, j)$ qui permettent de représenter les enjeux privilégiés par un gestionnaire ainsi que ses pratiques (suites données lors d'une affectation C_j).

Afin d'évaluer le coût global des erreurs d'affectation MC : d'abord, pour un tronçon donné, l'indicateur vaut Ei, selon les experts. Ensuite, pour le même tronçon donné, l'indicateur vaut C_j, par comparaison de la note N et des seuils. Puis, les gestionnaires fournissent le coût associé à un faux négatif CFN(i, j), le coût associé à un faux positif CFP(i, j) tel que :
FN (i, j), tronçon tel que [(avis d'experts E = Ei) et (valeur calculée Cj avec j < i)] ;
FP (i, j), tronçon tel que [(avis d'experts E = Ei) et (valeur calculée Cj avec j > i)] ;

La probabilité P (Ei) qu'un tronçon soit en état Ei dépend de la population sur laquelle on souhaite utiliser la procédure d'évaluation. Enfin, le programme calcule la probabilité P(Cj/Ei) d'obtenir une valeur calculée Cj pour un tronçon en état Ei (ces probabilités dépendent des trois seuils recherchés S1, S2 et S3, et sont estimées sur l'échantillon avec avis d'experts) ;

Une étude plus approfondie sera menée à la suite sur le calage des seuils (S1, S2 et S3) pour un échantillon de calage avec avis d'experts.

2.4 Procédure de calage des seuils pour un échantillon avec avis d'experts

Les trois seuils calés (S1, S2, S3) classent les conduites de l'échantillon selon un ordre de priorité de réhabilitation. La figure 15 montre la démarche suivie pour caler les trois seuils définissant les conduites prioritaires à la réhabilitation. Nous distinguons quatre grandes étapes qui interviennent pour caler les seuils :

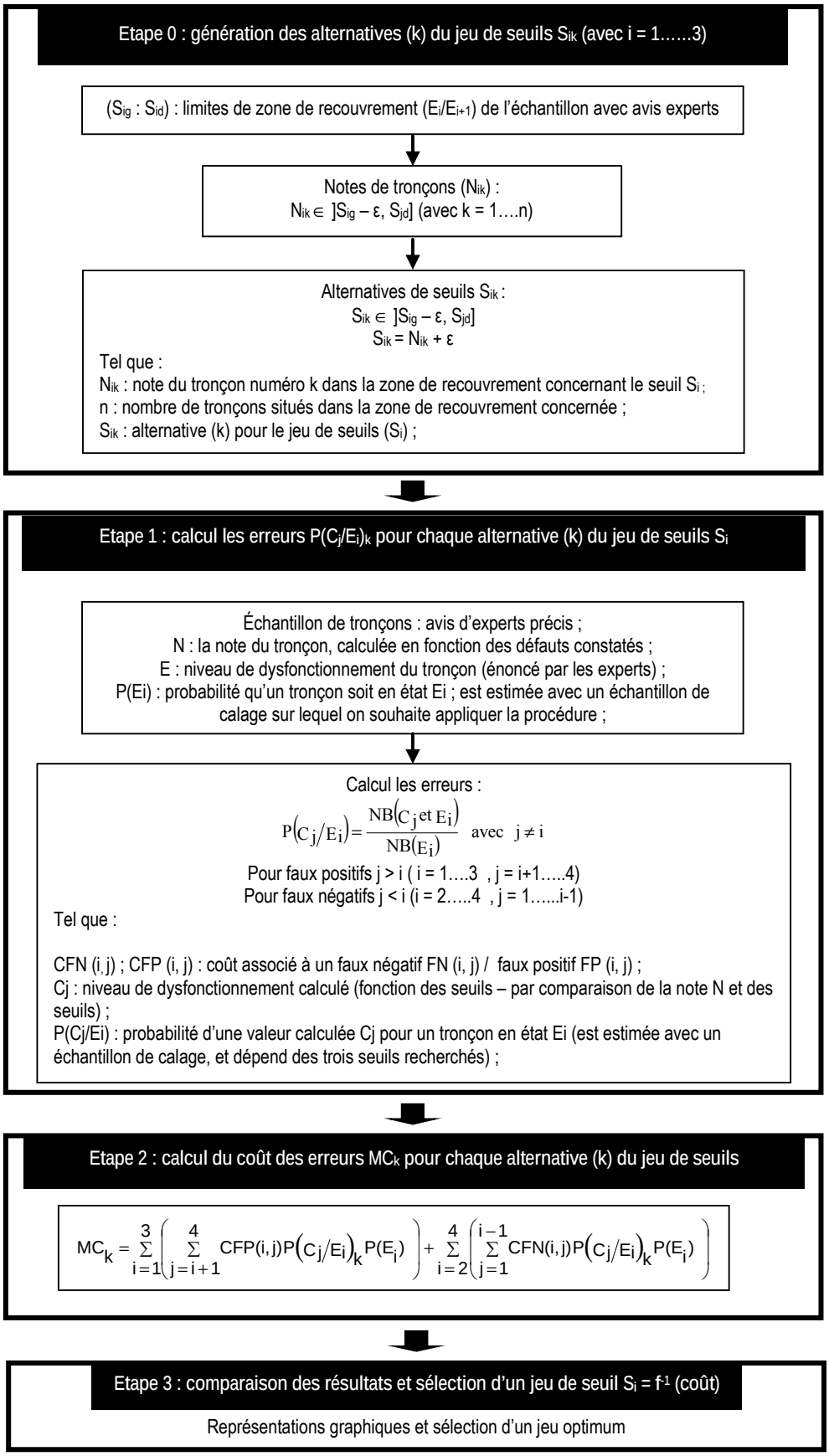


Figure 15 : démarche de choix des seuils S1, S2 et S3 pour l'échantillon avec avis experts (INDIGAU – tâche 1)

- étape (0) : concerne la génération des alternatives des seuils (S1, S2, S3) en faisant varier ses valeurs. Les valeurs alternatives pour chaque seuil ($(S_i)_k$ avec i = 1, 2, 3 et k = 1….n) sont proposés de manière à représenter toutes les valeurs des notes des tronçons situés dans la zone de recouvrement concernée (E_i/E_{i+1}, avec i = 1…..3). Pour cela, le nombre d'alternatives (n) pour chaque seuil est égal au nombre des tronçons situés dans la zone de recouvrement correspondant (cf. figure 16).

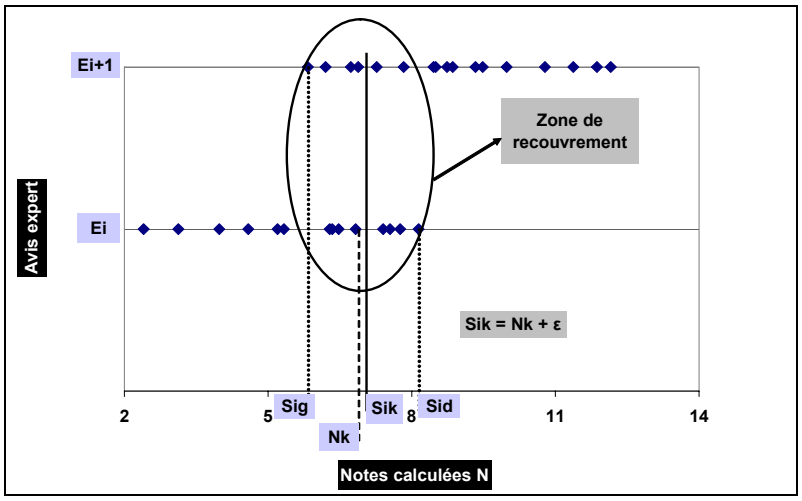


Figure 16 : schéma illustrant le principe de choix des alternatives des seuils (Si, i = 1….3)

- étape (1) : consiste à calculer les erreurs pour chaque alternative de seuils $(S1\ S2\ S3)_k$ afin de calculer le coût global des erreurs MC. Ces erreurs correspondent aux probabilités $P(C_j/E_i)_k$ d'une valeur calculée C_j pour un tronçon en état E_i. Ces probabilités dépendent des trois seuils recherchés, sont estimées avec un échantillon de calage, selon la figure suivante :

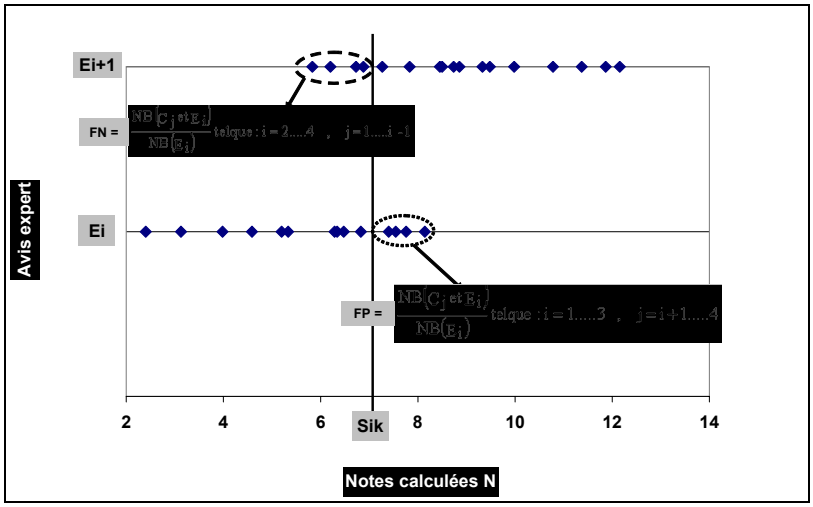


Figure 17 : schéma décrivant le principe de calcul des erreurs d'affectation

En comparant l'état de performance des tronçons estimés par les experts E_i et l'état calculé C_j (par comparaison de la note N et des seuils), un tableau de contingence (4×4) peut être établi. Ce tableau est construit en classant les tronçons d'échantillon respectivement sur les lignes et sur les colonnes par les experts E_i (référence) et en fonction des seuils calculés C_j (selon le calcul). Sur la

diagonale, on trouve donc les valeurs bien classées, hors de la diagonale les éléments mal classés. Les erreurs d'affectations associées aux différentes situations $P(C_j/E_i)_k$ correspondent aux rapports entre le nombre de tronçon mal classés NB (C_j et E_i) et la somme des tronçons sur une ligne NB (E_i).

- étape 2 : il s'agit de calculer le coût global des erreurs d'affectation MC_k pour chaque alternative (k) de jeu de seuils $(S1\ S2\ S3)_k$ (voir 1-3-3). Cela nécessite que les gestionnaires fournissent le coût associé à un faux négatif CFN(i, j), le coût associé à un faux positif CFP(i, j). Par contre, la probabilité P (Ei) qu'un tronçon soit en état Ei dépend de la population sur laquelle on souhaite utiliser la procédure d'évaluation.

- étape 3 : correspond au choix du jeu de seuils optimisé, correspondant au MC le plus bas. Pour répondre à cette question, nous avons décomposé le choix de jeu de seuils optimisé en deux phases :

    - phase 1 : l'objectif de cette phase est d'éliminer les jeux de seuils qui ne minimisent pas MC pour réduire l'intervalle des seuils possibles et se rapprocher des seuils optimums. Pour cela, une méthode graphique a été proposée, elle vise à estimer les valeurs des intervalles possibles pour S2; S3.

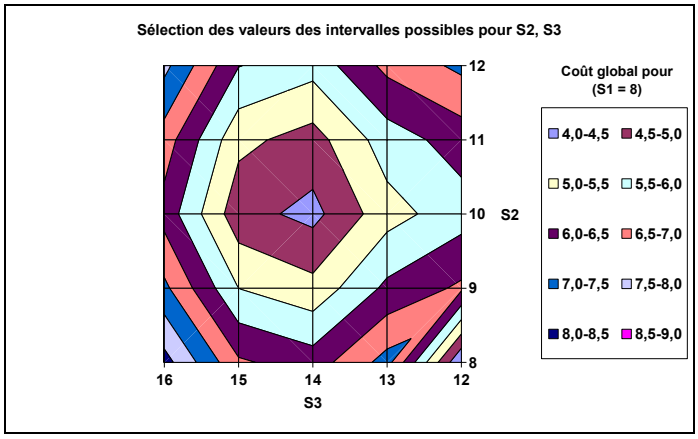


Figure 18 : graphique représentant les coûts globaux en fonction des valeurs des intervalles possibles pour (S2, S3) (Phase 1).

Pour chaque paire possible (S2, S3), MC a été calculé. La surface décrite par le graphique représente l'univers des coûts attribuables aux erreurs d'affectation correspondant à l'ensemble de couples possibles (S2; S3), pour des valeurs $CFN(i,j)$, $CFP(i,j)$ particulières. La zone la plus basse de MC sur la surface de coût représente le domaine optimum pour (S2; S3). Cette zone constitue l'ensemble des valeurs retenues pour S2 et S3. Ici la zone retenue correspond à S2 ∈ [9,8-10,3] et S3 ∈ [13,8-14,3].

On calcule ensuite MC à partir de plusieurs valeurs possibles de S1 et de l'ensemble des valeurs de l'intervalle de (S2; S3) déjà optimisé. Pour chaque valeur de S1, on retient le coût minimum (MC) correspondant à une paire (S2 ; S3) (voir figure 19).

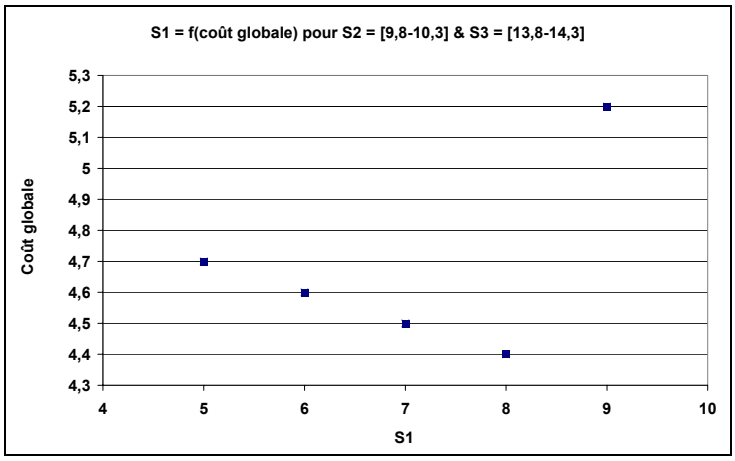


Figure 19 : estimation des valeurs des intervalles possibles de S1 en fonction du coût global (Phase 1)

Ce graphique montre le coût global MC attribuable aux diverses valeurs possibles de S1 pour des valeurs $CFN(i,j);CFP(i,j)$ particulières. Il identifie l'intervalle possible de S1 qui minimise le coût global des erreurs d'affectation MC. L'intervalle retenu pour S1 est centré sur la valeur de S1 correspondant au MC minimal (ici, l'intervalle est centré sur S1 = 8).

- phase 2 : cette phase permet de sélectionner les valeurs finales des seuils à partir des intervalles de valeurs possibles de (S1; S2 et S3) déjà optimisés (S1 ∈ [7,5-8,5], S2∈ [9,8-10,3], S3 ∈ [13,8-14,3]). La phase 2 suit la même procédure que précédemment, seul le niveau de précision change (figures 20 et 21).

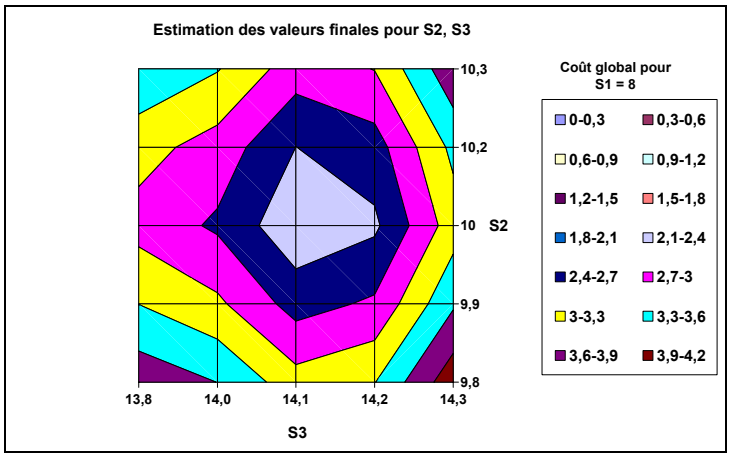


Figure 20 : graphique visant à estimer les valeurs finales pour S2; S3 (Phase 2)

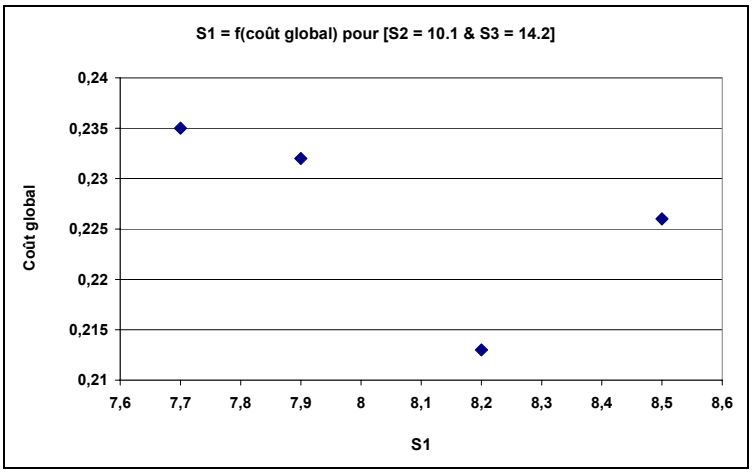


Figure 21 : estimation de la valeur finale de S1 en fonction du coût global (Phase 2)

Le niveau de précision est jugé suffisant pour ne retenir qu'une valeur par seuil et non plus un intervalle. Les figures précédentes montrent que les valeurs finales de S1, S2 et S3 sont respectivement de 8,2 ; 10 et 14,1.

Après avoir calé les trois seuils pour un échantillon avec des avis d'experts, nous nous intéressons maintenant au calage des trois seuils pour un patrimoine donné, chaque patrimoine ayant ses spécificités propres (état de patrimoine, choix des CFN et CFP par le gestionnaire, etc.). Le calage des seuils pour un patrimoine donné est effectué à partir d'un échantillon du patrimoine. Cet échantillon dit « local » peut être représentatif du patrimoine (c'est-à-dire que les proportions des tronçons en état G1, G2, G3, G4 sont identiques au patrimoine complet) ou non.

2.5 Calage des seuils pour un échantillon local représentatif du patrimoine à évaluer

L'échantillon local étudié pour lequel les seuils seront calés, doit être représentatif de la population. Cet échantillon local choisi comprend les notes des tronçons sans avis d'experts. Un exemple est présenté sur la figure suivante :

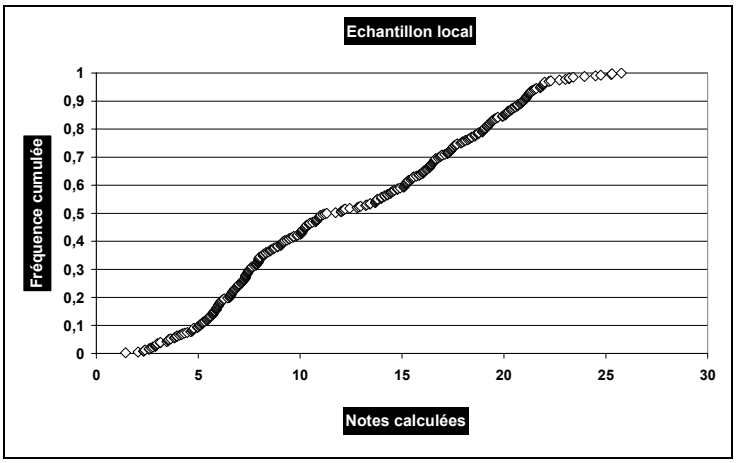


Figure 22 : distribution de notes (densités) des tronçons d'un patrimoine

La figure précédente montre la fonction de répartition des notes des tronçons pour l'échantillon étudié local. La moyenne avoisine 13, et varie de 1,44 pour le tronçon le moins défaillant à 25,76 pour le tronçon le plus défaillant.

2.5.1 Procédure de calage

Le principe de base du calage des seuils pour un échantillon local représentatif, en utilisant l'échantillon avec avis d'experts, est schématisé sur la figure suivante :

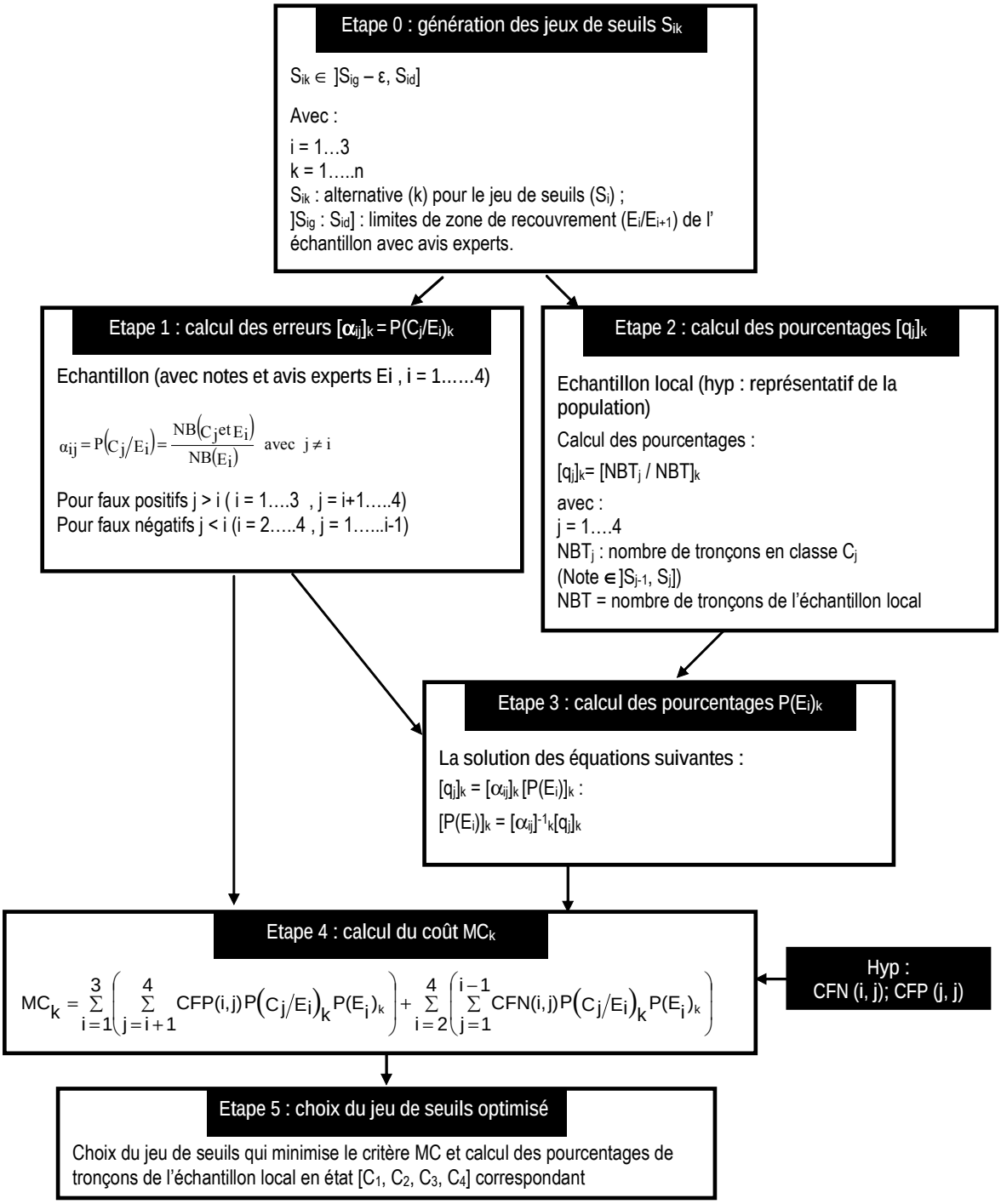


Figure 23 : démarche de choix des seuils S1, S2 et S3 pour l'échantillon local représentatif du patrimoine à évaluer en utilisant l'échantillon avec les avis experts

La démarche précédente comprend 5 étapes différentes dont les étapes 0, 1, 4 et 5 sont déjà expliquées dans le paragraphe 2.4 (figures 16, 17, 18, 19, 20, 21). Nous allons détailler dans la suite les étapes 2, 3 :

- étape 2 : concerne l'estimation des pourcentages $[q_j]_k$ qui sert à calculer les proportions [P_1, P_2, P_3, P_4]. Ces proportions sont utilisées pour évaluer le coût global (cf. figure 23) pour le choix du jeu de seuils optimisé (cf. étape 4/ figure 23). Pour cela, on applique l'alternative des seuils $(S_1, S_2, S_3)_k$ sur l'échantillon local pour calculer les pourcentages $[q_j]_k$.

- étape 3: correspond à la détermination des proportions d'état $[P1, P2, P3, P4]_k$. La figure suivante présente le principe d'estimation ces proportions d'états :

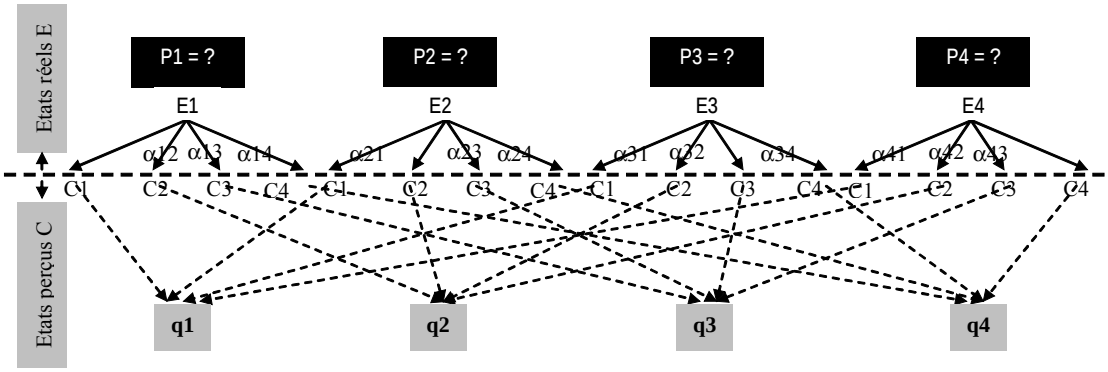


Figure 24 : schéma décrivant les relations entre les proportions qj et les proportions P(Ei)

Les proportions d'états [P1, P2, P3, P4] sont estimées de manière à exploiter les relations entre les deux états des tronçons « états réels au niveau de l'échantillon avec avis d'experts » et « états perçus au niveau de l'échantillon local étudiée ». Ces relations sont traduites par quatre équations :

$$q_4 = P_4 * (1-\alpha_{41}-\alpha_{42}-\alpha_{43}) + P_3 * \alpha_{34} + P_2 * \alpha_{24} + P_1 * \alpha_{14} \quad [10]$$

$$q_3 = P_3 * (1-\alpha_{32}-\alpha_{31}-\alpha_{34}) + P_4 * \alpha_{43} + P_1 * \alpha_{13} + P_2 * \alpha_{23} \quad [11]$$

$$q_2 = P_2 * (1-\alpha_{21}-\alpha_{23}-\alpha_{24}) + P_1 * \alpha_{12} + P_4 * \alpha_{42} + P_3 * \alpha_{32} \quad [12]$$

$$q_1 = P_1 * (1-\alpha_{12}-\alpha_{13}-\alpha_{14}) + P_2 * \alpha_{21} + P_3 * \alpha_{31} + P_4 * \alpha_{41} \quad [13]$$

Tel que :

$\alpha_{ij} = P(C_j/E_i)$ (cf. étape 1 et figure 23)

C_j : résultats du test (cf. figure 24)

- étape 5 : après avoir optimisé les seuils (S_1 S_2 S_3) (minimisé le critère), on les applique sur l'échantillon local pour calculer les proportions : C_1, C_2, C_3, C_4.

2.5.2 Etude de sensibilité vis-à-vis des paramètres économiques

L'échantillon avec avis d'experts (sur notre exemple fictif) montre que les recouvrements entre avis (1 ; 2) et (2 ; 3), (3, 4) sont assez faibles et il n'y a aucun recouvrement entre l'avis (1 ; 3) et (2 ; 4), (1 ; 4). Pour cela, nous constatons que :

- l'influence des rapports de coût (CFN(3, 1)/CFP(1, 3) & CFN(4, 2)/CFP(2, 4) & CFN(4, 1)/CFP (1, 4)) sur la détermination des valeurs finales de (S_1, S_2, S_3) est nulle ;

- l'influence du rapport de coût CFN(2, 1)/CFP(1, 2) sur la détermination des valeurs finales de (S_2, S_3) est assez faible ou nulle ;
- l'influence du rapport de coût CFN(3, 2)/CFP(2, 3) sur la détermination des valeurs finales de (S_1, S_3) est assez faible ou nulle ;
- l'influence du rapport de coût CFN(4, 3)/CFP(3, 4) sur la détermination des valeurs finales de (S_1, S_2) est assez faible ou nulle.

Cependant, les valeurs de rapport de coût (CFN(j, i)/CFP(i, j) avec i = 1, 2, 3 et j = i +1) peuvent avoir des effets importants sur la détermination de valeur de MC et des seuils correspondants (S_i). Nous avons calculé le coût global des erreurs d'affectation MC et les valeurs des seuils optimums (S_i) correspondant à une gamme de valeurs possibles de rapport CFN(j, i)/CFP(i, j) et pour les valeurs de p(i) suivantes :

Tableau 10 : déplacements du seuil (S2) et des états correspondants (nb2, nb3) lors du changement du rapport de coût CFN (3, 2) / CFP (2, 3)

entrées	sorties			
CFN(3, 2) /CFP(2, 3)	nb_1 (%)	nb_2 (%)	nb_3 (%)	nb_4 (%)
1	37,75	16,25	8,5	37,5
↗ 1.5	37,75	11,75 ↘	13 ↗	37,5
↗ 2	37,75	7 ↘	17,75 ↗	37,5

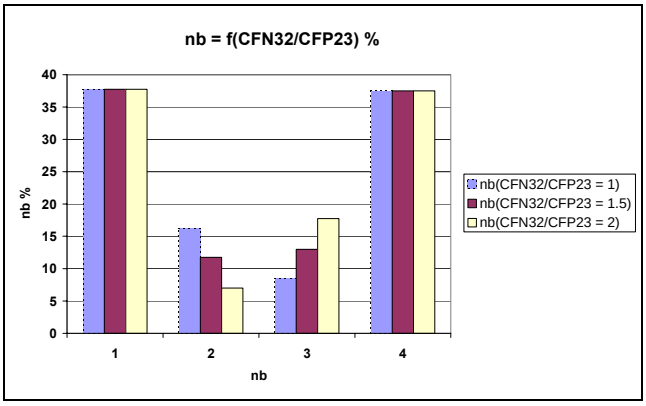


Figure 25 : schéma illustrant les déplacements du seuil (S2) et des états correspondants (nb2, nb3) lors du changement du rapport de coût CFN(3, 2)/CFP(2, 3)

Le tableau et la figure précédents nous permettent de constater qu'en augmentant les valeurs de rapport de coût (CFN(j, i)/CFP(i, j) avec i = 1, 2, 3 et j = i +1), les valeurs finales de seuils correspondants (S_i) diminuent pour éviter l'augmentation du coût global.

Tableau 11 : déplacements du seuil (S_i) et des états correspondants (nbi, nbj) lors du changement du rapport de coût CFN(j, i) / CFP(i, j)

Rapport coût	Seuils	Etat correspondant
CFN(j, i) / CFP(i, j) ↗ i = 1, 2, 3 et j = i +1	S_i ↘	nb_i ↘ nb_j ↗

Pour conclure, la valeur de MC et les valeurs des seuils optimums correspondants (S1, S2, S3) sont sensibles aux variations du rapport de coût CFN(j, i)/CFP(i, j) avec i = 1, 2, 3 et j = i +1). Les rapports de coût doivent être fournis par le gestionnaire en fonction des pratiques (actions et dépenses occasionnées

par un classement en niveau G4 ou G3). En l'absence d'études sur ces coûts on propose de remplacer les coûts par des coefficients d'importance relative des différentes erreurs de classement.

Après avoir calé les trois seuils pour un échantillon représentatif de la population, nous nous intéressons dans la suite au calage de ces trois seuils pour un échantillon non représentatif de la population.

2.6 Calage des seuils pour un échantillon local non représentatif du patrimoine à évaluer

2.6.1 Procédure de calage

La démarche suivante comprend 3 étapes différentes déjà expliquées dans le paragraphe 2.4, (figures 16, 17, 18, 19, 20, 21). Or, les proportions d'état $P(E_i)$ sont déterminées par l'hypothèse de experts.

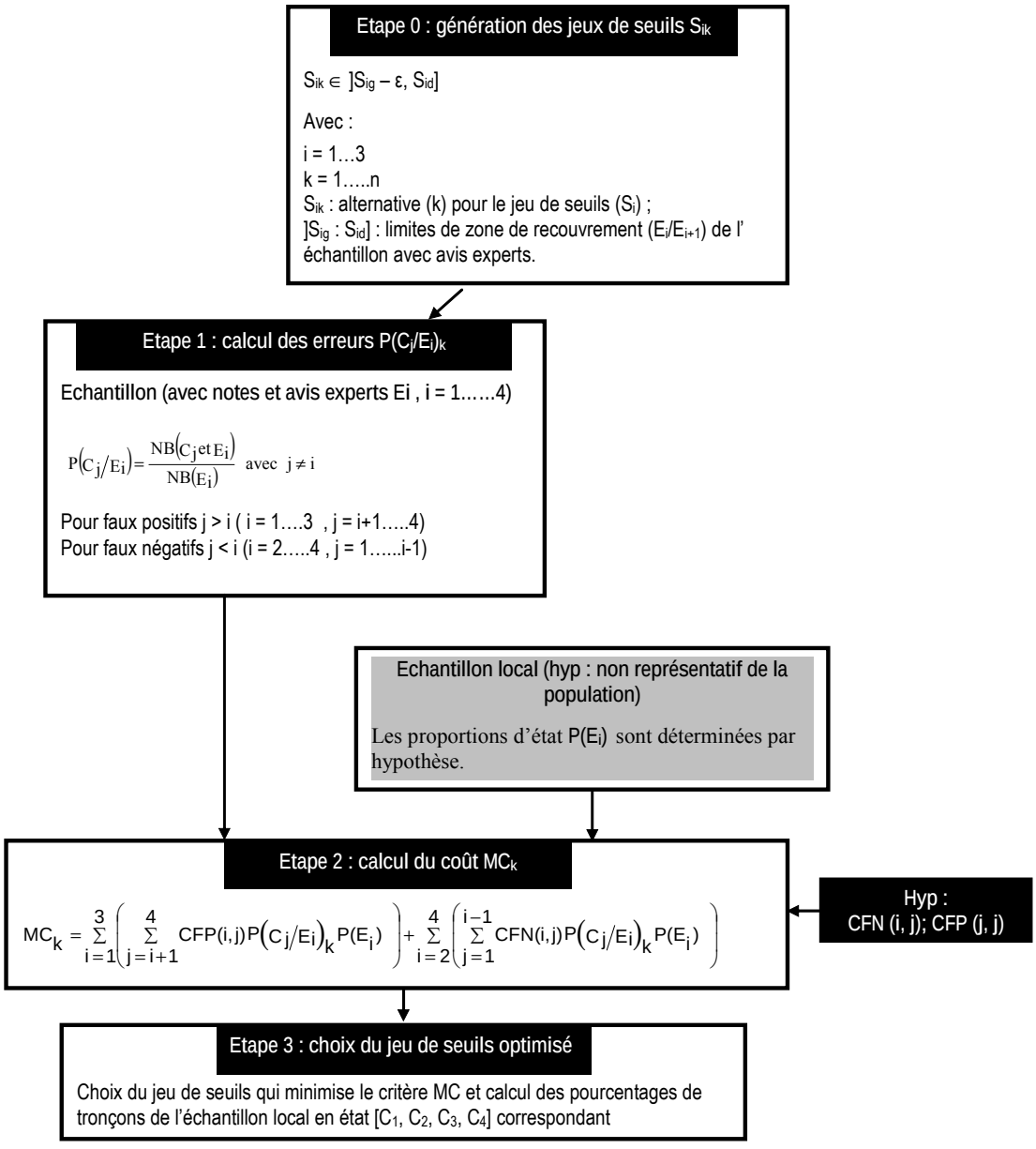


Figure 26 : démarche de choix des seuils S1, S2 et S3 pour l'échantillon local non représentatif du patrimoine à évaluer en utilisant l'échantillon avec les avis experts

2.6.2 Etude de sensibilité vis-à-vis des proportions d'état $P(E_i)$

Comme les recouvrements entre avis experts (sur notre exemple fictif) (1 ; 2), (2 ; 3) et (3, 4) sont assez faibles, nous constatons que :

- l'influence des proportions d'état $P(E_1)$, $P(E_2)$ sur la détermination des valeurs finales de seuils (S_2, S_3) est assez faible ou nulle ;
- l'influence des proportions d'état $P(E_2)$, $P(E_3)$ sur la détermination des valeurs finales de seuils (S_1, S_3) est assez faible ou nulle ;
- l'influence des proportions d'état $P(E_3)$, $P(E_4)$ sur la détermination des valeurs finales de seuils (S_1, S_2) est assez faible ou nulle.

Cependant, les valeurs des proportions ($P(E_i)/P(E_j)$ avec i = 1, 2, 3 et j = i +1) peuvent avoir des effets importants sur la détermination de valeur de MC et des seuils correspondants (S_i). Nous avons calculé le coût global des erreurs d'affectation MC et les valeurs des seuils optimums (S_i) correspondant sur une gamme de valeurs possibles des proportions $P(Ei)/P(E_j)$ les suivantes :

Tableau 12 : déplacements du seuil (S2) et des états correspondants (nb2, nb3) lors du changement des proportions P(E1), P(E2), P(E3), P(E4)

	entrées				Sorties		
Etat de patrimoine	$P(E_1)$	$P(E_2)$	$P(E_3)$	$P(E_4)$	S_1	S_2	S_3
bon	0.3	0.3	0.2	0.2	8.14	12.15	14.76
intermédiaire	0.25 ↘	0.25 ↘	0.25 ↗	0.25 ↗	8.14	11.38 ↘	14.76
mauvais	0.15 ↘	0.15 ↘	0.35 ↗	0.35 ↗	8.14	10.51 ↘	14.76

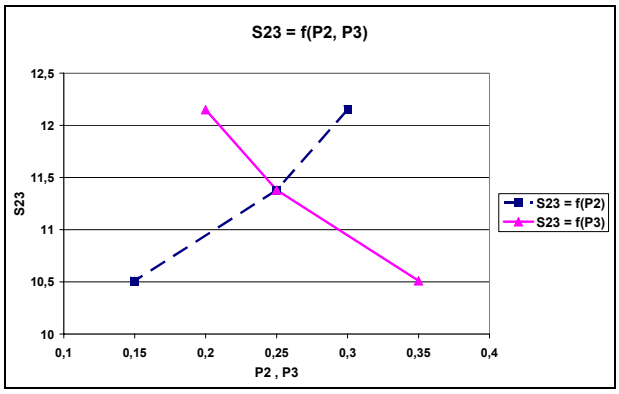


Figure 27 : courbe illustrant les déplacements du seuil (S_2) lors du changement des proportions (P_2, P_3)

Les tableaux et les figures précédents nous permettent de constater qu'en augmentant la proportion $P(E_i)$ et diminuant la proportion $P(E_j)$ (avec i = 1, 2, 3 et j = i +1), les valeurs finales de seuils correspondants (S_i) augmentent. Le tableau précédent nous permet de constater qu'une hypothèse de mauvais état du patrimoine correspond bien à une augmentation du nombre de tronçons à réhabiliter, et inversement.

Tableau 13 : déplacement des seuils (Si) et états correspondants (nbi, nbj) lors de changements des proportions (P(Ei) / P(Ej) avec i = 1, 2, 3 et j = i +1)

proportion	Seuils	Etat correspondant
P(Ei) ↗ i = 1, 2, 3 et j = i +1	S_i ↗	nb_i ↗
P(Ej) ↘ i = 1, 2, 3 et j = i +1		nb_j ↘

Les valeurs des $P(Ei)$ avec $i = 1.....4$ sont donc des facteurs importants pour le calage. Cette observation nous conduit à étudier plus en détail l'influence du choix du jeu P(Ei).

2.6.3 Etude du choix du jeu P(Ei)

Les hypothèses sur l'état du patrimoine (valeurs de P(Ei) avec i Є {1, 2, 3, 4}) influencent le calage de manière significative. Ainsi le choix de ces valeurs est une étape importante du calage, d'autant plus lorsque l'on ne connaît pas l'état réel du patrimoine. Pour faciliter ce choix, nous proposons une méthodologie basée sur l'analyse systématique des erreurs de calage lorsque l'hypothèse d'état du patrimoine ne correspond pas à la réalité.

L'erreur de calage est calculée à partir de la différence $\Delta MC_{l,m}$ entre deux coûts : le coût dû à un jeu (l) de valeurs de $P(Ei)$ avec $i = 1....4$ utilisés pour le calage et celui dû à un jeu réel (m) de valeurs de $P(Ei)$ sur un site :

$$\Delta MCl,m = MCm\left(Sijl\right) - MCm\left(Sijm\right) \qquad [14]$$

Tel que :

$MC_m(S_{ijl})$: coût des erreurs d'affectation calculé pour le jeu (m) de valeurs réelles des $P(Ei)$ si on utilise les seuils S_{ijl} qui ont été optimisés pour un jeu (l) de valeurs de $P(Ei)$;

$MC_m(S_{ijm})$: coût des erreurs d'affectation calculé pour un jeu (m) de valeurs réelles de $P(Ei)$ si on utilise les seuils S_{ijm} qui ont été optimisés pour ce jeu de valeur (m).

$MC_m(S_{ijm})$ correspond donc au coût minimal obtenu quand l'hypothèse sur l'état du patrimoine est exactement en accord avec la réalité et $MC_m(S_{ijl})$ correspond au coût obtenu lorsque l'hypothèse sur l'état du patrimoine n'est pas conforme à la réalité. Les simulations sont réalisées pour la gamme de CFN(i, j) et CFP(i, j) indiquée dans le tableau 14 et pour 7 combinaisons de valeurs pour P(Ei), afin de représenter différents états possibles du patrimoine (tableau 15).

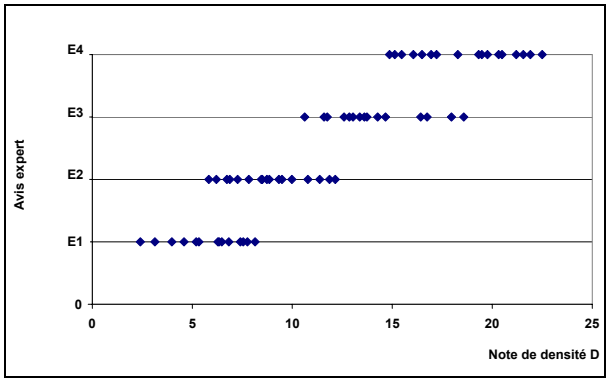
Tableau 14 : gamme de valeurs de CFN = {1, 3, 10} utilisée pour les simulations

	C1	C2	C3	C4
E1	0	1	1	1
E2	1	0	1	1
E3	10	3	0	1
E4	10	10	3	0

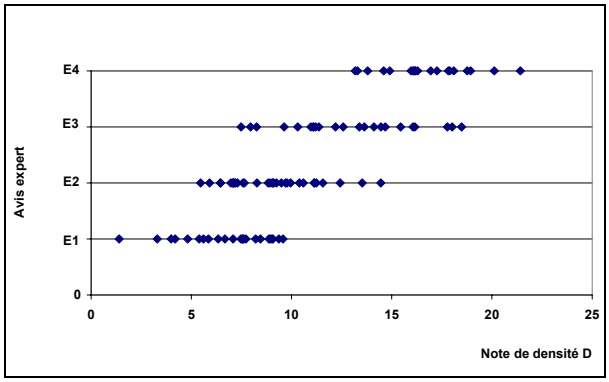
Tableau 15 : combinaisons de valeurs de $P(Ei)$ avec $i = 1.....4$

l ou m	P1 = P2 (%)	P3 = P4 (%)
(1)	40	10
(2)	35	15
(3)	30	20
(4)	25	25
(5)	20	30
(6)	15	35
(7)	10	40

Le jeu (1) correspond à un patrimoine en assez bon état, le jeu(4) à un patrimoine dans un état intermédiaire et le jeu(7) à un patrimoine jugé en très mauvais état. Les simulations pour évaluer les $MC_m(S_{ijl})$ sont réalisées pour deux échantillons différents de calage, qui sont les suivants :



28a : les zones de recouvrement (E1, E2), (E2, E3), (E3, E4) sont assez faibles et il n'y a aucun recouvrement sur plus de 2 modalités



28b : les zones de recouvrement sont plus importants et il y a du recouvrement entre E1et E3 ; et E2et E4

Figure 28 : échantillons avec avis d'experts (deux exemples fictifs)

Les tableaux suivants présentent les résultats de calcul du coût $MC_m(S_{ijl})$: le tableau 16a est pour l'échantillon 28a et l'autre 16b est pour l'échantillon 28b.

Tableau 16 : valeurs du coût MCm(Sijl) pour une gamme de CFN = {1, 3, 10}

16a : pour l'échantillon 28a

		Jeux de distribution réelle sur un site (em)						
		m = 1	m = 2	m = 3	m = 4	m = 5	m = 6	m = 7
Jeux utilisé pour le calage (al)	a = 1	0,488	0,485	0,488	0,490	0,493	0,492	0,496
	a = 2	0,488	0,485	0,488	0,490	0,493	0,492	0,496
	a = 3	0,488	0,485	0,483	0,490	0,493	0,492	0,496
	a = 4	0,590	0,544	0,503	0,458	0,414	0,370	0,327
	a = 5	0,590	0,544	0,503	0,458	0,414	0,370	0,327
	a = 6	0,590	0,544	0,503	0,458	0,414	0,370	0,327
	a = 7	0,590	0,544	0,503	0,458	0,414	0,370	0,327

16b : pour l'échantillon 28b

		Jeux de distribution réelle sur un site (em)						
		m = 1	m = 2	m = 3	m = 4	m = 5	m = 6	m = 7
Jeux utilisé pour le calage (al)	a = 1	0,675	0,554	0,483	0,434	0,459	0,558	0,788
	a = 2	0,675	0,554	0,483	0,434	0,459	0,558	0,788
	a = 3	0,675	0,554	0,483	0,434	0,459	0,558	0,788
	a = 4	0,781	0,621	0,511	0,434	0,434	0,457	0,609
	a = 5	0,781	0,621	0,511	0,434	0,434	0,457	0,609
	a = 6	0,949	0,713	0,568	0,465	0,447	0,450	0,577
	a = 7	0,949	0,713	0,568	0,465	0,447	0,450	0,577

Les valeurs de la diagonale indiquent le coût de calage optimum $MC_m(S_{ijl})$ avec l = m. Différents critères peuvent être considérés en situation d'incertitude :

- Critère de l'espérance mathématique : on sélectionnera l'action qui correspond à l'espérance de gain maximal (le jeu qui minimise l'espérance de coût) ;

- Critère de Wald (pessimiste) : on sélectionnera l'action correspondant au maximum des gains minimums (le jeu qui minimise le coût maximum) ;
- Critère de Hurwicz (optimiste) : on sélectionnera l'action qui correspond au maximum des maximum (minimise le coût minimum) ;
- Critère de Savage : minimisation des regrets.

Ces critères sont détaillés en annexe 2. Le tableau 17 présente les jeux à sélectionner selon le critère utilisé :

Tableau 17 : jeux de $P(E_i)$ retenus selon le critère utilisé

17a : pour l'échantillon 28a

		Critère utilisé			
		Espérance	WALD	HURWICZ (α = 0)	SAVAGE
meilleurs jeux (al)	a = 1	-0,4902	-0,496	-0,485	0,403
	a = 2	-0,4902	-0,496	-0,485	0,403
	a = 3	-0,4892	-0,496	-0,485	0,403
	a = 4	-0,4578	-0,59	-0,327	0,18
	a = 5	-0,4578	-0,59	-0,327	0,18
	a = 6	-0,4578	-0,59	-0,327	0,18
	a = 7	-0,4578	-0,59	-0,327	0,18

17b : pour l'échantillon 28b

		Critère utilisé			
		Espérance	WALD	HURWICZ (α = 0)	SAVAGE
meilleurs jeux (al)	a = 1	-0,564	-0,787	-0,434	0,344
	a = 2	-0,564	-0,787	-0,434	0,344
	a = 3	-0,564	-0,787	-0,434	0,344
	a = 4	-0,549	-0,781	-0,434	0,241
	a = 5	-0,549	-0,781	-0,434	0,241
	a = 6	-0,595	-0,949	-0,446	0,563
	a = 7	-0,595	-0,949	-0,446	0,563

Ces tableaux montrent les jeux qui semblent être les meilleurs pour le calage pour notre exemple : les jeux 4 à 7 pour l'échantillon 28a et 4 ou 5 pour l'échantillon 28b, étant donné qu'ils sont retenus par la majorité des critères utilisés.

2.7 Conclusion

La recherche finalisée du PN RERAU 5/6 a montré son caractère opérationnel pour le calcul d'indicateurs de dysfonctionnement à partir de rapports d'inspections visuelles. Un travail important a été fait dans ce chapitre pour paramétrer et mettre en œuvre efficacement cet outil. Ce travail a également mis en évidence l'importance de la définition des valeurs seuils qui permettent de transformer une évaluation numérique en niveau de dysfonctionnement.

Nous avons proposé un critère de calage de ces seuils permettant de prendre en compte simultanément les erreurs de sous évaluation et de sur évaluation des dysfonctionnements. Ce critère est applicable à de nombreux domaines lorsque des niveaux de performances doivent être définis. La procédure présentée permet de minimiser un critère coût global, qui n'a de sens qu'à l'échelle d'un parc, mais elle induit des erreurs ponctuelles (à l'échelle d'un tronçon) qui peuvent être importantes.

Le calage des seuils a été fait pour un échantillon avec avis d'experts, un échantillon local non représentatif et un échantillon local représentatif du patrimoine à évaluer. Les méthodes sont destinées à être mises en oeuvre par les acteurs des réseaux d'assainissement. Pour faciliter l'utilisation de cette méthode, un prototype d'outil informatique est proposé. Ce dernier donne une réponse rapide pour ce qui concerne le

calage des seuils. Ce prototype est une interface programmée avec Visual Basic Application sous Excel. Le choix de ce langage informatique se justifie pour la nature visuelle des applications réalisées.

Les valeurs des seuils optimums calés (S1, S2, S3) sont sensibles aux variations de coûts associés aux faux négatifs et faux positifs CFN(i, j) et CFP(i, j) et de proportions d'états $P(E_i)$. Des études complémentaires sont à réaliser pour aider à définir les paramètres CFN(i, j) et CFP(i, j). En outre, toute étude de patrimoine devra intégrer des études de sensibilité analogues à celles que nous avons réalisées dans ce chapitre (voir également l'expérimentation présentée dans le chapitre 6).

A la suite de cette étude, nous avons énoncé plusieurs limites et plusieurs questions de recherche en suspens. Les valeurs des seuils précis sont à nuancer pour plusieurs raisons. Les expertises classant un tronçon en niveau G3 ou G4 ne sont pas assez nombreuses pour pouvoir déduire des valeurs de seuils exactes, d'autant plus que les rapports CFN/CFP n'ont pas encore été étudiés assez profondément pour mettre en place un système reflétant la réalité.

Une démarche alternative, reposant sur l'utilisation de la théorie des sous ensembles flous, est proposée dans le chapitre 5. L'approche floue est une perspective de modélisation très intéressante puisqu'elle permet de définir l'imprécision des transitions entre deux classes d'état en considérant qu'un tronçon peut appartenir en partie à deux classes successives lorsqu'il est difficile d'établir un jugement strict.

Malgré le paramétrage d'indicateurs de dysfonctionnement évalués à partir de rapports d'inspections visuelles, il est utile également de vérifier si les formulations des 31 critères de RERAU sont en accord avec les intentions des experts. Pour cela, nous allons étudier dans le chapitre suivant les formulations des 31 critères.

3 Chapitre 3. Analyse critique de la formulation des critères RERAU 66

3.1 Objectifs 66

3.2 Démarche suivie 66

3.2.1 Formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF 66

3.2.2 Réalisation du modèle informatique 68

3.3 Indices pour l'analyse de la formulation d'un critère 69

3.3.1 Distribution du critère 69

3.3.2 Indice IL et indice IS 71

3.3.3 Importance relative d'un indicateur au sein d'un critère 73

3.3.4 Indice d'anomalie potentielle (IAP) 78

3.4 Bilan de l'analyse de la formulation des critères 80

3.5 Conclusion et discussion 82

3 Chapitre 3. Analyse critique de la formulation des critères RERAU

3.1 Objectifs

L'objectif de ce chapitre est de réexaminer la formulation des critères RERAU d'un point de vue numérique. La formulation de chaque critère a été modélisée numériquement sous Excel avec un prototype d'outil informatique programmé en Visual Basic. Ce dernier permet d'évaluer rapidement un critère à partir de différentes combinaisons d'indicateurs. Il fournit un certain nombre d'indices permettant de tester la formulation du critère. Les indices proposés permettent d'évaluer la formulation globale d'un critère RERAU, de juger de l'importance relative de chaque indicateur pour l'évaluation d'un critère et également d'identifier des anomalies potentielles dans la formulation.

Dans ce chapitre nous avons étudié et présenté le cas du critère R/POL2/DEV-TS/INF (voir figure 29) comme illustration. Les autres critères RERAU sont examinés et présentés dans le rapport T4-1 INDIGAU. Les conclusions sur l'ensemble des critères sont présentées à la fin de ce chapitre. L'ensembles de ces conclusions a été discuté lors d'une réunion du projet INDIGAU (26 mars 2008 à Paris) réunissant différents experts (gestionnaires et chercheurs) : cette réunion a abouti à des propositions de modifications/améliorations de certains indicateurs (rapport T4-1 INDIGAU).

3.2 Démarche suivie

3.2.1 Formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF

Le critère R/POL2/DEV-TS/INF évalue comment l'infiltration dans un tronçon contribue à des déversements par temps sec polluant les eaux de surface. Sa formulation est présentée à la figure 29.

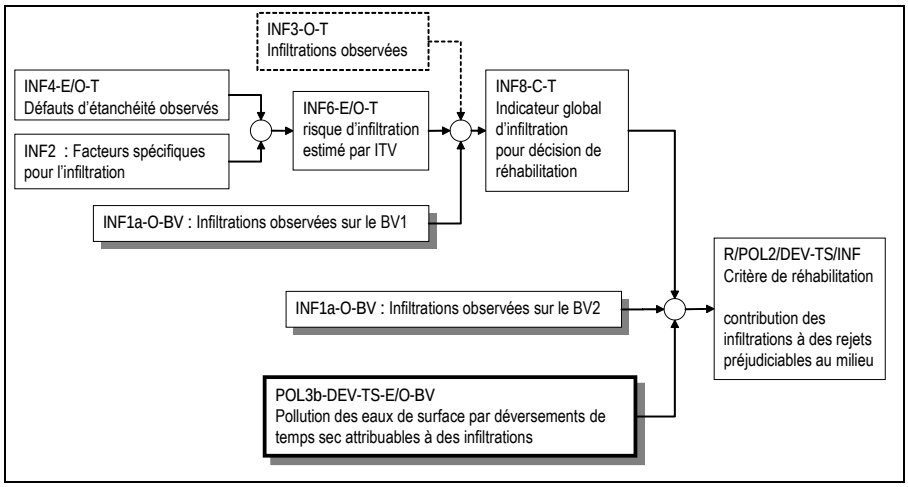


Figure 29 : formulation RERAU du critère R/POL2/DEV-TS/INF : réhabilitation pour infiltrations contribuant à des déversements de temps sec polluant les eaux de surface (Le Gauffre *et al.*, 2004)

La figure précédente montre la combinaison entre dysfonctionnements et impacts afin de construire ce critère de réhabilitation. On considère l'impact POL (pollution des eaux de surface), que l'on croise avec le

dysfonctionnement infiltration (INF8-C-T et INF1a-O-BV). Les indicateurs de performance concernant ce critère sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 18 : indicateurs de performance concernant le critère R/POL2/DEV-TS/INF (Le Gauffre *et al.*, 2004)

Indicateurs	Code	Calcul
indicateurs simples		
Infiltrations observées directement à l'échelle du bassin versant 1	INF1–BV1	
Facteurs spécifiques pour l'infiltration à l'échelle du tronçon	INF2	
Infiltration observée directement à l'échelle du tronçon	INF3	
Etat de santé estimé du tronçon à partir de l'infiltration observée	INF4	
Déversements de temps sec observé directement à l'échelle du bassin versant	DEV - TS	
Sensibilité des eaux de surface estimé à l'échelle du bassin versant	V - ES	
Infiltrations observées directement à l'échelle du bassin versant 2	INF1–BV2	
indicateurs composites		
Risque d'infiltration estimé par ITV	INF6	= INF2 ⊗ INF4
Indicateur global d'infiltration pour décision de réhabilitation	INF8	= INF6 ⊗ INF3 ⊗ INF1-BV1
Pollution des eaux de surface par des déversements de temps sec dus aux infiltrations	POL3b	= DEV – TS ⊗ V – ES
critère		
Réhabilitation pour infiltrations contribuant à des déversements de temps sec polluant les eaux de surface	R/POL/INF	= min (INF8, INF1-BV2, POL3b)

L'indicateur composite INF8 est construit à partir de trois indicateurs INF1, INF3 et INF6, sa formulation est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 19 : opérateur initial pour l'évaluation de l'indicateur INF8 (Le Gauffre et al., 2004)

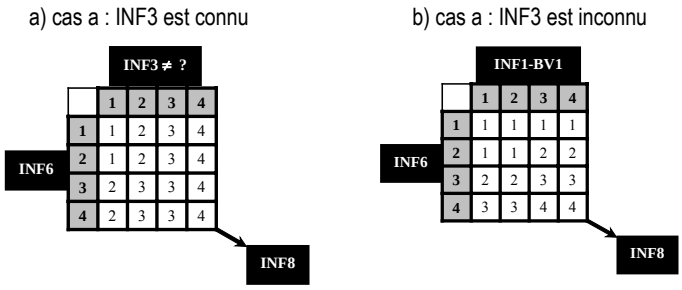
INF1 / INF3	1	2	3	4	inconnu = 3
1	1		1 (+1 si INF6 ≥ 3)		
2	2		2 (+1 si INF6 ≥ 3)		
3	3		3		
4	4		4		
inconnu	INF6 - 1		INF6		

Tableau 20 : opérateur simplifié pour l'évaluation de l'indicateur INF8

INF1 / INF3	1	2	3	4	inconnu = 3
1	1 (+1 si INF6 ≥ 3)				
2	2 (+1 si INF6 ≥ 3)				
3	3				
4	4				
inconnu	INF6 - 1		INF6		

Le tableau 19 illustre la construction d'un indicateur composite INF8 (infiltration estimée ou observée à l'échelle du tronçon) à partir de deux indicateurs simples (INF1 et INF3 infiltration observée, respectivement à l'échelle du bassin versant et du tronçon) et d'un indicateur composite (INF6 infiltration estimée à partir de l'état du tronçon). La logique de construction de l'indicateur composite INF8 a été révisée et simplifiée (voir tableau 20). La simplification consiste à ignorer l'indicateur INF1 lorsque l'indicateur INF3 est disponible sur le tronçon. Lorsque cet indicateur INF3 (infiltration observée directement à l'échelle du tronçon) n'est pas disponible du fait d'une inspection réalisée en dehors de la période propice au constat d'infiltration, alors, dans ce cas ce sont les indicateurs INF6 et INF1 (constat à l'échelle du BV) qui sont utilisés.

Tableau 21 : opérateur simplifié pour l'évaluation de l'indicateur INF8 (modélisation informatique)



En d'autres termes, l'indicateur INF8 est évalué à partir de 3 sources d'information : INF1, INF3 et INF6. La confrontation des 3 sources est structurée par la valeur de INF3 et deux cas sont considérés :

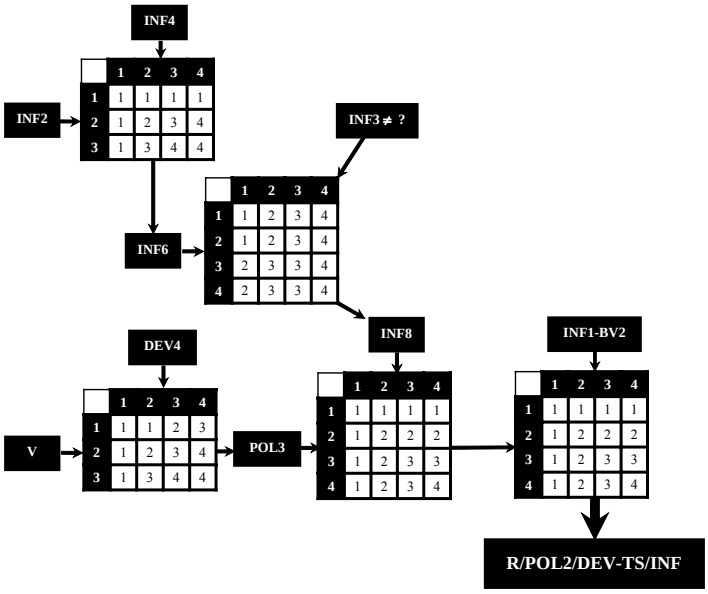
- si INF3 est connu, alors INF3 est privilégié à INF6, INF3 est à moduler par INF6, tableau 21-a ;
- si INF3 est inconnu, alors INF1 est utilisé à la place de INF3 et INF6 est privilégié à INF1, INF6 est à moduler par INF1, tableau 21-b.

Dans la section suivante, nous présentons le modèle numérique correspondant à la formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF et prenant en compte la modification ci–dessus.

3.2.2 Réalisation du modèle informatique

L'analyse numérique des critères nécessite de modéliser leur formulation sous Excel à l'aide d'un outil informatique programmé en Visual Basic. L'exemple suivant présente la conversion de la formulation numérique du critère R/POL2/DEV-TS/INF, on distingue deux cas correspondant au tableau 21 :

a) INF3 est connu et utilisé dans la formulation du critère



b) INF3 est inconnu, on utilise INF1 – BV1 dans la formule du critère

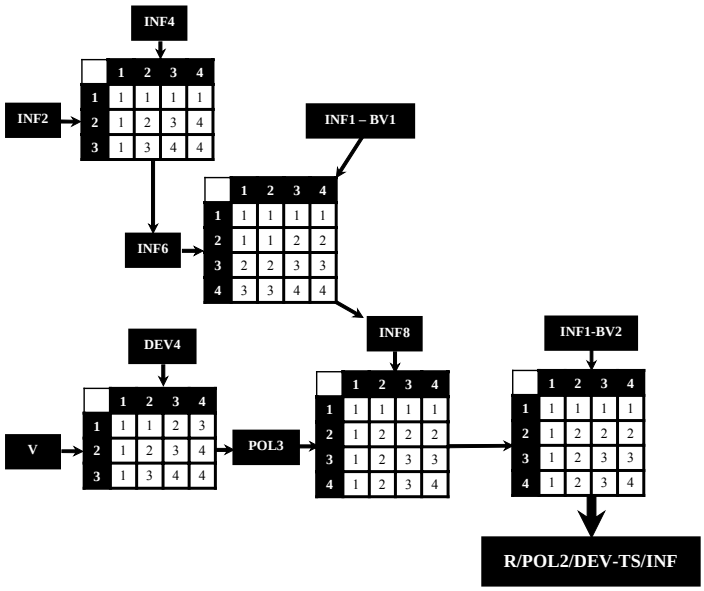


Figure 30 : formulation informatique des règles d'agrégation du critère R/POL2/DEV-TS/INF à partir de 6 indicateurs. Cas a : INF3 est connu et cas b : INF3 n'est pas connu

L'outil informatique calcule la valeur du critère pour toutes les combinaisons possibles de valeurs pour les indicateurs (tableau 18). Pour le critère R/POL2/DEV-TS/INF, nous avons 4 indicateurs à 4 modalités (INF4, INF3, DEV4, INF1) et 2 indicateurs à 3 modalités (V, INF2) ; on obtient ainsi 2304 cas d'évaluation du critère ($4^4 \times 3^2$). A partir de ces combinaisons, nous avons proposé et testé différents indices :

- distribution du critère ;
- indice IL mesurant le caractère limitant d'un indicateur ;
- indice IS mesurant le caractère sélectif d'un indicateur ;
- indice IC mesurant l'importance relative d'un indicateur au sein d'un critère ;
- indice IAP utilisé pour détecter des anomalies potentielles dans l'évaluation d'un critère.

3.3 Indices pour l'analyse de la formulation d'un critère

3.3.1 Distribution du critère

Pour chaque critère, le premier test consiste à observer la distribution des états (1 à 4) d'un critère en fonction de toutes les combinaisons possibles de valeurs pour les indicateurs. La figure 31 présente la distribution du critère R/POL2/DEV-TS/INF lorsque tous les indicateurs varient de 1 à 4 (ou de 1 à 3 selon le nombre de modalités possibles associées à chaque indicateur).

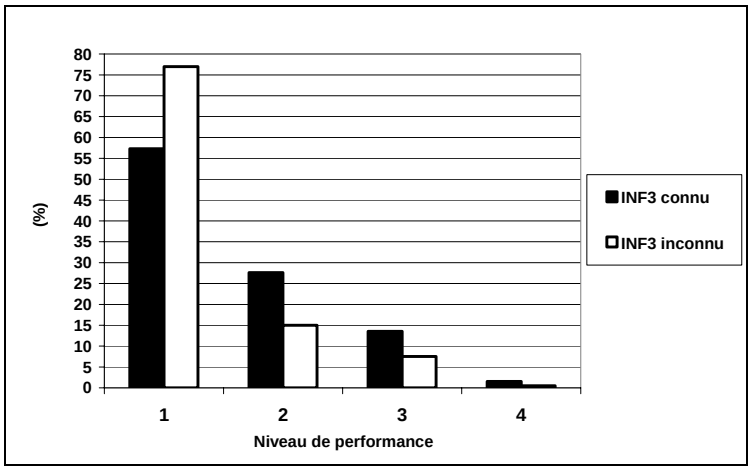
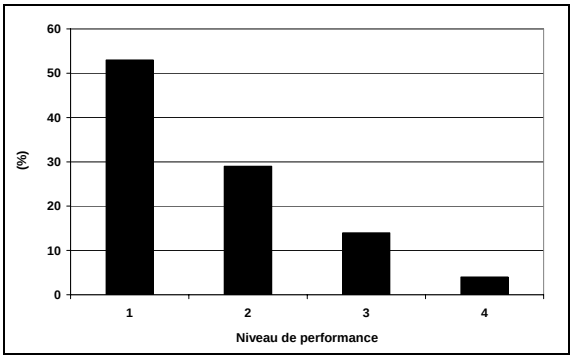


Figure 31 : distribution des 4 niveaux de performance du critère R/POL2/DEV-TS/INF en fonction de l'ensemble des combinaisons possibles des 6 indicateurs (2304 cas)

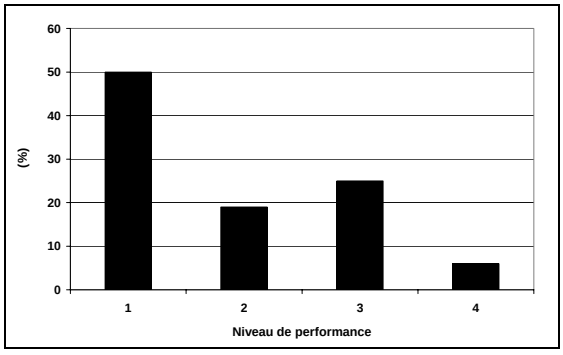
Pour l'exemple ci-dessous, 2304 cas ont été étudiés et pour une distribution homogène des indicateurs, on obtient la répartition suivante pour le critère R/POL2/DEV-TS/INF :

- pour le cas INF3 connu : 57 % en état 1; 27,5 % en état 2; 14 % en état 3 et 1,5 % en état 4;
- et pour le cas INF3 inconnu : 77 % en état 1; 15 % en état 2; 7,5 % en état 3 et 0,5 % en état 4.

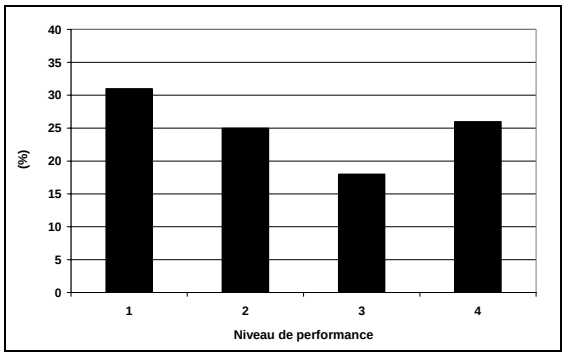
Ce premier test permet de caractériser globalement un critère. Si la distribution montre une forte proportion d'état 3 ou 4, cela signifie que ce critère ne sera pas discriminant lorsque l'on souhaite sélectionner les tronçons à réhabiliter. La distribution obtenue est ainsi comparée à 3 formes de distribution (cf. figure 32) : les distributions (a) et (b) sont acceptables puisqu'elles discriminent bien les tronçons en état 4 ; et la distribution (c) peut nécessiter une amélioration de la formulation car il y a un risque d'obtenir trop de tronçons en état 3 ou 4.



(a)



(b)



(c)

Figure 32 : formes de distribution possibles (a, b, c) des 4 niveaux de performance d'un critère : les cas (a) et (b) sont acceptables et le cas (c) est considéré comme non-conforme

Les combinaisons n'ont pratiquement ni le même intérêt, ni la même fréquence ; ainsi ces informations sur la distribution du critère sont à relativiser en fonction de la formulation du critère et de son utilisation.

3.3.2 Indice IL et indice IS

L'indice IL permet de mesurer le caractère limitant d'un indicateur. Il correspond à la proportion de cas pour lesquels l'indicateur vaut 1 et le critère vaut 1 ou 2, comme le montre la formule ci-dessous :

$$IL = \frac{Nb(R = 1 \text{ et } I = 1) + Nb(R = 2 \text{ et } I = 1)}{Nb(I = 1 \text{ et } R = 1, 2, 3 \text{ ou } 4)} \quad [15]$$

Un indicateur évalué en état 1 ou 2 (niveau acceptable) et ayant un indice IL faible ne permettra pas de limiter le nombre de tronçons en état 4. Cela signifie qu'un état jugé non défaillant pour cet indicateur peut quand même conduire à une gravité importante pour le critère. L'indicateur le plus limitant a un indice IL égal à 100 %.

L'indice IS permet de mesurer le caractère sélectif d'un indicateur. Il correspond à la proportion de cas pour lesquels un critère égal à 4 provient du niveau maximum de l'indicateur étudié (soit 4 en général ou 3 pour un indicateur à trois modalités), comme le montre la formule ci-dessous :

$$IS = \frac{Nb(I = 4 \text{ et } R = 4)}{Nb(R = 4)} \text{ pour un indicateur à 4 modalités ou } IS = \frac{Nb(I = 3 \text{ et } R = 4)}{Nb(R = 4)} \text{ pour 3 modalités} \quad [16]$$

Ces deux indices sont complémentaires et ils représentent deux propriétés distinctes d'un indicateur et de plus ils sont nécessairement évalués vis-à-vis d'un critère.

Tableau 22 : propriétés d'un indicateur représentées par les indices IL et IS, vis-à-vis d'un critère

	Indice I = 100 %	Indice I < 100 %
IL caractère limitant	[I = 1] → [R = 1 ou 2] indicateur I avec valeur faible conduit à critère R avec valeur faible	I = 1 peut conduire à R = 3 ou 4 (peu d'effet limitant)
IS caractère sélectif	[R = 4] → [I = 4] critère R avec valeur forte exige indicateur I avec valeur forte	R = 4 peut être obtenu pour différentes valeurs de l'indice

Les tableaux suivants présentent des exemples d'évaluation pour des indicateurs intervenants dans le critère R/POL2/DEV-TS/INF : le tableau 23 présente l'évaluation d'un indicateur à 3 modalités et le tableau 24 présente l'évaluation d'un indicateur à 4 modalités.

Tableau 23 : répartition des 4 niveaux de performance du critère R/POL2/DEV-TS/INF (2304 cas) en fonction des valeurs de INF2 (indicateur à 3 modalités)

a) cas INF3 connu

INF2	I = 1	I = 2	I = 3
R = 1	482	440	410
R = 2	192	210	228
R = 3	82	106	118
R = 4	12	12	12
Σ	768	768	768

IL = (482 + 192) / 768 = 87.8 %
IS = 12 / 36 = 34 %

b) cas INF3 inconnu

INF2	I = 1	I = 2	I = 3
R = 1	768	528	481
R = 2	0	168	167
R = 3	0	66	107
R = 4	0	6	12
Σ	768	768	768

IL = (768+0) / 768 = 100 %
IS = 12 / 18 = 66 %

Tableau 24 : répartition des 4 niveaux de performance du critère R/POL2/DEV-TS/INF (2304 cas) en fonction des valeurs de INF4 (indicateur à 4 modalités)

a) cas INF3 connu

INF4	I = 1	I = 2	I = 3	I = 4
R = 1	362	334	312	312
R = 2	144	157	169	169
R = 3	61	76	86	86
R = 4	9	9	9	9
Σ	576	576	576	576

IL = (362 + 144) / 576 = 87.8 %
IS = 9 / 36 = 25 %

b) cas INF3 inconnu

INF4	I = 1	I = 2	I = 3	I = 4
R = 1	576	432	384	384
R = 2	0	120	120	96
R = 3	0	24	66	84
R = 4	0	0	6	12
Σ	576	576	576	576

IL = (576 + 0) / 576 = 100 %
IS = 12 / 18 = 66 %

Le tableau suivant présente l'évaluation des indices sélectifs et limitants pour l'ensemble des indicateurs du critère R/POL2/DEV-TS/INF.

Tableau 25 : indices IL et IS pour les indicateurs du critère R/POL2/DEV-TS/INF

Indicateurs	IL (%)		IS (%)	
	INF3 ≠ ?	INF3 = ?	INF3 ≠ ?	INF3 = ?
INF4	87.8	100	25	66
INF2	87.8	100	34	66
INF3	100		100	
INF1 – BV1		93.75		50
V– ES	92.5	96	66	66
DEV4	100	100	75	66
INF1 – BV2	100	100	100	100

Ce tableau montre que l'indicateur INF1-BV2 est le plus limitant et sélectif vis-à-vis du critère R/POL2/DEV-TS/INF pour les deux cas (INF3 connu ou INF3 inconnu). Par contre l'indicateur INF1- BV1 est le moins limitant et sélectif pour le cas où INF3 est inconnu et c'est l'indicateur INF4 pour le cas où INF3 est connu. Ces deux indices permettent de comparer l'efficacité relative d'un indicateur par rapport à un autre au sein du même critère. On vérifie ainsi si la formulation du critère est en accord avec les intentions des experts.

Concernant ce critère R/POL2/DEV-TS/INF, il est normal que INF1-BV2 (infiltrations d'eau parasite à l'échelle d'un bassin versant) ait une forte influence car sans infiltration constatée, il est inutile de faire un diagnostic. De plus, dans les deux cas (INF3 connu ou INF3 inconnu), il faut la conjonction de l'impact POL et du dysfonctionnement INF (aux deux échelles : tronçon et bassin versant) pour justifier la réhabilitation du tronçon. Ainsi, si on observe des eaux parasites d'infiltration à l'échelle du tronçon, cette information (INF3) est à privilégiée car c'est l'information la plus fiable. Il est donc normal que INF3 ait une forte influence. Si on n'observe pas d'infiltration à l'échelle du tronçon, cette information n'est pas fiable car cela ne signifie pas qu'il n'y a jamais d'infiltration ; en effet l'inspection visuelle peut être réalisée dans une période non propice aux infiltrations (nappe basse par exemple). On devra donc considérer un risque d'infiltration (INF6) basé sur l'observation des défauts d'étanchéité (INF4) et sur le niveau de la nappe (INF2). Dans ce cas, l'observation de l'infiltration à une échelle plus large que le tronçon (INF1-BV1) vient en complément d'information car il est difficile de déterminer la contribution du tronçon étudié à l'infiltration observée.

3.3.3 Importance relative d'un indicateur au sein d'un critère

L'importance relative des indicateurs, lorsque l'on considère l'évaluation d'un critère précis, dépend :

- du nombre de passages nécessaires, c'est-à-dire du nombre d'opérateurs (tables de décision) séparant l'indicateur du critère ;
- de la nature de chaque opérateur, c'est-à-dire est-ce que l'opérateur synthétisant le tableau se rapproche d'un minimum, d'une moyenne ou d'un maximum ?
- et également pour chaque opérateur, de l'influence relative d'un indicateur par rapport à l'autre.

Ces trois paramètres sont pris en compte dans la suite de ce paragraphe et nous présentons la méthode d'évaluation de l'importance relative d'un indicateur.

3.3.3.1 Nature de l'opérateur (caractère limitant d'un opérateur)

Les tables de décision permettent d'agréger 2 indicateurs en 1 indicateur composite en fonction de règles définies. Ces tables de décision sont spécifiques et peuvent être de différentes natures :

- **conjonction (*minimum*, opérateur logique *et*)** : les deux informations I1 et I2 correspondent à deux causes requises pour déduire une conséquence D, ou plus généralement à deux observations requises pour conduire à la décision D ; la conjonction de 2 « gravités » est strictement nécessaire pour établir la gravité de l'indicateur composite ;

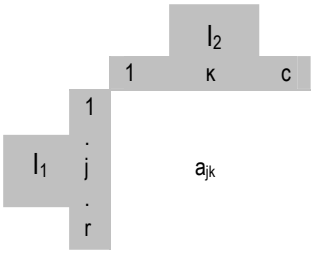
- **disjonction (*maximum*, opérateur logique *ou*) :** l'une des deux informations (I1 ou I2) suffit pour conduire à la décision D ;

- **compensation (*moyenne pondérée*) :** l'utilisation de deux informations complémentaires correspond à un raisonnement de compensation ; l'évaluation fournie par une source est

modulée par l'évaluation fournie par une seconde source ; par exemple un dysfonctionnement jugé « important » (I1) associé à une vulnérabilité jugée « faible » (I2) conduira à un « impact modéré » (et donc à un niveau de priorité « moyen » pour la réhabilitation) ; l'utilisation éventuelle d'une pondération permet de privilégier une source par rapport à une autre.

L'évaluation de la nature N d'un opérateur (tableau 26) est présentée ci-dessous :

Tableau 26 : table de décision permettant d'agréger deux indicateurs I1 et I2 : I1 à r modalités et I2 à c modalités

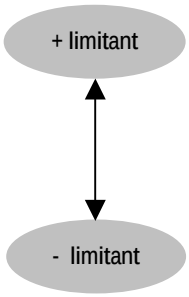


Le tableau (ou opérateur) précédent comprend r lignes et c colonnes (si le tableau permet la fusion de 2 indicateurs à 4 modalités alors c = r = 4 et si l'un des deux indicateurs possède 3 modalités, alors c=4 et r=3 ou inversement). La nature de l'opérateur i est estimée par la formule suivante :

$$N_i = \frac{A_i}{c \times r} = \frac{\sum_{k=1}^{c} \sum_{j=1}^{r} a_{jk}}{c \times r} \quad \text{Avec c et r} \in \{3 ; 4\} \qquad [17]$$

Cet indice mesure le caractère limitant d'un opérateur : l'opérateur qui se rapproche d'un minimum est le plus limitant car il réduit au maximum le nombre de tronçons classés prioritaires à la réhabilitation. Par contre, l'opérateur qui se rapproche d'un maximum est le moins limitant. Le tableau 27 ci-dessous donne la traduction de la nature de l'opérateur en fonction de la valeur de N_i (*min, max, moyenne*).

Tableau 27 : valeurs de N_i pour un opérateur en fonction de sa nature et de la taille de la table de décision



Nature d'opérateur	N_i	
	4×4	3×4
min	[1.875-2.125[	[1.67-1.90[
moyenne – min	[2.125-2.375[	[1.90-2.13[
moyenne	[2.375-2.625[	[2.13-2.36[
moyenne – max	[2.625-2.875[	[2.36-2.60[
max	[2.875-3.125]	[2.60-2.85]

Les tableaux suivants présentent des exemples d'évaluation de la nature de 2 opérateurs du critère R/POL2/DEV-TS/INF :

Tableau 28 : exemples de table de décision issue du critère R/POL2/DEV-TS/INF

a) cas INF2 ⊗ INF4

INF2 \ INF4	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	3	4
3	1	3	4	4

N = 26/12 = 2.16 (opérateur moyenne)

b) cas POL3 ⊗ INF8

POL3 \ INF8	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	2	3	3
4	1	2	3	4

N = 30/16 = 1.875 (opérateur min)

Le tableau suivant présente la nature de chaque opérateur du critère R/POL2/DEV-TS/INF :

Tableau 29 : Ni associés à chaque indicateur du critère R/POL2/DEV-TS/INF

Opérateurs	N_i
INF4 ⊗ INF2	2.16
INF6 ⊗ INF3	2.75
INF6 ⊗ INF1 – BV1	2.125
V ⊗ DEV4	2.4
POL3 ⊗ INF8	1.875
(POL3 ⊗ INF8) ⊗ INF1 – BV2	1.875

Le tableau précédant montre que l'opérateur (POL3 ⊗ INF8) ⊗ INF1-BV2 se rapproche d'un minimum et il est donc le plus limitant. Par contre, l'opérateur INF6 ⊗ INF3 se rapproche d'un maximum et il est donc le moins limitant. On discutera ces résultats à la fin de cette section.

3.3.3.2 Influence relative d'un indicateur au sein d'un opérateur

Pour chaque opérateur, le mode de calcul de l'influence relative d'un indicateur, IR, est présenté ci-dessous (cf. équation 18) :

L'influence relative de l'indicateur 1 par rapport à l'indicateur 2 est calculée par la formule suivante :

$$IR\ (\text{indicateur.1/indicateur.2}) = \frac{\sum_{k=1}^{c}\left(a_{rk} - a_{1k}\right)}{\sum_{j=1}^{r}\left(a_{jc} - a_{j1}\right) + \sum_{k=1}^{c}\left(a_{rk} - a_{1k}\right)} \quad a_{jk} \text{ est expliqué sur tableau 26} \qquad [18]$$

$$IR\ (\text{indicateur.2/indicateur.1}) = 1 - IR\ (\text{indicateur.1/indicateur.2}) \qquad [19]$$

La valeur de IR permet de qualifier l'influence relative de l'indicateur à partir du tableau suivant :

Tableau 30 : influence relative d'un indicateur sur l'autre au sein d'un opérateur

Influence relative	IR (%)
forte	[81 – 100]
moyenne – forte	[61 – 80]
moyenne	[41 – 60]
moyenne – faible	[21 – 40]
faible	[0 – 20]

Les tableaux 31a et 31b ci-dessous présentent des exemples d'évaluation de l'influence relative IR de 4 indicateurs appartenant au critère R/POL2/DEV-TS/INF :

Tableau 31 : exemples d'évaluation de l'influence relative IR pour INF2, INF4, INF8, POL3

a) Cas INF2 ⊗ INF4

INF2 \ INF4	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	3	4
3	1	3	4	4

IR (INF2 / INF4) = 8/14 = 57 % (influence moyenne)
IR (INF4 / INF2) = 6/14 = 43 % (influence moyenne)

b) Cas POL3 ⊗ INF8

POL3 \ INF8	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	2	3	3
4	1	2	3	4

IR (POL3 / INF8) = 6/12 = 50 % (influence moyenne)
IR (INF8 / POL3) = 6/12 = 50 % (influence moyenne)

Le tableau suivant présente les valeurs de l'influence relative IR pour tous les opérateurs du critère R/POL2/DEV-TS/INF :

Tableau 32 : influences relatives IR associées à chaque indicateur du critère R

Indicateur	IR (%)	
	INF3 ≠ ?	INF3 = ?
INF4	43 (moy)	43 (moy)
INF2	57 (moy)	57(moy)
INF6	17 (faible)	77(moy-forte)
INF1 – BV1		23 (moy-faible)
INF3	83 (forte)	
V	38 (moy-faible)	38 (moy-faible)
DEV4	62 (moy-forte)	62 (moy-fort)
POL3	50 (moy)	50 (moy)
INF8	50 (moy)	50 (moy)
INF1 – BV2	50 (moy)	50 (moy)

Le tableau précédant nous permet de vérifier la cohérence du tableau 20 (INF6 ⊗ INF3 ⊗ INF1 – BV1) : si INF3 est connu, il est modulé par INF6 et si INF3 est inconnu, INF6 est modulé par INF1 – BV1.

3.3.3.3 Calcul de l'importance relative d'un indicateur au sein d'un critère

L'indice IC permet de quantifier l'importance relative d'un indicateur au sein d'un critère. Cet indice dépend de la nature des opérateurs et de l'influence relative d'un indicateur dans chaque opérateur. Ainsi, nous proposons de calculer l'indice IC à partir de la formule ci-dessous.

$$IC\ (\text{indicateur } l) = \left[\left[\left[\left(N_1 * IR'_1 + N_2\right) * IR'_2 + \ldots + N_i\right] * IR'_i + \ldots\right] * IR'_{n-1} + N_n\right] * IR'_n \qquad [20]$$

Avec :

Ni : nature de l'opérateur i et n : nombre de passages ;

IR'i : influence relative de l'indicateur étudié dans le tableau i

$$IR'_i(\text{indicateur.l/indicateur.}\bar{l}) = 1 - IR_i(\text{indicateur.l/indicateur.}\bar{l})$$

L'indicateur est jugé d'autant plus important que IC est faible. On constate que l'importance relative d'un indicateur augmente lorsque le nombre de passages diminue. On constate également que IC augmente quand N_i augmente, ou quand IR' augmente.

Nous présentons une illustration de l'évaluation de l'importance relative des indicateurs pour le critère R/POL2/DEV-TS/INF (tableau 33). Il est tout d'abord nécessaire d'indiquer la nature des différents opérateurs évalués, ainsi que l'influence relative de chaque indicateur (tableau 33).

Tableau 33 : bilan quantitatif et qualitatif pour définir l'importance relative des indicateurs

a) cas INF3 connu

<table>
<tr><th rowspan="2">Indicateur</th><th colspan="4">N & IR</th></tr>
<tr><th>Opérateur (1)</th><th>Opérateur (2)</th><th>opérateur (3)</th><th>opérateur (4)</th></tr>
<tr><td>INF4</td><td rowspan="2">N = 2.16 (moy)
IR = 43 % (moy)
IR = 57 % (moy)</td><td rowspan="2">N = 2.75 (moy – max)
IR = 17 % (faible)
IR = 83 % (forte)</td><td rowspan="3">N = 1.875 (min)
IR = 50 % (moy)</td><td rowspan="3">N = 1.875 (min)
IR = 50 % (moy)</td></tr>
<tr><td>INF2</td></tr>
<tr><td>INF3</td><td rowspan="3">N = 2.4 (moy)
IR = 38 % (moy – faible)
IR = 62 %(moy – forte)</td></tr>
<tr><td>V</td><td rowspan="2">IR = 50 % (moy)</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>DEV4</td></tr>
<tr><td>INF1 – BV2</td><td colspan="3"></td><td>IR = 50 % (moy)</td></tr>
</table>

b) cas INF3 inconnu

<table>
<tr><th rowspan="2">Indicateur</th><th colspan="4">N & IR</th></tr>
<tr><th>Opérateur (1)</th><th>Opérateur (2)</th><th>opérateur (3)</th><th>opérateur (4)</th></tr>
<tr><td>INF4</td><td rowspan="2">N = 2.16 (moy)
IR = 43 % (moy)
IR = 57 % (moy)</td><td rowspan="2">N = 2.125 (moy – min)
IR = 77 % (moy – forte)
IR = 23 % (moy – faible)</td><td rowspan="3">N = 1.875 (min)
IR = 50 % (moy)</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>INF2</td></tr>
<tr><td>INF1 – BV1</td><td rowspan="3">N = 2.4 (moy)
IR = 38 % (moy – faible)
IR = 62 % (moy – forte)</td></tr>
<tr><td>V</td><td rowspan="2">IR = 50 % (moy)</td><td rowspan="2">N = 1.875 (min)
IR = 50 % (moy)</td></tr>
<tr><td>DEV4</td></tr>
<tr><td>INF1 – BV2</td><td colspan="3"></td><td>IR = 50 % (moy)</td></tr>
</table>

Le tableau précédent montre la détermination de l'importance relative des indicateurs lorsque l'on considère l'évaluation d'un critère précis (ici le critère R/POL2/DEV-TS/INF est étudié). La nature de chaque opérateur au sein d'un critère est calculée et l'influence relative de chaque indicateur est précisée.

Par exemple, l'importance relative IC de l'indicateur INF4 vis-à-vis du critère R/POL2/DEV-TS/INF est obtenue en utilisant l'équation suivante (cas INF3 connu) :

$$IC(INF4) = ((((2{,}16 * 0{,}57 + 2{,}75) * 0{,}83) + 1{,}875) * 0{,}5 + 1{,}875) * 0{,}5 = 2{,}3$$

Une fois calculé l'ensemble des indices IC (pour chaque indicateur) d'un critère, il est possible de juger de l'importance d'un indicateur au sein du critère. Le tableau 34 résume des valeurs de IC pour le critère R/POL2/DEV-TS/INF

Tableau 34 : importance relative de chaque indicateur pour le calcul d'un critère

Indicateur	IC	
	INF3 ≠ ?	INF3 = ?
INF4	2.3	1.6
INF2	2.1	1.55
INF1 – BV1		1.85
V	1.8	1.8
INF3	1.5	
DEV4	1.65	1.65
INF1 – BV2	0.95	0.95

Ce tableau conduit à des conclusions en accord avec celles obtenues à la section 3.3.2 (page 72) :

- INF1-BV2 (infiltrations d'eau parasite à l'échelle d'un bassin versant) a une forte importance ;
- quand INF3 est connu, INF3 est privilégié par rapport à INF4 et INF2 ;
- quand INF3 est inconnu, INF1-BV1, INF2 et INF4 sont d'importances équivalentes.

Le calcul de l'indice IC pour chaque indicateur d'un critère, permet de répondre à trois objectifs :

Tout d'abord, une analyse exhaustive de l'ensemble des formulations des critères permet de mettre en évidence les cas pour lesquels il est nécessaire de vérifier si la formulation (et plus spécifiquement l'importance accordée à chaque indicateur) est en accord avec les intentions des experts : par exemple "pour le critère R/POL2/DEV-TS/INF, est-il est normal que INF1-BV2 ai une forte influence alors que V a une influence moyenne et INF4 une influence faible ?". Les critères ayant des problèmes potentiels sont : R/NUH1/DEB-TP/HYD, R/POL7/DEB-TP/HYD, R/PON2/DEB-TP/HYD, R/DOB2/EXF, R/POL3/DEV-TP/HYD, R/POL6/DEV-ENS (cf. rapport T4-1 INDIGAU). Pour ces critères, c'est l'importance relative de la vulnérabilité qui est en cause.

Ensuite, on constate que les résultats des calculs de l'indice IC sont en cohérence avec les indices IL et IS, et avec la distribution du critère. En effet, ces différentes procédures conduisent quasi systématiquement à un classement identique des indicateurs par ordre d'importance. La comparaison des indices est réalisée en fin de chapitre.

Enfin, l'analyse des différents critères permet de mettre en évidence le rôle prépondérant des opérateurs de nature *Min*.

3.3.4 Indice d'anomalie potentielle (IAP)

Le dernier test réalisé concerne l'influence de la variation d'une modalité de chaque indicateur sur le résultat final (le critère). Pour cela, nous avons fait une étude de sensibilité en utilisant l'indice ci-dessous :

$$\Pr\left(\Delta I = 1 \ \text{ et } \ \Delta R = x\right) = \frac{\text{Nb}\left(\Delta I = 1 \ \text{ et } \ \Delta R = x\right)}{\text{Nb}\left(\Delta I = 1\right)} \text{ avec } \ x = 0,\ 1,\ 2,\ 3 \qquad [21]$$

Le tableau 35 ci-dessous présente les résultats de l'étude de sensibilité du critère R/POL2/DEV-TS/INF.

Tableau 35 : étude de la sensibilité du critère R/POL2/DEV-TS/INF vis – à – vis de chaque indicateur (nombre de cas et proportion)

a) cas INF3 connu

Indicateur	ΔI = 1 et ΔR = 0	ΔI = 1 et ΔR = 1	ΔI = 1 et ΔR = 2	ΔI = 1 et ΔR = 3	Total
INF4	6623 (96 %)	288 (4 %)	0	0	6911
INF2	5711 (93 %)	432 (7 %)	0	0	6143
V	5091 (83 %)	1052 (17 %)	0	0	6143
DEV4	4875 (70.5 %)	1804 (26 %)	232 (3.5 %)	0	6911
INF3	5520 (80 %)	1391 (20 %)	0	0	6911
INF1 – BV2	4760 (68.5 %)	2151 (31.5 %)	0	0	6911

b) cas INF3 inconnu

Indicateur	ΔI = 1 et ΔR = 0	ΔI = 1 et ΔR = 1	ΔI = 1 et ΔR = 2	ΔI = 1 et ΔR = 3	Total
INF1 – BV1	6683 (96 %)	228 (4 %)	0	0	6911
V	5575 (90 %)	568 (10 %)	0	0	6143
DEV4	5815 (84 %)	968 (14 %)	128 (2 %)	0	6911
INF4	5807 (84 %)	1008 (14.5 %)	96 (1.5 %)	0	6911
INF2	4775 (78 %)	1080 (17.5 %)	264 (4 %)	24 (0.5 %)	6143
INF1 – BV2	5752 (83 %)	1159 (17 %)	0	0	6911

Cette étude de sensibilité nous permet de calculer l'indice d'anomalie potentielle (IAP). Cet indice permet de déceler les cas où une variation d'une modalité d'un indicateur entraîne une variation importante (de plus d'une modalité) sur le résultat final du critère. Il est donné par la formule suivante :

$$IAP = \Pr\left(\Delta I = 1 \text{ et } \Delta R > 1\right) \qquad [22]$$

L'indice d'anomalie est exprimé en nombre ou bien en proportion (en divisant par le nombre total de cas) Les cas où une variation d'une modalité de l'indicateur entraîne une variation de 2 modalités ou plus du critère sont précisés en annexe lors de l'étude de chaque critère (cf. annexe 3 & rapport T4-1 INDIGAU).

Le tableau 36 ci-dessous présente les résultats de l'étude d'anomalies potentielles du critère R/POL2/DEV-TS/INF.

Tableau 36 : indice d'anomalie potentielle associée à chaque indicateur du critère R/POL2/DEV-TS/INF (chiffre en gras si ΔI = 1 → ΔR > 2)

Indicateur	IAP %	
	INF3 ≠ ?	INF3 = ?
INF4	0	1.5
INF2	0	4.5
INF3	0	
INF1 – BV1		0
V	0	0
DEV4	3.5	2
INF1 – BV2	0	0

Une valeur non nulle de l'indice d'anomalie potentielle IAP conduit à analyser en détail la formulation du critère. Cet indice permet de mettre en évidence les indicateurs sources d'anomalies potentielles et donc ensuite d'identifier les opérateurs à l'origine du problème potentiel. Par exemple pour le critère R/POL2/DEV-TS/INF, l'indicateur DEV4 a un indice IAP égale à 3.5 à cause du tableau V ⊗ DEV4 : lorsque V = 3 et lorsque DEV4 passe de 1 à 2, V ⊗ DEV4 passe de 1 à 3 (cf. figure 30 page 68).

La synthèse ci-dessous recense l'ensemble des indicateurs pour lesquels l'indice d'anomalie potentielle (IAP) n'est pas nul, c'est-à-dire l'ensemble des indicateurs dont la variation d'un état peut conduire à faire varier le critère de plus d'un état. Ces indicateurs sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 37 : indicateurs ayant un indice IAP non nul et critère(s) associé(s) (les critères pour lesquels certains $\Delta I = 1 \rightarrow \Delta R > 2$ sont en gras)

Indicateur	Critère(s) associé(s)
ABR4	R/CDV4/ABR
ATC7	R/CDV2/ATC
BOU3	R/CXR2/BOU, R/TRA3/BOU
BOU4	R/POL9/DEB/BOU, R/PON4/DEB/BOU, R/NUH2/DEB/BOU, R/NUH4/DEB/BOU, R/POL9/DEB/BOU, R/PON4/DEB/BOU,
DEB4	R/POL9/DEB/BOU, R/PON4/DEB/BOU, R/NUH2/DEB/BOU
DEB5	R/NUH1/DEB-TP/HYD, R/NUH3/DEB/ENS, R/NUH2/DEB/BOU, R/POL7/DEB-TP/HYD, R/PON2/DEB-TP/HYD
DEV4	R/POL2/DEV-TS/INF
DEV5	R/POL3/DEV-TP/HYD, R/POL6/DEV-ENS
DOB1	R/PON2/EXF
DSC1	R/CDV1/DSC
EFF3	R/DOB1/EFF, R/TRA1/EFF
ENS1	R/CXR1/ENS
ENS3	R/POL6/DEV-ENS, R/POL8/DEB/ENS, R/PON3/DEB/ENS, R/NUH3/DEB/ENS,
ENS4	R/POL8/DEB/ENS, R/PON3/DEB/ENS, R/NUH3/DEB/ENS
EXF1	R/PON1/EXF, R/PON2/EXF
EXF2	R/PON1/EXF, R/PON2/EXF
EXF3	R/PON1/EXF, R/PON2/EXF
EXF4	R/PON1/EXF, R/PON2/EXF
EXF6	R/PON2/EXF
HYD1	R/CDV1/DSC
HYD3	R/NUH5/DEB-TP/HYD, R/POL3/DEV-TP/HYD, R/NUH1/DEB-TP/HYD, R/POL7/DEB-TP/HYD, R/PON2/DEB-TP/HYD
INF2	R/POL2/DEV-TS/INF
INF4	R/POL2/DEV-TS/INF
INF8	R/CDV1/DSC
RAC4	R/CDV3/RAC
V-CDV	R/CDV1/DSC

La majorité des anomalies potentielles a été justifiée, cependant la formulation de certains critères a été modifiée en partie à cause d'anomalies avérées : R/POL6/DEV-ENS, R/POL8/DEB/ENS, R/PON3/DEB/ENS, R/NUH3/DEB/ENS, R/POL9/DEB/BOU, R/PON4/DEB/BOU, R/NUH2/DEB/BOU, R/POL4/DEV/BOU, R/POL5/DEV/ENS. L'étude détaillée des 31 critères est disponible dans le rapport intermédiaire T4.1 du projet INDIGAU (www.indigau.com).

3.4 Bilan de l'analyse de la formulation des critères

L'étude des différents indices (IL, IS, IAP, IC) associés aux indicateurs constituant un critère peut être résumé dans un tableau tel que présenté ci-dessous (tableau 38). Ce type de tableau permet de vérifier si la formulation du critère est en accord avec les intentions des experts à partir du classement des indicateurs en fonction de leur niveau d'influence, de la détection d'anomalies potentielles de formulation et de la caractérisation de la distribution du critère. Par exemple, le tableau de synthèse suivant concerne le critère R/POL2/DEV-TS/INF, il présente le niveau d'influence de chaque indicateur.

Tableau 38 : bilan pour étudier le niveau d'influence de chaque indicateur sur le calcul du critère R/POL2/DEV-TS/INF

a) cas INF3 connu

Indicateur	IL (%)	IS (%)	IC	Niveau d'influence	IAP (%)
INF4	87.8	25	2.3	faible	0
INF2	87.8	34	2.1	faible	0
V	92.5	66	1.8	moyenne – faible	0
DEV4	100	75	1.65	moyenne	3.5
INF3	100	100	1.5	moyenne - forte	0
INF1 – BV2	100	100	0.95	forte	0

b) cas INF3 inconnu

Indicateur	IL (%)	IS (%)	IC	Niveau d'influence	IAP (%)
INF1 – BV1	93.75	50	1.85	faible	0
V	96	66	1.8	faible	0
DEV4	100	66	1.65	moyenne	2
INF4	100	66	1.6	moyenne	1.5
INF2	100	66	1.55	moyenne	**4.5**
INF1 – BV2	100	100	0.95	forte	0

Cette synthèse permet de mettre en évidence :

- lorsque INF3 est connu, l'influence prédominante des indicateurs INF1-BV2 et INF3 et l'influence minime des indicateurs INF4 et INF2 ;
- lorsque INF3 est inconnu, l'influence prédominante des indicateurs INF1-BV2 et l'influence minime des indicateurs INF1-BV1 et V ;
- des anomalies potentielles concernant DEV4, INF2 et INF4 : certaines variations d'une modalité conduisent à des variations plus importantes du critère (les indices en gras correspondant à des variations de plus de deux modalités du critère).

Concernant le critère de réhabilitation R/POL2/DEV-TS/INF (réhabilitation pour infiltrations contribuant à des déversements de temps sec polluant les eaux de surface) les experts, après analyse de cette synthèse associés à la formulation du critère, ont conclu que l'influence prédominante et minime des indicateurs et les anomalies potentielles détectées sont justifiées et en accord avec leurs intentions.

L'étude des 30 autres critères du guide RERAU ainsi que les conclusions associées pourront être obtenues dans le rapport (T4-1 INDIGAU). L'ensemble de ces conclusions a été discuté lors d'une réunion du projet INDIGAU réunissant différents experts (gestionnaires et chercheurs). Cette réunion a mis en évidence des critères acceptables (pas de modifications nécessaires) et non acceptables (l'analyse a conduit les experts à proposer des modifications/améliorations de certains indicateurs). En résumé, nous avons synthétisé dans le tableau suivant les problèmes non acceptables qui ont abouti à des propositions :

Tableau 39 : synthèse des problèmes identifiés

N°	Problèmes identifiés	Critère(s) concerné(s)
1	certains indicateurs sont à revoir: Rôle de ENS4 à revoir	R/CXR1/ENS
2	les critères dont les distributions sont à revoir	R/NUH4/DEB/BOU, R/NUH5/DEB-TP/HYD, R/CDV1/DSC, R/POL1/STEP/INF.
3	les critères qui ont des anomalies avérées ($\Delta I = 1 \rightarrow \Delta R >= 2$) :	R/POL9/DEB/BOU, R/PON4/DEB/BOU, R/NUH2/DEB/BOU, R/POL8/DEB/ENS, R/PON3/DEB/ENS, R/NUH3/DEB/ENS, R/POL2/DEV-TS/INF

3.5 Conclusion et discussion

Lors de l'étude des 31 critères de RERAU, nous avons constaté que les indicateurs sont systématiquement classés dans le même ordre selon les indices IL, IS et IC. Ces indices sont cohérents. On constate également :

- l'indice IC est plus précis que IL et IS ;
- l'indice IC est plus explicatif que IL et IS : il repose sur l'utilisation de deux paramètres (N, IR) relatifs aux n opérations successives ;
- l'indice IC peut être calculé rapidement et facilement à la main, et sans programme informatique ; au contraire les calculs de IL et IS sont compliqués surtout si le critère comprend plus de 4 indicateurs simples.

Nous pouvons donc conclure que seul IC est nécessaire pour caractériser le niveau d'influence des indicateurs au sein d'un critère. C'est cet indice, associé à IAP et à la distribution du critère, qui sera nécessaire lors d'une prochaine étude.

Nous avons vérifié les formulations des 31 critères RERAU et décrit quelques faiblesses et forces. Le fait de consolider la pertinence des 31 critères est très utile. En outre, du point de vue mathématique, le besoin de prendre les imprécisions en considération est également important. Pour cela, nous allons continuer dans le chapitre suivant nos objectifs qui sont étroitement liés aux limites de l'outil RERAU. Ces limites concernent les imprécisions des données utilisées et des connaissances (les tableaux) dans le modèle RERAU.

4 Chapitre 4. Modèles de fusion des indicateurs RERAU 84

4.1 Introduction 84

4.2 Etude des règles de fusion issues du PN RERAU 86

4.3 Problématiques associées au modèle RERAU 87

4.3.1 Problèmes sur les indicateurs de base 87

4.3.2 Problèmes sur la fusion des indicateurs 88

4.4 Cadres théoriques possibles 89

4.4.1 Fusion probabiliste – les réseaux bayésiens 90

4.4.2 Fusion à l'aide des fonctions de croyance 92

4.4.3 Fusion floue 94

4.4.4 Fusion possibiliste 95

4.4.5 Cadre retenu 96

4.5 Modèle de fusion floue proposé 97

4.5.1 Indicateurs de performance flous 98

4.5.2 Fusion floue (combinaison d'indicateurs flous) 98

4.5.3 Implémentation de la fusion floue 101

4.5.4 Illustration sur le cas d'un critère flou 105

4.6 Conclusion et discussion 107

4 Chapitre 4. Modèles de fusion des indicateurs RERAU

4.1 Introduction

La méthodologie RERAU d'aide à la gestion des collecteurs vise à définir des priorités en réhabilitation vis-à-vis de différents types d'impact. Elle est fondée sur un ensemble d'indicateurs : indicateurs d'état, indicateurs de dysfonctionnement, indicateurs de vulnérabilité, indicateurs d'impact (Le Gauffre *et al.*, 2004). L'évaluation d'un critère de réhabilitation résulte de la fusion d'indicateurs de performance eux-mêmes évalués à partir d'observations, de mesures en réseau, d'appréciations qualitatives, de modèles quantitatifs. L'échelle de base de définition des indicateurs est le tronçon, mais des données plus globales, à l'échelle du bassin versant sont également utilisées. Les grandes lignes du guide méthodologique RERAU peuvent être résumées de la manière suivante :

- chaque indicateur prend une valeur parmi 4 valeurs possibles : $\{G1, G2, G3, G4\}$, (pour certains indicateurs ne sont définies que 2 ou 3 valeurs possibles) ;
- les indicateurs sont généralement combinés deux à deux ; les règles de fusion sont ainsi exprimées par des tableaux 4 X 4 ;
- l'évaluation de chaque indicateur composite (issu d'une fusion de 2 indicateurs) correspond à un raisonnement en relatif : chaque tableau comprend au moins un « G1 » et un « G4 » ;
- finalement, chacun des 31 critères de réhabilitation prend une valeur $\{G1, G2, G3, G4\}$; chaque critère de réhabilitation est la mesure d'un impact induit par l'état de santé du tronçon considéré et les 4 modalités ont pour signification : G1 – pas ou peu d'impact, G2 – impact modéré, G3 – impact important mais tolérable, G4 – impact sévère, non tolérable.

La construction d'indicateurs implique l'utilisation de données et de connaissances. Une donnée est une information présentée sous forme conventionnelle. Les connaissances sont les règles utilisant les données pour en déduire d'autres. La qualité des données (la précision, l'exactitude…) est aussi importante que la quantité.

Il est important de faire la distinction entre l'imprécision, l'incomplétude et l'incertitude des données à combiner. Cependant, comme l'a montré E. Benetto (2002), les auteurs s'accordent difficilement quant à la terminologie. En particulier « il n'y a pas de consensus parmi les spécialistes concernant la définition de **"incertitude"** ». Nous avons retenu les définitions ci-dessous, elles s'appuient sur la littérature :

- **l'incertitude** « résulte essentiellement d'une épreuve dont le résultat n'est pas connu a priori et pourrait changer si on la recommençait » (Boissier & Al-Hajjar, 1993). Elle représente un doute sur la validité d'une connaissance (Curt & Boissier, 2008). D'après (Dubois & Prade, 1985a), « les

incertitudes portent sur la vérité et la fausseté d'une proposition qui n'est pas définitivement établie, eu égard à sa conformité par rapport à l'information disponible sur la réalité » ;

- **l'imprécision** concerne des informations mal définies, on lui associe les qualitatifs du type « environ », « à peu près », « dans l'intervalle », « compris entre », « approximativement » (Curt & Boissier, 2008). Elle représente la qualité de la connaissance que nous avons d'un phénomène (Boissier & Al-Hajjar, 1993). Elle correspond à une difficulté dans l'énoncé de la connaissance (Bouchon-Meunier, 1995) ;
- **l'incomplétude** est l'absence de connaissance ou des connaissances partielles c'est-à-dire l'impossibilité d'obtenir certains renseignements (problèmes lors de la captation de connaissances, existence de connaissances générales sur l'état d'un système mais avec des exceptions que l'on ne peut énumérer ou prévoir, existence d'une connaissance implicite, non formulée, que l'on recherche auprès d'experts) (Curt & Boissier, 2008 ; Bouchon-Meunier, 1995).

Des données supplémentaires peuvent être disponibles ; ce sont par exemple des données sur les sources, sur leur dépendance, leur fiabilité, des préférences sur les données à combiner, etc.

L'utilisation des données peut conduire à des cas négatifs :

- **l'ambiguïté** exprime le fait qu'une donnée peut conduire à deux interprétations ;
- **le conflit** caractérise deux ou plusieurs données conduisant à des interprétations contradictoires et donc incompatibles.

Cela peut également conduire à des cas positifs :

- **la redondance** est la « qualité de sources qui apportent plusieurs fois la même donnée ; idéalement, la redondance peut être exploitée pour lutter contre et réduire les imprécisions et les incertitudes » (Bloch, 2005) ;

- **la complémentarité** est la « propriété de sources qui apportent des données sur des grandeurs différentes ; elle est directement exploitée dans le processus de fusion pour générer une donnée globale plus complète et pour lever des ambiguïtés » (Bloch, 2005) ; par exemple, la fusion d'une mesure de dysfonctionnement avec une mesure de vulnérabilité produit la mesure d'un impact, de signification plus élevée que les deux mesures partielles.

Les indicateurs de performance et les critères doivent inclure un mécanisme homogène d'évaluation en prenant en compte des aspects éventuels de nuance, d'imprécision et de subjectivité. Pour cela, dans un premier temps nous étudions les règles de fusion issues du PN RERAU. Puis nous énonçons des questions induites par la qualité des indicateurs de performance (données) et des connaissances utilisées pour la fusion des indicateurs RERAU. Ensuite il conviendra de décrire tous les outils et les méthodes disponibles pour traiter les imprécisions rencontrées. Nous proposons enfin la mise au point d'un modèle permettant de représenter et de gérer les imprécisions.

4.2 Etude des règles de fusion issues du PN RERAU

L'utilisation des règles de fusion issues du PN RERAU produit une évaluation d'une situation (par exemple énoncer un niveau de priorité pour une intervention de réhabilitation). C'est un processus de fusion qui mobilise plusieurs types de raisonnements liés aux types de complémentarités des données à fusionner. La prise en compte des imperfections nécessite une meilleure connaissance des tableaux de fusion entre les indicateurs. C'est pourquoi, à partir d'un examen critique des tableaux du Guide Méthodologique RERAU, nous proposons une typologie des raisonnements en œuvre en précisant les intentions des « experts ». L'annexe 4 détaille l'examen de la formulations des 31 critères de réhabilitation en distinguant les différents raisonnements employés. Le tableau ci-dessous précise les notations adoptées, ainsi que le nombre de tableaux correspondant à chaque type d'opérateur.

Tableau 40 : notations utilisées pour classer les opérateurs de fusion des indicateurs

Symbole	« m »	« M »	« w »	« S »	« X »
Raisonnement	Conjonction (min)	Disjonction (Max)	Compensation pondérée	Confrontation de plusieurs sources	Synergie
Nombre de tableaux	21	6	32	9	3

Les différents raisonnements employés sont les suivants :

Conjonction : les deux indicateurs I1 et I2 correspondent à deux observations requises pour conduire à la décision D ;

Disjonction : les sources mesurent deux phénomènes distincts, chacun pouvant aboutir à un état qui appelle la décision D ; dans ce cas la présence d'un seul phénomène suffit à conclure ;

Compensation : l'évaluation fournie par une source est modulée par l'évaluation fournie par une seconde source ; par exemple un dysfonctionnement jugé « important » (indicateur I1) associé à une vulnérabilité jugée « faible » (indicateur I2) conduira à conclure à un « impact modéré » (et donc à un niveau de priorité « moyen » pour la réhabilitation) ; l'utilisation éventuelle d'une pondération permet de privilégier une source par rapport à une autre, cette préférence pouvant être fixée a priori ou encore a posteriori – c'est-à-dire en fonction des valeurs respectives des données I1 et I2 fournies par les sources – comme le permettent les opérateurs d'agrégation numérique de type OWA – ordered weighted averaging (Grabisch *et al.*, 1998) ;

Confrontation de plusieurs sources qui peut aboutir à une confirmation ou à une contradiction :

- ***conflit / contradiction*** : par exemple, « détection » par une source versus « non détection » par la seconde, entraînant une augmentation du niveau d'incertitude, ou encore, « bleu » pour l'une et « vert » pour l'autre, entraînant une augmentation du niveau d'imprécision (dans les deux cas la contradiction devrait se traduire par un étalement de la distribution, avec un indicateur privilégié par rapport au second si sa fiabilité est censée être supérieure).

- ***confirmation :*** les deux sources confortent une conclusion commune ; il y a alors réduction de l'incertitude et de l'imprécision ;

Un autre type de situation est celui où deux sources sont deux moyens alternatifs utilisés par exemple pour détecter ou mesurer une même anomalie ; si l'on considère qu'une détection suffit pour établir la présence du problème alors nous nous plaçons bien dans un raisonnement disjonctif (pessimiste, pour notre exemple) ; l'éventuelle contradiction entre deux sources est résolue/tranchée par un opérateur Max.

Synergie : ce raisonnement devra par exemple être utilisé pour représenter des interactions positives entre plusieurs mécanismes de dégradation des conduites enterrées (dégradation du contact sol-conduite et déformation de la conduite ⇆ infiltration d'eau et érosion du sol) ;

Nous visons à identifier puis à formaliser dans la suite un certain nombre de problèmes posés par les indicateurs de base et par leur fusion au sein de la méthodologie RERAU.

4.3 Problématiques associées au modèle RERAU

4.3.1 Problèmes sur les indicateurs de base

Les problèmes associés aux indicateurs issus du PN RERAU sont les suivants :

1. **pour certains indicateurs simples, retenir une valeur précise parmi** {G1, G2, G3, G4} **introduit plusieurs problèmes** :

    - pour les indicateurs de vulnérabilité de l'environnement du tronçon, le gestionnaire pourrait manifester une **hésitation** entre 2 modalités contiguës ;

    - la valeur d'un indicateur évalué à partir des résultats d'une inspection visuelle (par exemple l'indicateur INF4 – défaut d'étanchéité) découle de la comparaison d'une note *D* avec 3 valeurs seuils (par exemple, si D > S3 alors INF4 = G4) ; si *D* est très proche de l'une des valeurs seuils, on **hésite** entre 2 modalités (voir conclusion chapitre 2) ;

    - pour les indicateurs évalués à partir des résultats d'une inspection visuelle, les avis d'experts servant à déterminer les seuils sont considérés comme **subjectifs et non unanimes** (pour un tronçon et un indicateur donné, les avis experts ne correspondent pas à une seule valeur précise, voir chapitre 2, 5) **;**

    - les problématiques sont analogues pour les indicateurs (d'observation directe) évalués à partir de mesures en réseau ; par exemple pour l'indicateur EXF3 (taux d'exfiltration observé sur le tronçon), l'appréciation du niveau d'exfiltration peut être réalisée à partir de la comparaison d'un débit d'exfiltration mesuré à l'échelle du

tronçon et des seuils d'exfiltration posés. Si le débit d'exfiltration mesuré est très proche de l'une des valeurs seuils, on **hésite** entre 2 modalités. De plus les valeurs des seuils délimitant les niveaux d'exfiltration sur un tronçon sont posées par les experts. Il semble plus judicieux de considérer ces seuils comme des frontières **imprécises, subjectives et non unanimes ;**

- pour les indicateurs évalués à partir de modèles de vieillissement (par exemple l'indicateur EFF2 niveau d'endommagement estimé), l'évaluation de l'état d'un tronçon peut être réalisée à partir des fonctions de survie de la catégorie à laquelle appartient ce tronçon et de son âge ; si le comportement estimé est très proche de l'une des trois fonctions de survie limitant les quatre états considérés, on **hésite** entre 2 modalités.

2. **certains indicateurs vont être évalués avec une erreur (incertitude) importante, par exemple :**

   - la note D issue d'une inspection **est mesurée avec une incertitude** s'il s'avère que le relevé des désordres dépend fortement de l'opérateur (voir chapitre 5) ;
   - pour les indicateurs (d'observation directe) évalués à partir de mesures en réseau (par exemple l'indicateur EXF3 taux d'exfiltration observé sur le tronçon), le débit d'exfiltration à l'échelle du tronçon est mesuré **avec une incertitude ;**
   - pour les indicateurs évalués à partir des modèles de vieillissement (par exemple l'indicateur EFF2 niveau d'endommagement estimé), les trois fonctions de survie, limitant les quatre états considérés, sont calées avec une **incertitude** ;
   - pour les indicateurs évalués à partir de modèles de vieillissement (par exemple l'indicateur EFF2 niveau d'endommagement estimé), l'âge du tronçon peut être connu avec **une incertitude plus ou moins grande**.

4.3.2 Problèmes sur la fusion des indicateurs

Si l'on considère que les connaissances sont les règles ou les algorithmes permettant de fusionner des données, ces connaissances peuvent, a priori, présenter les diverses formes d'imperfection énoncées plus haut : **imprécision, incertitude, incomplétude.** Les problèmes posés par la fusion des indicateurs issus du PN RERAU sont les suivants :

1. **l'utilisation de 4 modalités de RERAU ne permet pas d'introduire des nuances et de retrouver l'hésitation entre deux modalités dans la fusion,** par exemple :

- pour les opérateurs de type compensatoire (moyenne pondérée), synergie et confrontation de 2 sources : les règles de fusion avec conclusion précise (ex G2 ⊗ G3 = G2 ou bien G2 ⊗ G3 = G3) **ne permettent pas d'introduire des nuances dans la fusion (G2 ⊗ G3 = "plutôt G2 et un peu G3" par exemple)** ;

- deux indicateurs à fusionner peuvent constituer deux mesures d'un même phénomène ou état selon 2 approches différentes ; les 2 résultats peuvent alors s'avérer contradictoires. L'approche retenue dans le cadre du PN RERAU est un mode d'arbitrage a priori (IP1 est préféré à IP2 si les 2 indicateurs sont disponibles). L'information sur le caractère contradictoire des indicateurs est donc perdue.

2. **une erreur d'une modalité sur l'évaluation d'un indicateur peut, dans certains cas, conduire à une erreur plus forte sur le critère (voir chapitre 3) ;**

3. pour un critère de réhabilitation donné, les tronçons affectés en niveau G4 le sont après plus ou moins d'hésitations sur les données et règles utilisées ; **on ne peut pas différencier ces tronçons et on ne retrouve pas cette « hésitation » dans l'évaluation du critère.**

Le modèle RERAU, tel qu'il existe actuellement, donne des réponses précises sans faire apparaître les imperfections des évaluations. Ce modèle ne traite pas explicitement de la qualité des données utilisées ni de la qualité des connaissances (les tableaux).

Nous rappelons dans la suite quelques éléments théoriques sur la fusion de données et différentes techniques de modélisation : approche probabiliste et réseaux bayésiens, fonctions de croyance, approche floue et possibiliste. Enfin, nous choisissons et testons un cadre théorique pour la fusion d'indicateurs pour la réhabilitation des conduites d'assainissement.

4.4 Cadres théoriques possibles

En réponse au fait que la plupart des paramètres que nous rencontrons dans le monde réel ne sont pas précisément définis, beaucoup de techniques pourraient être utilisées pour intégrer les imprécisions (Bouchon-Meunier, 1992). Chaque technique ou théorie mathématique est capable de considérer seulement certains types spécifiques d'imperfections. Nous exposons les diverses méthodes classiques pour représenter les incertitudes, imprécisions et incomplétude relatives aux données et connaissances. Il s'agit en particulier d'identifier les forces et les faiblesses de chaque théorie en regard des caractéristiques des données ou des connaissances à manipuler. Finalement, la technique retenue pour modéliser les imprécisions dans cette recherche sera présentée en détails.

4.4.1 Fusion probabiliste – les réseaux bayésiens

D'après Correc, (2005), la théorie des probabilités a pris son essor au XVII ème siècle dans l'étude des jeux de hasard pour le calcul des chances. Les probabilités sont beaucoup utilisées pour le raisonnement dans l'incertain. Les distributions de probabilité peuvent être estimées à partir d'observations statistiques (Hadj-ali, 1995).

Les variables d'un modèle sont considérées dans cette approche comme des variables aléatoires ayant des densités de probabilité. Cette densité reflète l'incertitude liée à l'estimation de ces paramètres (Kanso, 2004). L'approche bayésienne peut s'apparenter à une approche statistique (Procaccia & Suhner, 2003). L'avantage d'une telle approche est de pouvoir affiner un modèle initial en intégrant des données de retour d'expérience (Talon, 2006).

Le système expert SCRAPS (*Sewer Cataloging, Retrieval, and Prioritization System*) porte sur un objectif similaire au notre et repose sur la construction d'un réseau bayésien (Hahn *et al.*, 2002 ; Merril *et al.*, 2004). Nous résumons l'approche ci-dessous.

Soit 3 variables aléatoires : $X \in \{x_1, x_2, ..., x_i, ...\}$, $Y \in \{y_1, y_2, ..., y_j, ...\}$, $Z \in \{z_1, z_2, ..., z_k, ...\}$.

On considère le cas où l'on évalue Z à partir des évaluations de X et de Y (variables parentes).

On recherche les probabilités $P(z_k)$ que Z soit en état k.

On utilise :

- les probabilités conditionnelles $P(z_k / x_i, y_j)$, à estimer ou à énoncer (« tableaux experts ») ;
- les probabilités composées $P(z_k, x_i, y_j) = P(z_k / x_i, y_j) \times P(x_i, y_j)$ [23]
- l'hypothèse d'indépendance entre X *et* Y qui donne : $P(x_i, y_j) = P(x_i) \times P(y_j)$ [24]

Chaque situation (x_i, y_j) peut conduire à z_k. Si l'on fait l'hypothèse que les situations (x_i, y_j) forment une partition (situations incompatibles et complémentaires) ; on obtient alors :

$$P(z_k) = \sum_i \sum_j P(z_k, x_i, y_j) = \sum_i \sum_j P(z_k / x_i, y_j) \times P(x_i) \times P(y_j) \quad [25]$$

La Figure 33 propose une illustration dans le cadre du système expert SCRAPS. Ici Z est la variable « *Root_Intrusion_Risk* » (R-I-R), X est la variable « *Line_Size* » (L S) et Y est la variable « *Trees_above_line* ? ».

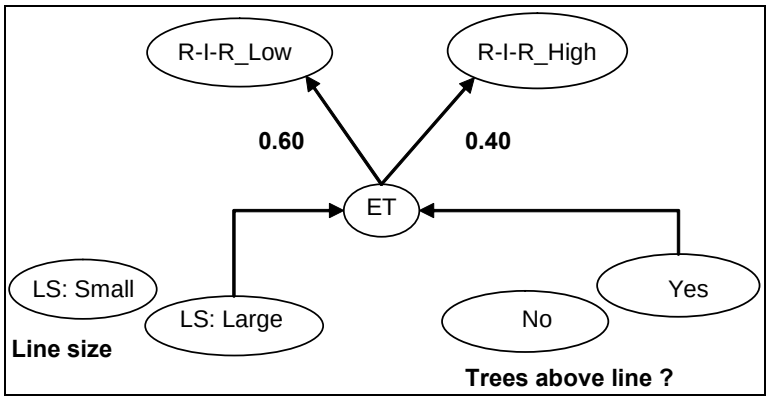


Figure 33 : évaluation du risque « Root_Intrusion_Risk » avec la combinaison de causes « Line_Size = Large » et « Trees_above_line = Yes » (Merril *et al.*, 2004)

La Figure 34 donne une vision globale de la relation entre la variable Z et ses deux variables parentes. Chacune des deux variables parentes possède 2 modalités : il existe donc 4 combinaisons possibles. Pour chacune de ces combinaisons sont fixées 2 probabilités associées aux 2 modalités de la variable Z.

Parent nodes		Root intrusion risk	
Line size	Trees above line ?	Low	High
small	yes	0	1
large	yes	0.6	0.4
small	no	0.9	0.1
large	no	1	0

Trees above line ?	Line size	
	large	small
no	1 / 0	0.9 / 0.1
yes	0.6 / 0.4	0 / 1

Notation : Pr(Low) / Pr(High)

Figure 34 : tableau des probabilités conditionnelles associé au risque « Root_Intrusion_Risk », selon deux formes possibles de présentation (Merril *et al.*, 2004)

Forces et faiblesses de l'approche probabiliste vis-à-vis de notre problématique

L'approche probabiliste présente l'avantage de reposer sur une axiomatique confirmée et les incertitudes sont appréhendées d'un point de vue probabiliste. En revanche, la théorie des probabilités n'est pas toujours directement utilisable car le modèle probabiliste est adapté à la saisie d'informations précises, mais dispersées (Dubois & Prade, 1985a). Pour cela, l'utilisation de la théorie des probabilités dans le cadre de notre étude n'est pas adaptée pour plusieurs raisons :

- la première vient du fait que l'hypothèse d'indépendance entre les différentes sources est difficile à justifier, voire contradictoire avec l'exploitation d'indicateurs évalués sur des échelles emboîtées (tronçon, bassins versants emboîtés) ;
- la seconde est que les informations disponibles ne fournissent pas de données répétables sur des niveaux d'évaluation des indicateurs de performance. Donc, le volume de données permet rarement une estimation statistique des probabilités ;
- la troisième est que lorsqu'une information est à la fois imprécise et incertaine, le cadre proposé par cette approche est peu adapté. L'approche ne traite pas des imprécisions.

4.4.2 Fusion à l'aide des fonctions de croyance

Elle est aussi appelée la théorie de Dempster-Shafer et se situe dans un cadre plus général que les théories des probabilités et des possibilités. Cette théorie, dont les bases ont été établies en 1976 par Shafer, (1976) permet de représenter l'incertain et l'ignorance, de prendre en compte toutes les données existantes sous un format commun (appelé fonction de croyance), afin d'obtenir une réponse consensuelle (Lair, 2000). Cette théorie est utile pour traiter des problèmes en relation avec le choix d'une situation, quand il existe beaucoup de facteurs influants (Zeidan, 2002).

On peut introduire les fonctions de croyance à travers l'exemple d'un vote comportant 5 choix élémentaires possibles : 4 candidats notés C_1, C_2, C_3, C_4 et le vote blanc C_5. Les candidats C_1, C_2 appartiennent à des partis dits « de droite » et les deux autres appartiennent à des partis dits « de gauche ».

Lors d'un sondage d'opinion sur un échantillon de personnes, les différentes réponses possibles peuvent être représentées par le graphe de la Figure 35a : C_3 et C_5 correspondent respectivement à la réponse « je suis certain de voter pour le candidat C_3 » et « je suis certain de voter blanc » ; $C_3 \cup C_4$ correspond à la réponse « je suis certain de voter à gauche, mais j'hésite entre les deux candidats » ; enfin $C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup C_4$ signifie « je suis certain de voter pour l'un des quatre candidats, mais je n'en sais pas plus pour le moment … ». Les résultats du sondage permettent d'attribuer une **masse de croyance** à chaque nœud ou feuille du graphe de la Figure 35 (la somme des masses étant égale à 1).

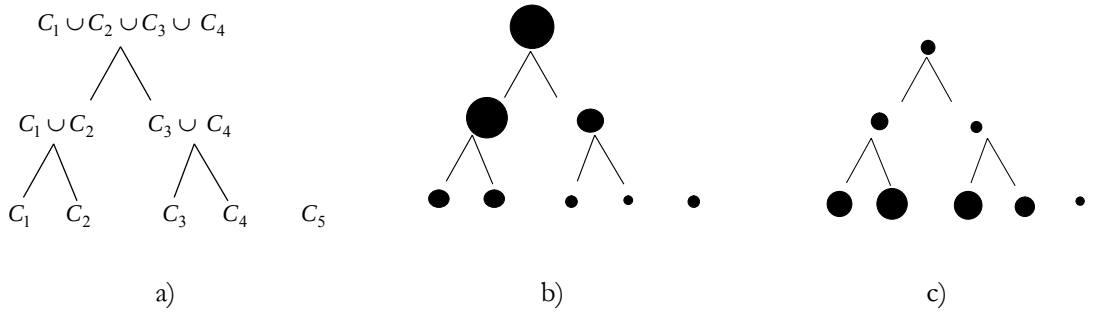


Figure 35 : a) graphe représentant l'emboîtement des réponses possibles ; b) répartition des masses de croyance dans le cas d'un échantillon très indécis ; c) répartition des masses de croyance dans le cas d'un ensemble de réponses plutôt affirmées, adapté de (Bloch & Hunter, 2001)

Plus généralement, si l'on pose $D = \{d_1, d_2, ..., d_n\}$ un espace de discernement ou ensemble de conclusions élémentaires possibles, une fonction de masse est définie de 2^D vers [0,1], avec 2^D l'ensemble des parties de *D*, chaque partie contenant ou non le singleton d_j. Deux mesures peuvent être calculées à partir des masses de croyance : la crédibilité ou croyance (belief) *Bel (A)* et la plausibilité *Pl(A)*, selon les expressions suivantes :

- $Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B)$ [26]
- $Pl(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B) = 1 - Bel(A^C)$ [27]

La crédibilité d'une conclusion *A* est la somme des masses de croyance des éléments *B* inclus dans *A*, tandis que la plausibilité de *A* est la somme des masses de tous les éléments qui ne sont pas en contradiction avec *A*. Pour 2 conclusions élémentaires C_1 et C_2 les différentes mesures sont représentées sur la Figure 36.

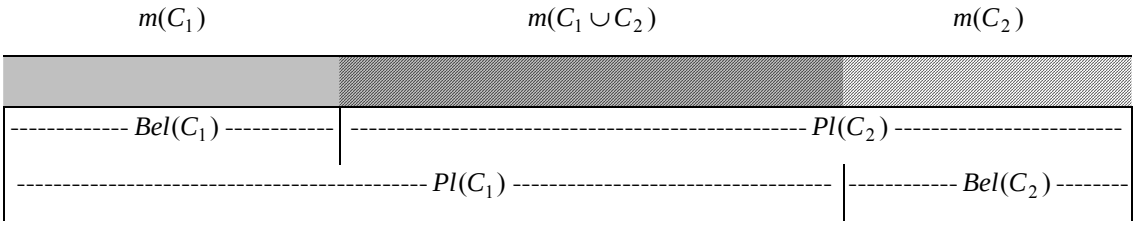


Figure 36 : croyances et plausibilités pour le cas de deux conclusions élémentaires possibles (Bloch & Hunter, 2001)

La fusion des informations issues de plusieurs sources conduit à un calcul des masses de croyance selon la règle dite « règle orthogonale de Dempster » qui correspond à une combinaison conjonctive (Bloch & Hunter, 2001). Dans le cas de 2 sources utilisées pour tendre vers 2 conclusions élémentaires C_1 et C_2, la fusion conduit à déterminer les masses : $m_{1\oplus2}(C_1), m_{1\oplus2}(C_1 \cup C_2), m_{1\oplus2}(C_2)$ selon les principes suivants :

- les masses sont proportionnelles aux surfaces des pavés de la Figure 37 ;
- les masses attribuées aux zones de conflit (pavés blancs) sont nulles ;
- la somme des masses est égale à 1.

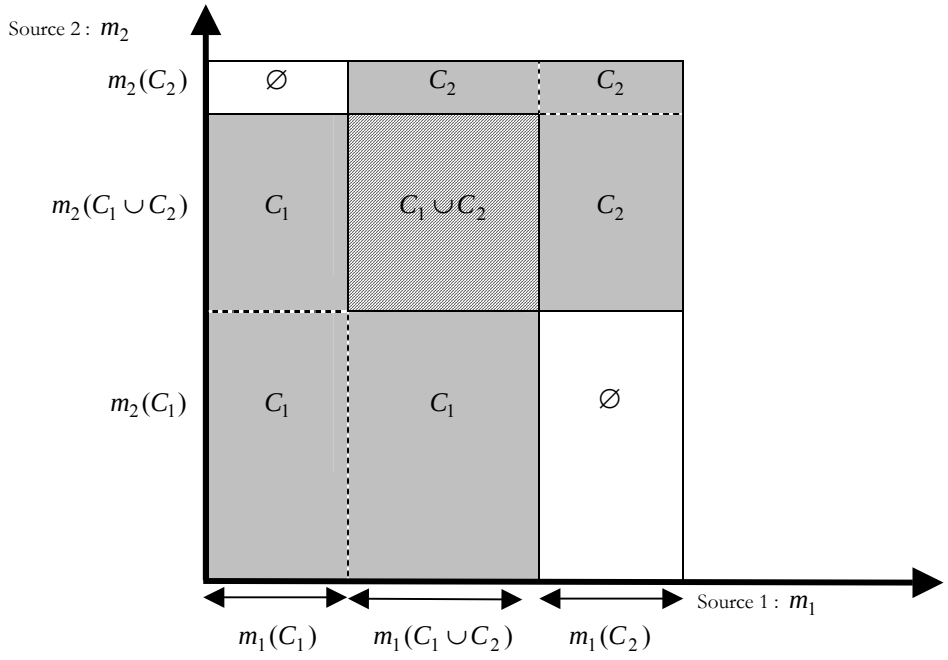


Figure 37 : représentation du calcul des masses de croyance par la règle de Dempster pour 2 sources (Bloch & Hunter, 2001)

Faiblesses de cette approche vis-à-vis de notre problématique

Le but recherché de nos travaux est de combiner des informations de nature différente. L'approche n'est donc pas pertinente lorsque les situations de conflit (négligées et notées $\varnothing$) correspondent à des produits de masses non négligeables par rapport à 1. L'approche ne semble donc pas adaptée à nos objectifs en particulier celui de gérer explicitement des situations de confrontation entre 2 sources. En outre, puisque

nous utilisons une échelle ordinale à 4 niveaux, il faudrait donc manipuler les masses de 10 conclusions possibles : 4 niveaux de gravité et 6 combinaisons de 2, 3 ou 4 niveaux consécutifs.

4.4.3 Fusion floue

Les ensembles flous ont contribué à un certain renouvellement des approches existantes de l'aide à la décision. Une quantité floue modélise une quantité vaguement perçue ou imprécisement connue, vue comme un ensemble de valeurs possibles aux contours mal délimités. Il est très important de ne pas être obligé de définir un seuil sur la valeur d'entrée d'un système de décision. C'est parce qu'une erreur de 1 % sur la valeur d'un seuil peut provoquer une erreur de 100% sur la décision dans un cas simple. Dans ce cas, la décision est justement l'appartenance ou non à l'ensemble défini par ce seuil. Ce changement est indiqué par un exemple sur la figure suivante.

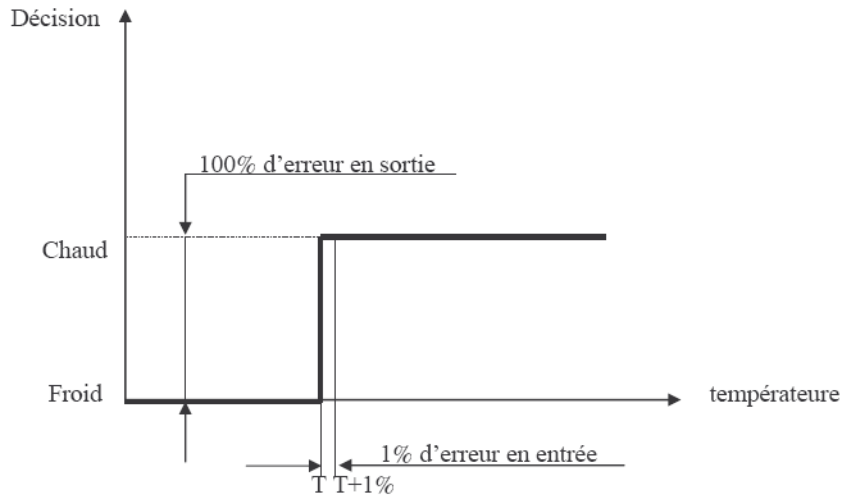


Figure 38 : le changement de décision avec l'erreur d'entrée (Hansruedi, 1994) cité par (Essa, 2007)

Les approches traditionnelles ont en effet du mal à traiter des concepts mal définis. La logique floue permet de caractériser une appartenance graduelle à un sous ensemble. On manipule de façon nuancée des données associées à des notions imprécises.

Le but de l'inférence floue (évaluation des règles) est de déterminer les sorties du système à partir des entrées floues. Il y a beaucoup de systèmes d'inférence, basés sur les théories des ensembles flous et des possibilités (Hadj-ali, 1995), expérimentés par exemple en géologie pétrolière, en analyse financière, dans le milieu médical, etc.

Selon (Bloch, 2005), « un des intérêts de la théorie des ensembles flous et des possibilités (…) est qu'elle offre une grande variété d'opérateurs de combinaison (…). Parmi les principaux opérateurs on trouve en particulier les t-normes, les t-conormes, les moyennes, les sommes symétriques, et des opérateurs prenant en compte des mesures de conflit ou encore de fiabilité des sources ».

Forces de l'approche floue vis-à-vis de notre problématique

Les sous ensembles flous sont donc un moyen de réaliser l'interface entre l'information numérique (quantitative) et l'information symbolique (linguistique, qualitative). Cette notion permet l'utilisation des catégories aux limites mal définies, des situations intermédiaires entre le tout et le rien, l'utilisation de valeurs approximatives. La théorie des ensembles flous fournit l'outil adapté pour représenter explicitement les informations imprécises, sous la forme de fonctions d'appartenance.

4.4.4 Fusion possibiliste

La logique floue est le cadre qui peut permettre de prendre en compte les imprécisions (les données numériques mal connues) (Lair, 2000 ; Bouchon-Meunier, 1995). Cependant, elle ne permet pas de manipuler dans un même formalisme des imprécisions et des incertitudes sur les connaissances (Bouchon-Meunier, 1995). C'est pourquoi, la théorie des possibilités a été introduite en 1978 par L. A. Zadeh et a été développée par Dubois et Prade (Dubois & Prade, 1988) pour prendre en compte des incertitudes sur les connaissances (Bouchon-Meunier & Marsala, 2003b).

> « Un des avantages de la théorie des possibilités, c'est qu'elle permet à la fois de représenter l'imprécision (sous la forme d'ensembles flous) et de quantifier l'incertitude, sous la forme d'une paire de nombres possibilité/nécessité » (Dubois & Prade, 1985a).

La théorie des possibilités est considérée parmi les branches les plus importantes de la logique floue (Zadeh, 2005). En effet, elle utilise, comme la théorie des sous ensembles flous, la notion de fonction d'appartenance. La théorie des possibilités permet de représenter à la fois l'imprécision et l'incertitude, par l'intermédiaire de distributions de possibilités $\pi_i^j = \mu_i^j$ et de deux mesures : une mesure de possibilité $\Pi \in [0,1]$ et une mesure de nécessité $N \in [0,1]$.

La mesure de possibilité est le degré avec lequel la réalisation de cet événement est possible. Plus la réalisation de cet évènement est possible, plus sa mesure de possibilité est proche de 1 et la réalisation est impossible si celle-ci est égale à 0. La mesure de possibilité ne suffit pas pour décrire l'incertitude existante sur la réalisation d'un évènement.

Pour cela, on indique **la mesure de nécessité** qui est le degré avec lequel la réalisation de cet événement est certaine. Elle permet de lever cette incertitude en apportant un niveau de certitude. Elle est définie comme la mesure de l'impossibilité de l'évènement contraire. Plus ce degré est proche de 1, plus il est certain que cet évènement sera réalisé. Ces deux mesures sont caractérisées par une relation de dualité :

$$N(A) = 1 - \Pi(A^c) \qquad [28]$$

Une conclusion est d'autant plus nécessaire que la proposition contraire est peu possible. A la limite, si une proposition est impossible $(\Pi(A^c) = 0)$ alors la proposition contraire est nécessairement vraie : $N(A) = 1$.

Les deux mesures possèdent les propriétés suivantes :

$$\Pi(A \cup B) = \max\left(\Pi(A), \Pi(B)\right) \quad [29]$$

$$N(A \cap B) = \min\left(N(A), N(B)\right) \quad [30]$$

$$\left(\Pi(A) < 1\right) \Rightarrow \left(N(A) = 0\right) \text{ ou encore } \left(\Pi(A) < 1\right) \Rightarrow \left(\Pi(A^c) = 1\right) \quad [31]$$

$$\left(N(A) > 0\right) \Rightarrow \left(\Pi(A) = 1\right) \text{ ou encore } \left(N(A) > 0\right) \Rightarrow \left(N(A^C) = 0\right) \quad [32]$$

La fonction d'appartenance peut servir d'outil pour représenter une distribution de possibilité. Ceci ne signifie pas qu'une fonction d'appartenance et une distribution de possibilité représentent le même concept (Hadj-ali, 1996). En fait, la théorie des possibilités qui fournit des degrés compris entre 0 et 1 utilise aussi la notion de fonction d'appartenance mais pour modéliser cette fois non plus l'aspect graduel d'une classe, mais des états d'incertitude (Berrah, 2002). L'annexe 5 présente de manière plus détaillée la théorie des sous-ensembles flous et des possibilités.

Difficulté de l'approche possibiliste vis-à-vis de notre problématique

Il parait actuellement difficile de définir les sources des incertitudes sur les données et les connaissances de l'outil RERAU. Or cette modélisation est requise pour appliquer l'approche possibiliste ; nous ne pouvons donc pas retenir cette approche.

4.4.5 Cadre retenu

Nous avons examiné les différents cadres théoriques possibles pour représenter explicitement les informations imprécises et incertaines. Nous avons également montré les forces et faiblesses de chaque théorie en regard des caractéristiques des données et des connaissances à manipuler. La technique proposée dans cette recherche est celle du flou car :

- elle permet de modéliser des connaissances imprécises ou vagues, ce que très peu d'autres méthodologies autorisent ;
- ensuite, elle est le seul moyen de traiter dans un même cadre des connaissances fournies numériquement (par des instruments de mesure) et des connaissances exprimées symboliquement (par un observateur humain).

L'intérêt de la logique floue intervient dans la création d'un moteur d'inférence flou. L'outil, qui sera expliqué en détail dans la suite, se base sur le moteur d'inférence flou (voir annexe 6).

4.5 Modèle de fusion floue proposé

Nous choisissons un outil de fusion floue pour manipuler les indicateurs pour la réhabilitation des conduites d'assainissement. Cet outil se base sur un moteur d'inférence floue. La figure suivante présente les problématiques et les objectifs du modèle proposé de fusion floue :

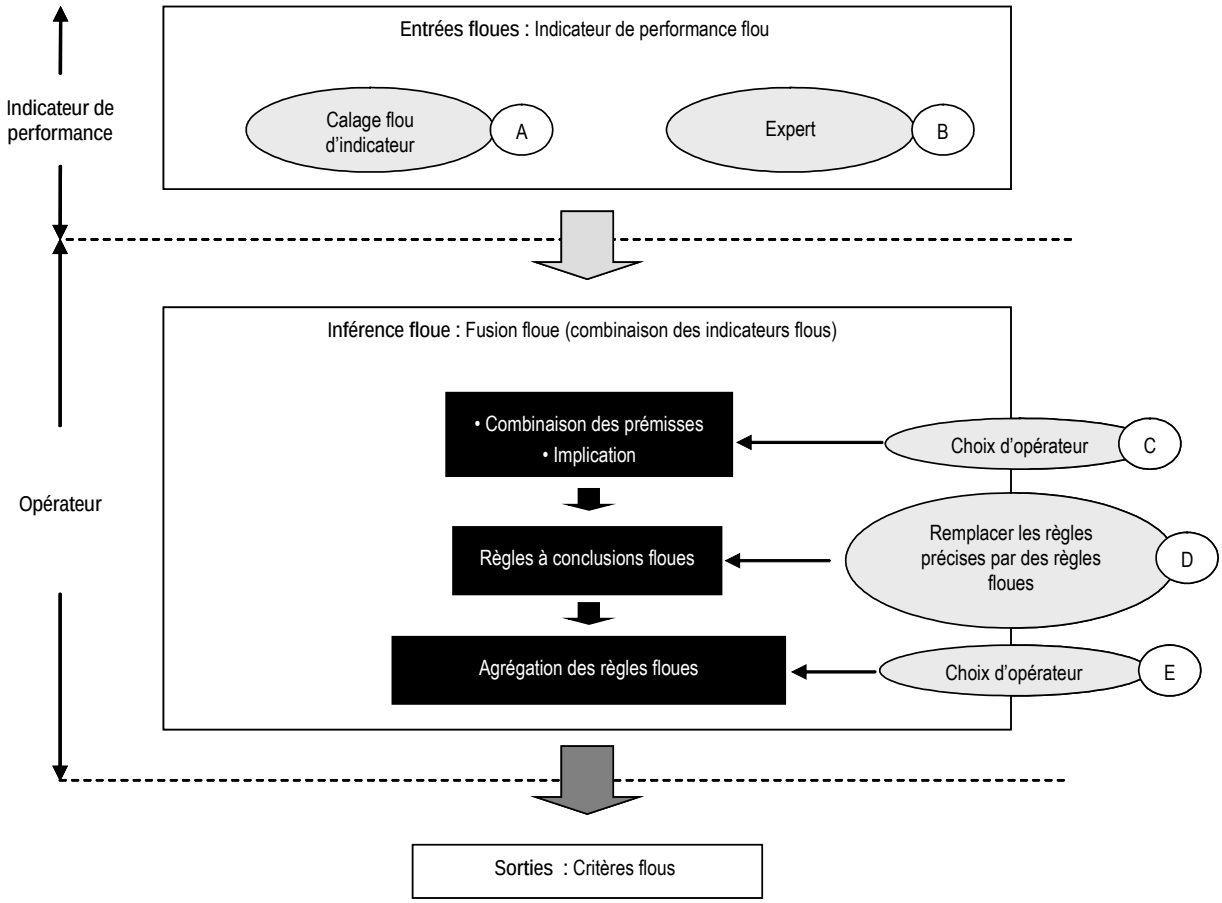


Figure 39 : formulation des différentes étapes conduisant à l'évaluation d'un critère flou

Dans cette partie, nous allons détailler la structure générale d'un modèle flou proposé à partir de la structure générale d'inférence floue. La structure générale du modèle flou proposé est composée de deux blocs fonctionnels concernant :

- les entrées floues : exprimées de façon naturelle par des acteurs humains (ex : indicateurs de vulnérabilité – problématique B) ou dérivées d'observations du système étudié (ex : fonction d'appartenance pour les indicateurs flous évalués à partir d'une inspection visuelle - problématique A) ;
- le mécanisme d'inférence : à partir de la base des règles floues fournie par l'expert et des entrées floues dans le domaine X×Y, on calcule l'évaluation floue dans le domaine Z correspondant. Ce calcul met en œuvre la combinaison de prémisses et l'implication (problématique C), et l'agrégation des règles floues (problématiques D, E).

4.5.1 Indicateurs de performance flous

Cette étape constitue l'interface entre des évaluations non floues des tronçons et des évaluations floues afin de déterminer un degré d'appartenance de chaque tronçon aux sous-ensembles flous (G1, G2, G3, G4). La figure suivante présente l'évaluation floue d'un tronçon selon un indicateur de performance :

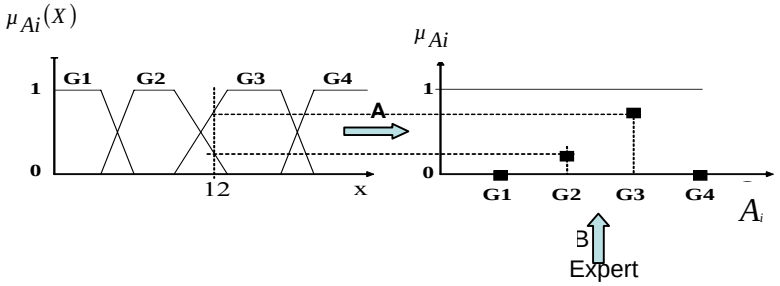


Figure 40 : réponse floue sur quatre modalités d'un tronçon selon un indicateur flou, adapté de (Le Gauffre *et al.*, 2008)

La figure précédente montre que l'évaluation floue d'un tronçon selon un indicateur flou sur quatre modalités (G1, G2, G3, G4) peut être exprimée de deux manières :

- avec des termes du langage naturel, par un avis d'expert (problématique B) : par exemple " en gravité plutôt G3 et un peu G2 " ;
- ou sous forme numérique par des outils d'observation (problématique A) : par exemple (figure 40), l'évaluation floue d'un tronçon avec une note de 12, basée sur les fonctions d'appartenance (voir annexe 5), se traduira " le tronçon appartient à l'état G1 avec un degré de vérité de 0, à l'état G2 avec un degré de vérité de 0.3, à l'état G3 avec un degré de vérité de 0.7 et à l'état G4 avec un degré de vérité de 0 " (cf. chapitre 5).

4.5.2 Fusion floue (combinaison d'indicateurs flous)

Le modèle proposé utilise les principes de l'inférence floue. Nous allons examiner ses différentes composantes en nous appuyant sur les travaux de (Hadj-ali, 1995 ; Mauris *et al.*, 1996 ; Borne *et al.*, 1998 ; Bouchon-Meunier, 1995 ; Bouchon-Meunier & Marsala, 2003b) (voir annexe 6).

4.5.2.1 Base de règles précises de RERAU

L'inférence floue établit une relation non linéaire entre ses entrées floues et ses sorties floues. Cette relation est assurée par des règles "SI - ALORS". Chacune de ces règles peut prendre la forme générale suivante :

SI (x est A) et (y est B) ALORS (z est C)

Combinaison de prémisses — conclusion

L'indicateur INF6, par exemple, est évalué en considérant INF4 (état structurel observé par ITV) et INF2 (facteurs spécifiques de l'infiltration). L'opérateur INF2 ⊗ INF4 correspond à un groupe de règles de combinaison. Ces règles ont été exprimées par les experts (lors du PN RERAU) sous la forme d'un tableau. Le tableau 41 comprend 12 cellules correspondant à 12 règles.

Tableau 41 : opérateur moyenne pour l'évaluation de l'indicateur INF6-E/O-T (risque d'infiltration estimé après inspection TV à l'échelle de tronçon) (Le Gauffre *et al* , 2004)

INF2-E/R-T	INF4–E/O-T	Défaut d'étanchéité observés			
		1 - faible	2 - modéré	3 – significatif	4 - majeur
niveau de nappe	1 -constamment inférieur au radier ou remblai étanche	1	1	1	1
	2 -temporairement supérieur à la cote du radier, ou Inconnue -?	1	2	3	4
	3 - fréquemment ou en permanence supérieur à la cote du radier	1	3	4	4

Dans le tableau 41, le croisement de la ligne 2 (INF2 = G2) et de la colonne 3 (INF4 = G3) donne INF6 = G3.

4.5.2.2 Combinaison des prémisses

Un indicateur composite est obtenu par fusion de deux indicateurs : une règle comprend donc deux prémisses. Les deux prémisses de chaque règle floue "SI - ALORS" sont combinées par un opérateur Λ_1 de logique « et ». L'application de l'opérateur de combinaison des prémisses Λ_1 entre les deux degrés d'appartenances μ_{A_i} et μ_{B_j} fournit le degré d'appartenance $\mu_{A_i B_j}$. Ces combinaisons peuvent prendre la forme générale suivante :

$$\mu_{A_i B_j} = \mu_{A_i} \; \Lambda_1 \; \mu_{B_j} \quad \text{avec } i,\ j = 1....3 \text{ ou } 4 \qquad [33]$$

Pour l'exemple du croisement de INF2 avec INF4 (voir tableau 41), les combinaisons peuvent prendre la forme générale suivante :

$$\mu_{INF2_i\, INF4_j} = \mu_{INF2_i} \; \Lambda_1 \; \mu_{INF4_j} \quad \text{avec } i = 1....3 \text{ et } j = 1....4 \qquad [34]$$

Prenons l'exemple de la combinaison de prémisses (INF2 = G2) et (INF4 = G3).

On cherche $\mu_{INF2_2\, INF4_3}$.

Si $\mu_{INF2_2} = 0{,}9$ et si $\mu_{INF4_3} = 0{,}9$ et en appliquant un opérateur Λ_1 = produit ,

alors on obtient : $\mu_{INF2_2\ INF4_3} = 0,9 * 0,9 = 0,81$

Avec $\Lambda_1 = \min$, on obtiendrait $\mu_{INF2_2\ INF4_3} = \min\left(0,9 \ ; \ 0,9\right) = 0,9$

4.5.2.3 Implication

Pour qualifier la sortie correspondant à chaque règle, l'opérateur de l'implication Λ_2 est appliqué entre le degré d'appartenance $\mu_{A_i B_j}$ associée à la prémisse de cette règle et le degré de vérité de sa conclusion μ_{C_k} (poids de la règle), ce qui donne par exemple :

$$\mu_{A_i B_j C_k} = \mu_{A_i B_j} \ \Lambda_2 \ \mu_{C_k} = \left(\mu_{A_i} \ \Lambda_1 \ \mu_{B_j}\right) \ \Lambda_2 \ \mu_{C_k} \quad \text{avec i,j,k = 1....3 ou 4} \qquad [35]$$

Pour l'exemple d'agrégation de INF2 avec INF4 (voir tableau 41), les combinaisons peuvent prendre la forme générale suivante :

$$\mu_{INF2_i INF4_j INF6_k} = \mu_{INF2_i INF4_j} \ \Lambda_2 \ \mu_{INF6_k} = \left(\mu_{INF2_i} \ \Lambda_1 \ \mu_{INF4_j}\right) \ \Lambda_2 \ \mu_{INF6_k} \qquad [36]$$
$$i = 1.....3$$
$$j, k = 1.....4$$

En reprenant l'exemple précèdent avec les deux conclusions possibles de la règle

$\mu_{INF6_2} = 0,16$ et $\mu_{INF6_3} = 0,84$;

Si on applique l'opérateur Λ_1 = produit et l'opérateur Λ_2 = produit alors :

$\mu_{INF2_2 INF4_3 INF6_2} = \left(0,9 * 0,9\right) * 0,16 = 0,13$ pour la conclusion floue 1 ;

$\mu_{INF2_2 INF4_3 INF6_3} = \left(0,9 * 0,9\right) * 0,84 = 0,68$ pour la conclusion floue 2 ;

4.5.2.4 Agrégation de règles

La fonction de sortie floue est calculée à partir des sorties de toutes les règles par l'opérateur d'agrégation $\perp$. La sortie prend la forme suivante :

$$\mu_{C_k} = \perp_{i=1.....3,j=1.....4} \ \mu_{A_i B_j C_k} \quad \text{avec } k = 1.....3 \text{ ou } 4 \qquad [37]$$

Le degré de vérité de "INF6 = Gk" (avec k = 1 à 4) est donné par :

$$\mu_{INF6_k} = \perp_{i=1.....3,j=1.....4} \ \mu_{INF2_i INF4_j INF6_k} \quad \text{avec } k = 1.....4 \qquad [38]$$

Les opérateurs Somme ou Max sont utilisables pour $\perp$ (voir 4-5-3-1).

Prenons les deux règles conduisant à la conclusion INF6 = G2 :

Règle 1 : si (INF2 = G2) et (INF4 = G3) alors (INF6 = G2)

Règle 2 : si (INF2 = G2) et (INF4 = G2) alors (INF6 = G2)

$$\text{Si } \left\{ \begin{array}{l} \mu_{INF2_2} = 0,9 \\ \mu_{INF4_3} = 0,9 \\ \mu_{INF6_2} = 0,16 \end{array} \right\} \text{ alors } \mu_{INF2_2 INF4_3 INF6_2} = (0,9 * 0,9) * 0,16 = 0,13 \text{ pour la règle 1 ;}$$

$$\text{Si } \left\{ \begin{array}{l} \mu_{INF2_2} = 0,9 \\ \mu_{INF4_2} = 0,1 \\ \mu_{INF6_2} = 1 \end{array} \right\} \text{ alors } \mu_{INF2_2 INF4_2 INF6_2} = (0,9 * 0,1) * 1 = 0,09 \text{ pour la règle 2 ;}$$

En appliquant un opérateur $\perp$= somme , on obtient la valeur de sortie floue :

$$\mu_{INF6_2} = \min \left(1; \mu_{INF2_2 INF4_3 INF6_2} + \mu_{INF2_2 INF4_2 INF6_2} \right) = \min \left(1 \ ; \ 0,13 + 0,09 \right) = 0,22$$

4.5.3 Implémentation de la fusion floue

4.5.3.1 Choix d'opérateurs pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation de plusieurs règles

Nous allons par la suite présenter la démarche utilisée pour la sélection d'opérateurs pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles (Λ_1–Λ_2–$\perp$). Cette démarche comprend deux phases : une approche opérationnelle puis la confrontation de nos conclusions avec des modèles existants.

A. approche opérationnelle : le principe est de trouver les systèmes d'opérateurs permettant de simuler parfaitement le jugement d'experts. En effet, il est possible pour les experts de donner

une conclusion générale à partir d'un ensemble de données objectives, cette conclusion pourra alors être utilisée comme jugement de référence.

D'une manière générale, les systèmes d'opérateurs sont testés en comparant les résultats qu'ils fournissent avec les résultats énoncés par des experts. Le tableau 42 présente les conclusions de ces comparaisons (voir annexe 7).

Tableau 42 : systèmes d'opérateurs retenus du point de vue opérationnel

Système d'opérateurs Testés ($\Lambda 1$–$\Lambda 2$–$\perp$)	Nature des effets entre les indicateurs à agréger				
	Compensation W	Deux sources 2S	Synergie X	Conjonction m	Disjontion M
Prod–prod–sum	**sélectionné**	**sélectionné**	**sélectionné**	**sélectionné**	**Sélectionné**
Prod–prod–max	Eliminé	Eliminé	Eliminé	Eliminé	Eliminé
Min–prod–max	Eliminé	Eliminé	Eliminé	Eliminé	Eliminé
Min–prod–sum	**sélectionné**	Eliminé	**sélectionné**	Eliminé	Eliminé
Min–min–max	Eliminé	Eliminé	Eliminé	Eliminé	Eliminé
Min–min–sum	Eliminé	Eliminé	Eliminé	Eliminé	Eliminé

Le système (**Prod–prod–sum)** est sélectionné car il est capable de traduire au maximum l'avis d'expert. Tandis que les autres systèmes sont éliminés puisqu'ils sont incapables de représenter le jugement d'expert.

B. confrontation de nos choix avec la littérature : les opérateurs associés aux deux phases de l'implication et de l'agrégation des règles (Λ_2–$\perp$) sont variables selon les auteurs (Georgescu, 2002). Le système que nous avons retenu (produit pour l'implication, et somme pour l'agrégation des règles) correspond au système proposé par Larsen (Georgescu, 2002). Ce modèle est très largement utilisé (Hadj-ali, 1995 ; Malhis, 2002 ; Borne *et al.*, 1998).

4.5.3.2 Construction de règles floues

L'utilisation de règles précises dans RERAU ne permet pas d'induire des nuances dans l'agrégation. Nous avons proposé **une méthodologie pour la construction de règles à conclusions floues à partir des règles RERAU** (voir annexe 8)**.** Il s'agit de :

1. **déterminer la zone d'hésitation entre 2 modalités sur la table d'agrégation** : le tableau peut être divisé en une zone d'avis certain et une zone d'hésitation. La zone d'hésitation représente la zone des règles floues qu'il faut construire. Parmi les 12 règles en précis de INF2 ⊗ INF4, nous avons 8 règles considérées comme certaines (et donc précises) et 4 règles présentant de l'hésitation et qu'il faut donc convertir en règles floues (tableau 43) :

Tableau 43 : zone d'hésitation entre deux modalités d'évaluation de INF6

INF2-E/R-T		INF4–E/O-T	Défauts d'étanchéité observés			
			1 - faible	2 - modéré	3 - significatif	4 - majeur
niveau de nappe	1 -constamment inférieur au radier ou remblai étanche		1	1	1	1
	2 -temporairement supérieur à la cote du radier		1	2	A) 2/3	B) 3/4
	3 - fréquemment ou en permanence supérieur à la cote du radier		1	C) 2/3	D) 3/4	4

Cas A) SI INF2 est modéré (G2) et INF4 est significatif (G3) ALORS INF6 est entre modéré (G2) et significatif (G3) ;

Cas B) SI INF2 est modéré (G2) et INF4 est majeur (G4) ALORS INF6 est entre significatif (G3) et majeur (G4) ;

Cas C) SI INF2 est significatif (G3) et INF4 est modéré (G2) ALORS INF6 est entre modéré (G2) et significatif (G3) ;

Cas D) SI INF2 est significatif (G3) et INF4 est significatif (G3) ALORS INF6 est entre significatif (G3) et majeur (G4) ;

2. **contrôler l'hésitation (masse de flou) entre 2 modalités de la table d'agrégation en utilisant deux indices (voir chapitre 3) :**

   - l'indice qui reflète la nature de la zone d'hésitation (selon la nature de l'opérateur = max, min ou moy) ;
   - l'indice qui reflète la pondération d'un indicateur par rapport à l'autre au sein d'une zone d'hésitation.

Le tableau suivant présente les résultats de la construction de règles à conclusions floues à partir des règles RERAU. L'annexe 8 présente le détail des calculs.

Tableau 44 : valeurs calculées des nuances entre quatre modalités d'évaluation INF6 (règles RERAU à gauche et règles floues à droite)

	RERAU				Floue (INDIGAU)			
INF2 \ INF4	G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
G1	G1	G1	G1	G1	1, 0, 0, 0	1, 0, 0, 0	1, 0, 0, 0	1, 0, 0, 0
G2	G1	G2	G3	G4	1, 0, 0, 0	0, 1, 0,0	0, 0.16, 0.84, 0	0, 0, 0.16, 0.84
G3	G1	G3	G4	G4	1, 0, 0, 0	0, 0.3, 0.7, 0	0, 0, 0.3, 0.7	0, 0, 0, 1

La lecture des règles floues concernant deux indicateurs INF2 et INF4 et leur résultat INF6 peut se traduire par :

Si INF2 est Modérée (G2) et si INF4 est Significatif (G3), alors INF6 est (0 % pour faible, 16 % pour modérée, 84 % pour Significatif et 0 % pour majeur) ;

4.5.3.3 Illustration pour l'indicateur INF6

Nous allons par la suite présenter la comparaison entre deux agrégations : l'agrégation utilisant les règles précises de RERAU (tableau 44 partie de gauche) et l'agrégation utilisant les règles à conclusions floues (tableau 44 partie de droite). Les entrées floues du tableau 45 sont :

- l'évaluations du tronçon selon l'indicateur INF2 est : (0.1 G1, 0.9 G2, 0 G3) ;
- l'évaluations du tronçon selon l'indicateur INF4 est : (0 G1, 0.1 G2, 0.9 G3, 0 G4).

Ce calcul utilise le système d'opérateurs (produit – produit – somme) pour les combinaisons de prémisses, l'implication et l'agrégation de règles précises. Cette comparaison comprend :

- l'agrégation utilisant les règles précises de RERAU : le tableau suivant présente la combinaison entre deux évaluations d'un tronçon selon deux indicateurs INF2 et INF4 (comme entrées) pour évaluer le tronçon selon l'indicateur INF6 (comme résultat en sortie).

Tableau 45 : évaluation de INF6 avec les règles précises et les entrées floues

			INF6				
12 règles	**INF2**	**INF4**	**G1**	**G2**	**G3**	**G4**	
1&1	0,1	0	0				
1&2	0,1	0,1	0,01				
1&3	0,1	0,9	0,09				
1&4	0,1	0	0				
2&1	0,9	0	0,00				
2&2	0,9	0,1		0,09			
2&3	0,9	0,9			0,9*0,9*1		
2&4	0,9	0				0	
3&1	0	0	0,00				
3&2	0	0,1			0,00		
3&3	0	0,9				0	
3&4	0	0				0	
			0,10	**0,09**	**0,81**	**0**	**∑=1**

A partir de 12 règles précises fournies par l'expert (présentés sur le tableau 41) et des entrées floues, nous avons calculé la sortie de l'évaluation floue du tronçon selon indicateur INF6 (0.1 G1, 0.09 G2, 0.81 G3, 0 G4).

- l'agrégation utilisant les règles à conclusions floues : le tableau suivant présente le même exemple d'agrégation précédent mais en utilisant les règles à conclusions floues.

Tableau 46 : évaluation de INF6 avec les règles floues et les entrées floues

			INF6				
12 règles	**INF2**	**INF4**	**G1**	**G2**	**G3**	**G4**	
1&1	0,1	0					
1&2	0,1	0,1	0,1 * 0,1 * 1				
1&3	0,1	0,9	0,1 * 0,9 * 1				
1&4	0,1	0					
2&1	0,9	0					
2&2	0,9	0,1		0,9 * 0,1 * 1			
2&3	0,9	0,9		0,9 * 0,9 * 0,16	0,9 * 0,9 * 0,84		
2&4	0,9	0					
3&1	0	0					
3&2	0	0,1					
3&3	0	0,9					
3&4	0	0					
			0,10	**0,22**	**0,68**	**0**	**∑=1**

Les résultats montrent que la sortie de l'évaluation floue du tronçon selon indicateur INF6 est (0.1 G1, 0.09 G2, 0.81 G3, 0 G4) en utilisant les règles précises et (0.1 G1, 0.22 G2, 0.68 G3, 0 G4) en utilisant les règles floues. La comparaison de deux résultats permet de dire que l'utilisation de ***règles à conclusions floues*** induit des nuances dans l'agrégation**.**

4.5.4 Illustration sur le cas d'un critère flou

A partir d'un examen de la formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF (niveau de priorité pour une réhabilitation pour motif d'infiltrations contribuant à des déversements de temps sec polluant les eaux de surface) (voir chapitre 3 - 3.2.1), nous avons formulé les règles floues présentées ci-dessous. Ces règles correspondant à des raisonnements variés : compensation entre 2 indicateurs (W), deux sources (S), conjonction (m) (section 4-2).

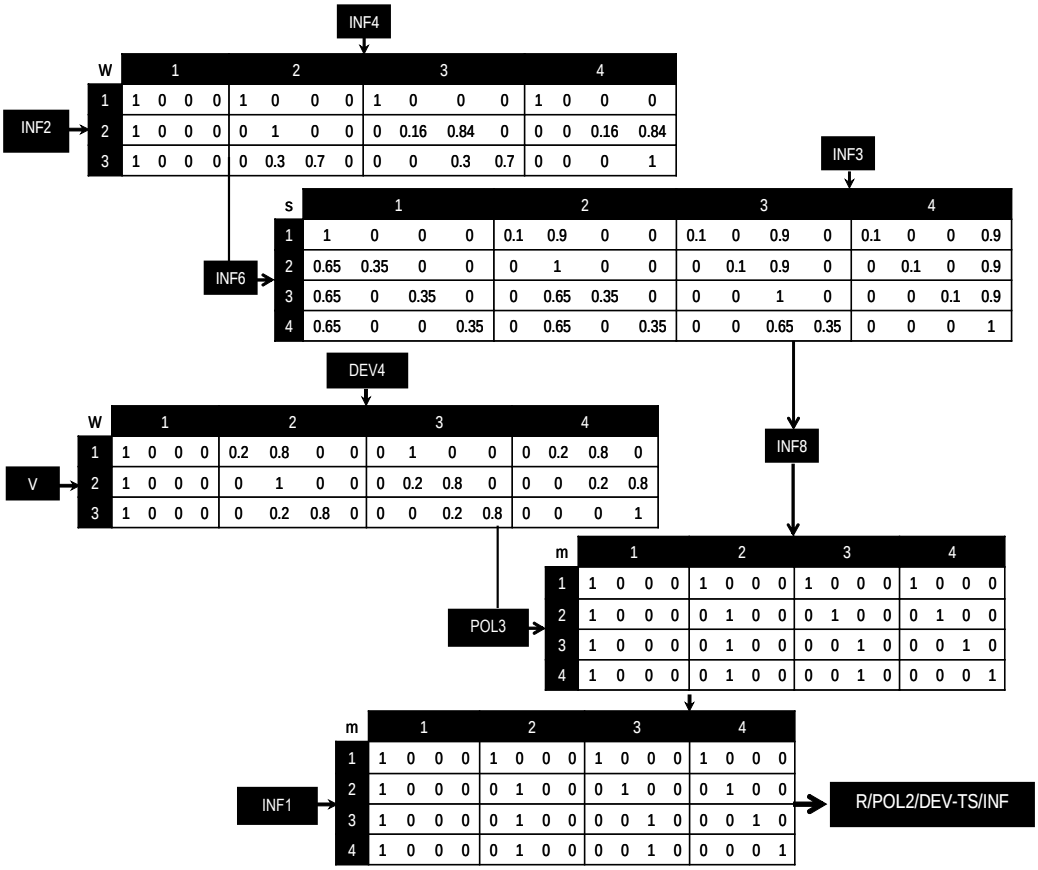


Figure 41 : règles d'agrégation floues du critère R/POL2/DEV-TS/INF (cas INF3 ≠ ?) à partir de 6 indicateurs

(INF2 : facteurs spécifiques pour l'infiltration à l'échelle du tronçon, INF3 : infiltration observée directement à l'échelle du tronçon, INF4 : état de santé estimé du tronçon à partir de l'infiltration observée, DEV 4 : déversements de temps sec observé directement à l'échelle du bassin versant, V : sensibilité des eaux de surface estimé à l'échelle du bassin versant, INF1 : infiltrations observées directement à l'échelle du bassin versant)

La formulation floue de chaque critère a été modélisée sous Excel dans un prototype d'outil informatique programmé en Visual Basic. Ce dernier permet d'évaluer rapidement un critère flou à partir de différentes combinaisons d'indicateurs flous en utilisant le système d'opérateurs (Prod–prod–sum) et les règles floues.

Le tableau suivant présente deux exemples de comparaison de l'utilisation du modèle précis RERAU et du modèle flou INDIGAU. Dans les deux exemples, INF3 = G3, V = G3 et INF1 = G4. Le premier exemple concerne un tronçon pour lequel INF2 = G3, INF4 = G4 et DEV4 = G4. Le deuxième exemple concerne un tronçon pour lequel INF2 = G2, INF4 = G3 et DEV4 = G2.

Tableau 47 : évaluation précise et floue du critère R/POL2/DEV-TS/INF

Tronçon 1

a) Modèle RERAU

	Evaluation précise d'un tronçon selon :									
	indicateurs simples						indicateurs composites			critère
	INF2	INF4	INF3	V	DEV4	INF1	INF6	INF8	POL3	R/POL2/DEV-TS/INF
G1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G3	1	0	1	1	0	0	0	**1**	0	**1**
G4		1	0		1	1	1	0	1	0

b) Modèle INDIGAU

	Evaluation floue d'un tronçon selon :									
	indicateurs simples						indicateurs composites			critère
	INF2	INF4	INF3	V	DEV4	INF1	INF6	INF8	POL3	R/POL2/DEV-TS/INF
G1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G3	1	0	1	1	0	0	0	**0.65**	0	**0.65**
G4		1	0		1	1	1	**0.35**	1	**0.35**

Tronçon 2

a) Modèle RERAU

	Evaluation précise d'un tronçon selon :									
	indicateurs simples						indicateurs composites			critère
	INF2	INF4	INF3	V	DEV4	INF1	INF6	INF8	POL3	R/POL2/DEV-TS/INF
G1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
G3	0	1	1	1	0	0	**1**	**1**	1	**1**
G4		0	0		0	1	0	0	0	0

b) Modèle INDIGAU

	Evaluation floue d'un tronçon selon :									
	indicateurs simples						indicateurs composites			critère
	INF2	INF4	INF3	V	DEV4	INF1	INF6	INF8	POL3	R/POL2/DEV-TS/INF
G1	0	0	0	0	0	0	0	**0.016**	0	**0.016**
G2	1	0	0	0	1	0	**0.16**	**0.144**	0.2	**0.312**
G3	0	1	1	1	0	0	**0.84**	**0.84**	0.8	**0.672**
G4		0	0		0	1	0	0	0	0

La comparaison des résultats des deux critères permet de constater que :

- le modèle RERAU ne permet pas d'introduire des nuances dans l'agrégation : dans le premier exemple, le tronçon obtient une valeur précise G3 selon le modèle RERAU ; par contre ce même tronçon est associé à la modalité G3 avec un degré d'appartenance de 65 % et à la modalité G4 avec un degré d'appartenance de 35 % selon le modèle INDIGAU ;
- le modèle INDIGAU apporte une plus grande robustesse et finesse des évaluations des critères : dans le deuxième exemple, le critère INDIGAU est évalué à la modalité G3 avec un degré de 67.2 %, à la modalité G2 avec un degré de 31.2 % et à la modalité G1 avec un degré de 1.6 % ; ce même tronçon est évalué en niveau précis G3 selon le critère RERAU ;

- le modèle RERAU ne permet pas de différencier les deux tronçons évalués en niveau G3 tandis que le critère INDIGAU amène à différencier les deux tronçons : tronçon 1 en gravité 3 voire 4, tronçon 2 en gravité 3 voire 2.

Ces observations montrent l'importance d'introduire des appartenances graduelles dans l'agrégation, en vue de hiérarchiser des priorités.

4.6 Conclusion et discussion

L'évaluation d'un critère de réhabilitation résulte de la fusion d'indicateurs de performance. Indicateurs et critères sont entachés d'imprécisions ou d'incertitudes. Pour traiter les imprécisions rencontrées, un modèle basé sur la logique floue est proposé et permet d'intégrer ces imprécisions dans l'évaluation du critère :

- à partir d'un examen critique des tableaux du Guide Méthodologique RERAU, une typologie des raisonnements lors de chaque croisement d'indicateurs a été proposée. Ces raisonnements peuvent être : Conjonction – min, Disjonction – Max, Compensation pondérée, Confrontation de plusieurs sources et Synergie ;
- ensuite, un modèle flou est proposé à partir de la structure générale d'inférence floue. Ce modèle met en œuvre la combinaison de prémisses, l'implication et l'agrégation de règles floues. Le système d'opérateurs (Prod – prod – sum) est sélectionné car il est capable de se conformer au maximum à l'avis d'experts ;
- puis, les règles précises (RERAU) sont remplacées par les règles floues (INDIGAU) car les règles précises de RERAU ne permettent pas d'induire des nuances dans l'agrégation. Une méthode permettant de contrôler l'hésitation (masse de flou) entre 2 modalités de la table d'agrégation a été proposée ;
- enfin, la formulation floue de chaque critère a été modélisée sous Excel dans un prototype d'outil informatique programmé en Visual Basic.

Le modèle flou proposé se base sur le moteur d'inférence floue et permet de :

- saisir l'imprécision sur l'évaluation d'un indicateur et de propager cette imprécision dans l'évaluation du critère ;
- définir une conclusion qui intègre l'information sur la contradiction (par exemple une conclusion distribuée sur plusieurs valeurs possibles, cette distribution rendant compte de la contradiction constatée) ;
- offrir une plus grande robustesse des évaluations des critères ;
- représenter plus finement la hiérarchie des priorités.

Pour rappel, nous avons conclu à la fin du chapitre 2 que les seuils précis doivent être nuancés pour plusieurs raisons à partir de l'utilisation de la théorie des sous ensembles flous. Pour cela nous allons caler dans le chapitre 5 les indicateurs flous évalués à partir de rapports d'inspections visuelles.

5 Chapitre 5. Indicateurs flous évalués à partir de résultats d'inspections visuelles 109

5.1 Introduction : positionnement des problèmes dus à l'approche RERAU 109

5.2 Procédure de calage sans pondération des erreurs d'affectation 111

5.2.1 Détermination d'un seuil flou Sr 113

5.2.2 Automatisation de la démarche 116

5.3 Procédure de calage avec pondération des erreurs d'affectation 118

5.3.1 Démarche de pondération 118

5.3.2 Automatisation de la démarche 119

5.3.3 Étude de sensibilités vis-à-vis des paramètres économiques 120

5.4 Comparaison des seuils précis et flous 120

5.5 Conclusion et discussion 121

5 Chapitre 5. Indicateurs flous évalués à partir de résultats d'inspections visuelles

5.1 Introduction : positionnement des problèmes dus à l'approche RERAU

Pour rappel, le programme français RERAU a développé un ensemble d'indicateurs de performance, basés sur les résultats d'inspections visuelles (Le Gauffre *et al.,* 2004). Ces indicateurs de performance visent à exploiter des informations obtenues par des inspections visuelles des collecteurs pour les traduire en quatre niveaux de performance des tronçons (de 1 - satisfaisant à 4 - dysfonctionnement majeur).

Les rapports d'inspections sont tout d'abord convertis selon un système de codage puis la quantification de ces codes permet d'obtenir une séquence de notes. Ces notes caractérisent chaque défaut, leur gravité et leur étendu. Pour chaque tronçon, on obtient ainsi un profil longitudinal (densité de défaut) et une note de synthèse caractérisant la globalité du tronçon. Ensuite, chaque tronçon est évalué par les experts selon des avis précis. Enfin, la note globale du tronçon est comparée avec 3 seuils précis pour le classer selon son état. Cette comparaison peut être idéale lorsqu'elle conduit à la même conclusion que les experts pris pour référence (hypothèse RERAU, voir figure 42), ou bien elle peut ne pas être idéale (voir figure 43).

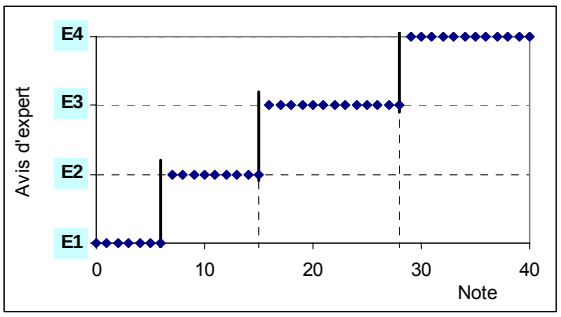


Figure 42 : situation idéale : on peut définir une note N et 3 valeurs seuils (S1, S2, S3) telles que la comparaison de N avec (S1, S2, S3) conduit toujours à la même conclusion que les experts pris pour référence

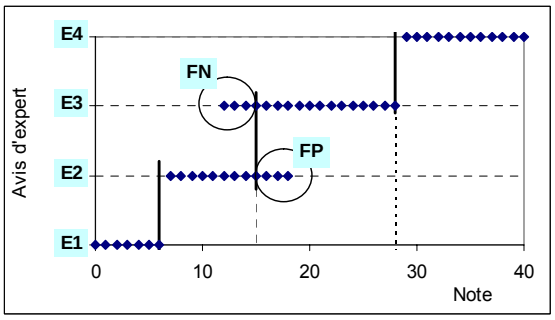


Figure 43 : la note N ne caractérise pas l'état de santé d'un tronçon de manière univoque : 2 tronçons avec une même note N peuvent être évalués différemment par les experts

Dans la figure 43, l'utilisation de seuils précis induit alors **2 types d'erreurs** : pour chaque seuil, **les faux positifs (FP)** sont classés à tort dans un niveau de dégradation plus élevé que par les experts, **les faux négatifs (FN)** sont classés à tort dans un niveau de dégradation plus faible que par les experts. La minimisation d'une erreur globale pour la définition de seuils précis ne permet pas de maîtriser l'erreur associée à un tronçon. Ainsi les erreurs de classification sont inévitables, notamment lorsque la note est proche des seuils (Ibrahim *et al.,* 2007b), et l'utilisateur n'a pas connaissance des tronçons susceptibles d'être mal classés.

De plus, **la note N, issue d'une inspection, est une mesure imparfaite de l'état** car elle est basée sur le relevé des désordres qui dépend fortement de l'opérateur (voir figure 44). Une étude de (Dirksen *et al.,*

2007) a montré que ces ITV ne sont pas toujours fiables et il y a beaucoup d'incertitudes associé au processus de relevé des désordres. L'erreur sur le calcul d'une note N nécessite une étude des sources d'incertitudes.

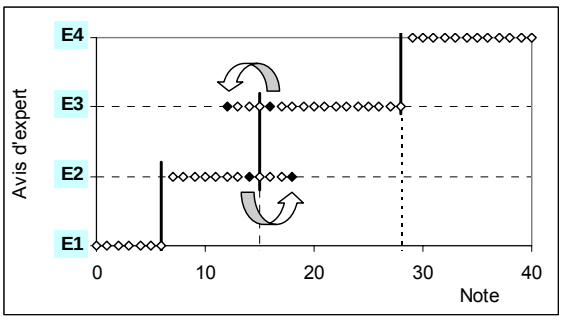


Figure 44 : faux positifs et faux négatifs peuvent être dus à une erreur sur la note N. En conséquence les notes voisines sont jugées de façons très différentes par les experts

Une étude récente (Werey *et al.*, 2008) a également montré que **les avis d'experts ne sont pas unanimes** et peuvent être influencés par le contexte local (voir figure 45) : parmi les avis d'experts utilisés comme référence, un même tronçon (avec un note N) est évalué en E2 selon certains experts et en E3 selon d'autres experts. Enfin les avis d'experts sont considérés comme subjectifs et imprécis (voir figure 46) : un expert ne peut pas toujours trancher entre deux conclusions possibles (par exemple E2 et E3). Les points situés entre les lignes E2 et E3 indiquent une conclusion vague.

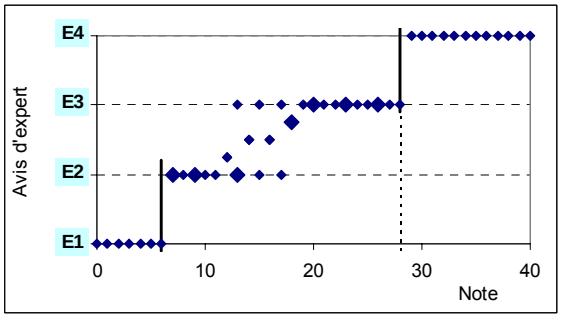


Figure 45 : dispersion des avis énoncés par plusieurs experts

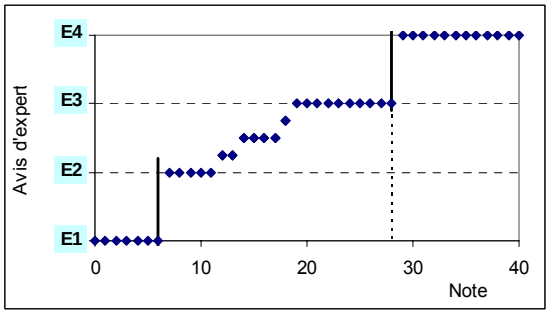


Figure 46 : imprécision de la valeur énoncée par les experts

En conséquence, une perte d'information lors du calcul de la note globale (N) et de la synthèse des avis d'experts peut entraîner une erreur de classification et conduire à une zone de recouvrement. En effet, la définition des sources d'incertitudes sur le calcul de la note N et la modélisation de ces incertitudes afin de calculer un degré de vérité ne fait pas partie de notre recherche. Par contre les indicateurs d'inspections visuelles doivent être évalués en prenant en compte des aspects éventuels de nuance, d'imprécision et de subjectivité. Comme on l'a vu dans le chapitre 4, la théorie des ensembles flous fournit l'outil adapté pour représenter explicitement les informations imprécises, sous la forme de fonctions d'appartenance (Zadeh, 1978b ; Bouchon-Meunier, 1992). Elle aide à éviter de passer brusquement d'un niveau d'évaluation à l'autre (Bouchon-Meunier, 1995) en considérant qu'un tronçon peut appartenir en partie à deux classes successives

lorsqu'il est difficile d'établir un jugement strict. C'est pourquoi, les seuils précis sont remplacés par le calage des seuils flous permettant d'exprimer l'imprécision de la limite entre deux niveaux d'état de santé.

Deux méthodes de calage ont été envisagées : un calage flou sans pondération des erreurs d'affectation (un faux positif est aussi important qu'un faux négatif) et un calage avec pondération des erreurs d'affectation. Dans ce chapitre nous avons appliqué les méthodes de calage proposées sur un cas fictif comme illustration. Cependant, nous avons discuté, dans le chapitre 6, la validité et la sensibilité de ces méthodes et du prototype informatique sur un cas réel.

5.2 Procédure de calage sans pondération des erreurs d'affectation

La perte d'information lors du calcul de la note globale (N) et de l'évaluation des avis d'experts peut entraîner une erreur de classification et conduire à une zone de recouvrement. Cette zone caractérise l'imprécision de la transition entre chaque état. L'imprécision peut être prise en compte par l'approche floue, selon trois volets :

Volet n° 1 : évaluer l'état d'un tronçon pour attribuer une note globale par tronçon, en utilisant les résultats des inspections télévisées (ITV). Tout d'abord, n tronçons sont visualisés par des inspections télévisées et les défauts sont codés en utilisant la norme NF EN 13508-2. Ensuite, chaque code est traduit en une note élémentaire représentant la gravité et l'étendue de l'anomalie vis-à-vis de l'indicateur considéré. Puis une note globale (N) est calculée pour chaque tronçon.

Volet n° 2 : les experts classent chaque tronçon (noté i) selon un avis flou $\mu_K^E(i)$ avec $k \in [1,4]$ (voir figure 47). Cela signifie que chaque tronçon peut être associé selon les experts à l'état K avec un degré d'appartenance $\mu_k^E(i)$, avec :

$$\sum_{k=1}^{4} \mu_k^E(i) = 1 \qquad [39]$$

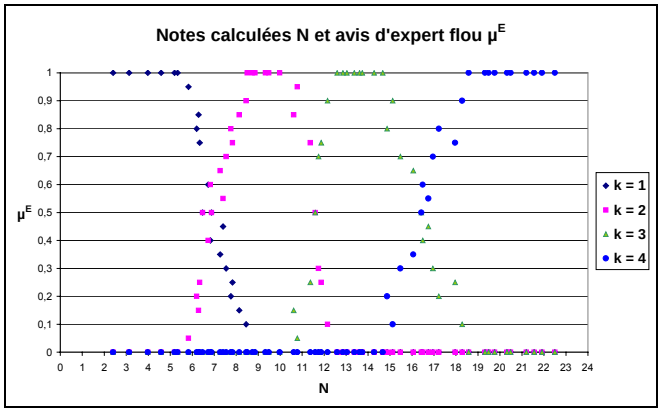


Figure 47: avis d'experts (après visualisation des rapports d'inspections) exprimés sous la forme de degrés d'appartenance, comparés à la note calculée (exemple fictif)

Volet n° 3 : détermination de la fonction d'appartenance à chaque état en fonction des avis d'experts. Cela implique de caler trois seuils flous S_r avec $r = 1/2, 2/3, 3/4$ relatifs aux transitions entre chaque état (voir figure 48).

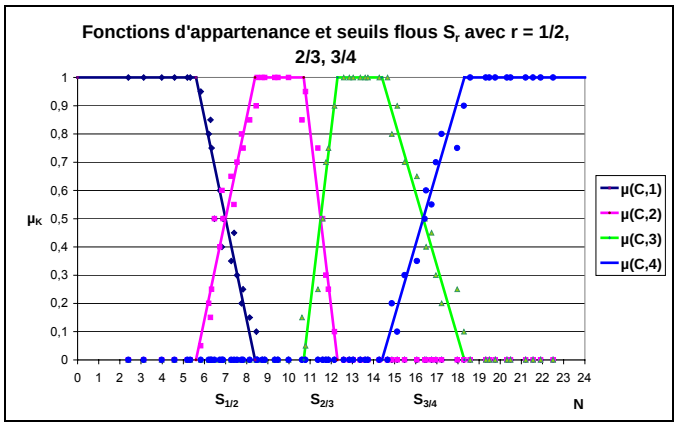


Figure 48 : résultat obtenu après calage des trois seuils flous S_r avec $r = 1/2, 2/3, 3/4$ associées aux quatre états k ($k \in [1,4]$).

La figure 48 montre la forme des trois seuils flous et les quatre sous-ensembles flous correspondant qui doivent être calés afin de traduire la note (N) d'un tronçon en degrés d'appartenance à chacun des 4 niveaux de dysfonctionnement. Cette figure permet de montrer le type de résultats obtenus après application de la procédure de calage. La procédure de calage est décomposée en plusieurs étapes présentées sur la figure 49 :

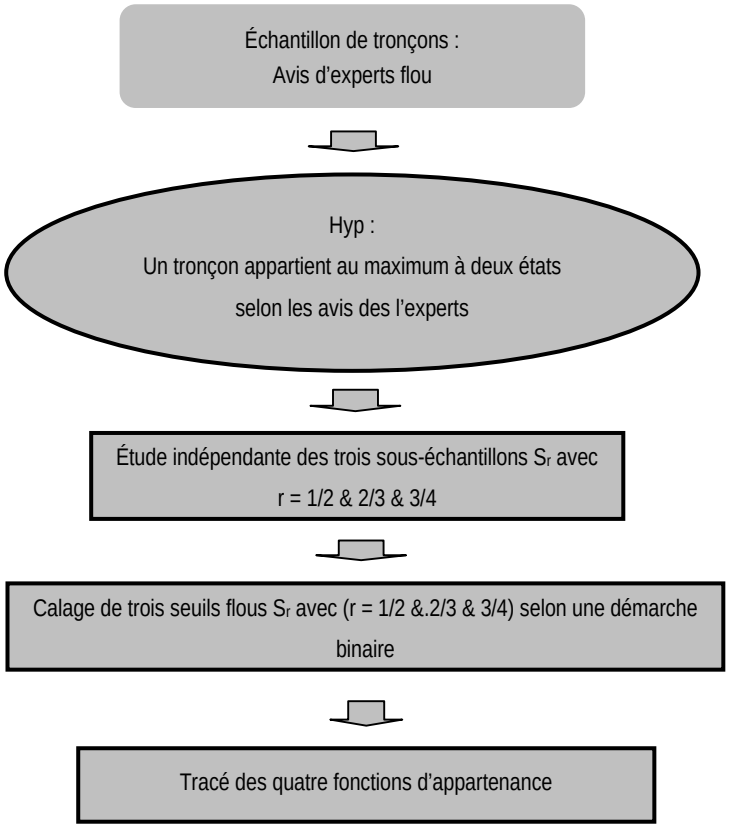


Figure 49 : démarche de calage des trois seuils flous de l'indicateur considéré (volet 3)

Cette démarche consiste à faire l'hypothèse que lorsque chaque expert donne un avis flou, un tronçon appartient au maximum à deux états. Il est ensuite possible d'étudier de manière indépendante chaque seuil flou (ou seuil flou pondérée) pour les caler. Enfin, on peut tracer les quatre sous-ensembles flous correspondant aux quatre états de dysfonctionnement. Nous allons maintenant présenter en détail le calage d'un seuil flou S_r correspondant à l'étude indépendante d'un sous-échantillon.

5.2.1 Détermination d'un seuil flou Sr

Le calage est la détermination du meilleur seuil flou $S_{j/j+1}$ associé aux deux états : état j avec $j \in [1,3]$ et état j+1. Chaque tronçon i ayant la note N_i peut être associé selon les experts à l'état j avec un degré d'appartenance de $\mu_j^E(i)$ et à l'état j+1 avec un degré d'appartenance de $\mu_{j+1}^E(i)$, comme le montre la figure 50.

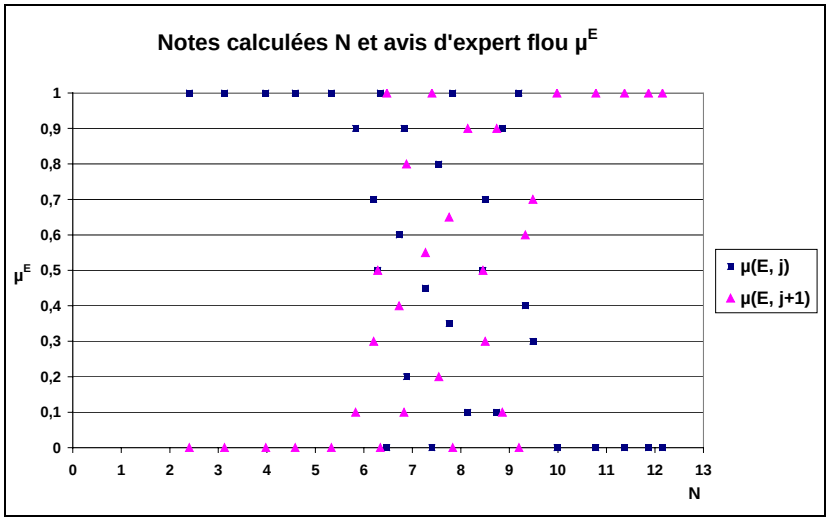


Figure 50 : sous-échantillon (j/j+1) avec $j \in [1,3]$, avis d'experts flous $(\mu_j^E(i), \mu_{j+1}^E(i))$ en fonction des notes calculées N_i

Etant donné la définition des quatre états possibles, il est difficilement conservable physiquement qu'un tronçon soit à la fois jugé en très bon et en très mauvais état. Cela nous permet d'imposer qu'un tronçon appartient au maximum à deux états, et d'après l'équation 39 :

$$\mu_j^E(i) + \mu_{j+1}^E(i) = 1 \qquad [40]$$

Le calage du seuil flou $S_{j/j+1}$ consiste à rechercher les valeurs des paramètres a et b (voir figure 51) qui, sur un sous-échantillon de tronçons, minimisent l'écart E entre l'évaluation floue des experts (servant de référence) et les valeurs floues calculées.

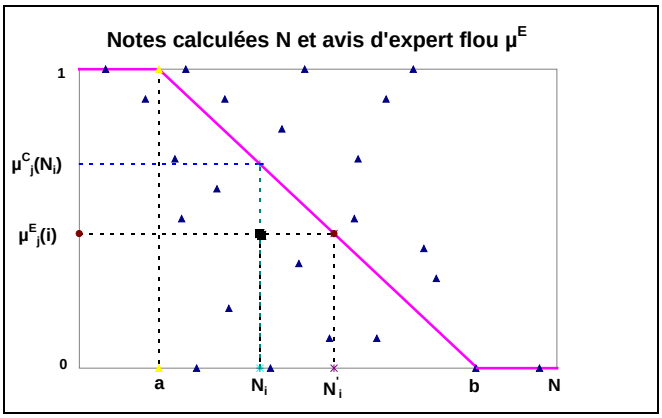


Figure 51 : évaluation d'experts (référence) et valeurs calculées dans le contexte de la logique floue

Pour le calcul de E, on considère deux types d'écart : sur la note N_i et sur l'avis d'experts flou $\mu_j^E(i)$. La figure 52 décrit le cheminement suivi pour caler le seuil flou.

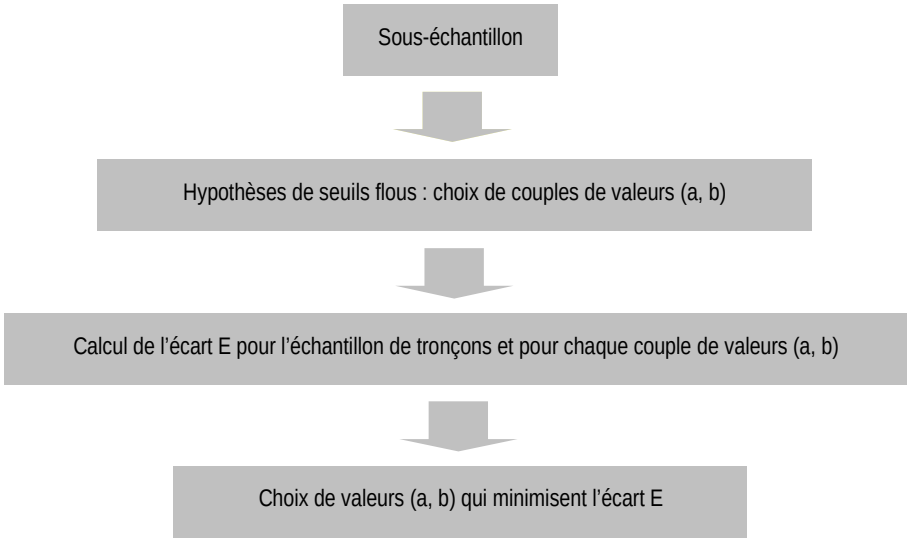


Figure 52 : démarche de calage du seuil flou

Cette démarche consiste à générer les alternatives des seuils flous caractérisées par les valeurs (a, b). Puis on calcule l'écart E pour chaque alternative de seuil flou. Enfin nous choisissons le couple de valeurs (a, b) qui donnent l'écart le plus faible entre l'ensemble des avis d'experts flous et les valeurs calculées. Nous proposons maintenant différentes méthodes de calcul de l'écart E : un écart de note, un écart de fonction d'appartenance et un écart hybride entre ces deux écarts.

5.2.1.1 Calcul de l'écart (E)

Nous proposons trois formules pour le calcul de l'écart E. Ces trois formules sont basées sur la comparaison entre l'évaluation d'experts floue (référence) et les valeurs floues calculées par le seuil flou. Pour cela, on calcule pour chaque tronçon i les différences ΔN_i et $\Delta \mu_i$ selon les équations suivantes :

$$\Delta N_i = \frac{N_i' - N_i}{N_{imax}} \quad [41]$$

Avec :

N_i : la note du tronçon i calculée en fonction des défauts constatés.

N_i' : la note du tronçon i correspondant à la valeur $\mu_j^E(i)$ d'après la fonction d'appartenance (cf. figure 51).

N_{imax} : la note maximum des tronçons (du sous-échantillon).

$$\Delta\mu_i = \mu_j^E(i) - \mu_j^C(N_i) \quad [42]$$

Avec :

$\mu_j^E(i)$: degré d'appartenance du tronçon i à l'état j selon les experts.

$\mu_j^C(N_i)$: degré d'appartenance du même tronçon i à l'état j selon la fonction d'appartenance (cf. figure 53).

Nous sommes ainsi amenés à proposer trois formules, dont nous présentons la démarche dans les paragraphes qui suivent.

5.2.1.1.1 Proposition 1 : écart de fonction d'appartenance

Nous avons retenu la distance euclidienne relative (Kaufmann, 1973). Ce principe vient à l'esprit lorsqu'on est en face de ce type de problème.

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta\mu_i)^2}{n}}$$ avec n : nombre de tronçons de l'échantillon appartenant aux états j et j+1 [43]

L'écart quadratique moyen correspond à la moyenne sur l'ensemble des tronçons des carrés des écarts entre les degrés calculés et exprimés par les experts.

Cet indice mesure la cardinalité flou relative et la similarité entre l'évaluation des experts (référence) et l'évaluation dûe aux seuils (Zadeh, 1985). La cardinalité et la similarité augmentent par la diminution de l'écart E. La figure (53) montre que l'avantage de la proposition (1) est d'établir une zone de transition d'état. Cependant, l'inconvénient majeur est que cette zone représentée par le seuil flou est trop étendue.

5.2.1.1.2 Proposition 2 : écart de note

Nous avons retenu une distance analogue à celle utilisé en flou, par exemple pour la détermination de la C-moyenne floue (Dubois *et al.*, 1985b & 1997) :

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta N_i)^2}{n}} \quad [44]$$

Cet indice de distance donne la moyenne sur l'ensemble des tronçons des carrés des écarts relatifs entre les notes N_i et les notes correspondant N_i'. Comme le montre la figure 53 et au contraire de la proposition (1), la proposition (2) n'établit pas une zone de transition d'état.

5.2.1.1.3 Proposition 3 : écart hybride

C'est une combinaison des propositions précédentes :

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left[(\Delta N_i)^2 + (\Delta \mu_i)^2 \right]}{n}} \qquad [45]$$

Cet indice de distance donne la moyenne des carrés des écarts ΔN_i et $\Delta \mu_i$ (voir équations 41 et 42). La proposition (3) nous a paru la mieux adaptée à notre domaine d'étude car elle donne une zone de transition d'état acceptable (voir figure 53), un compromis entre les solutions 1 et 2 (seuil très large et seuil précis) :

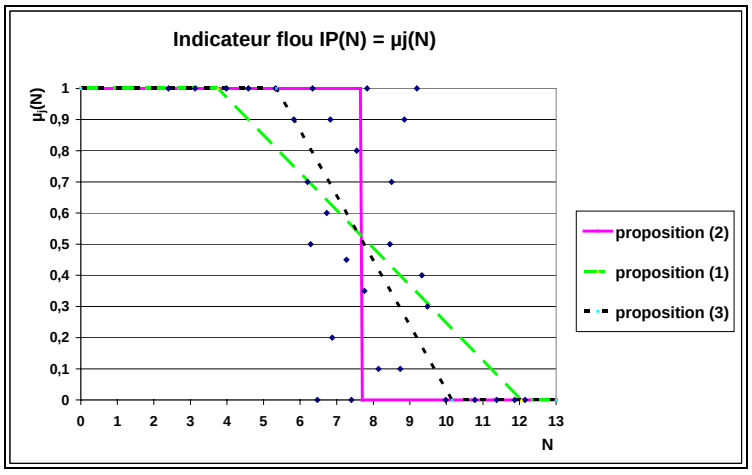


Figure 53 : résultats de calage de l'indicateur flou

En effet une zone de transition très large (proposition 1) ne permettra pas de discriminer correctement les tronçons et une zone de transition verticale (proposition 2) apporte les mêmes inconvénients que lors du calage précis.

5.2.2 Automatisation de la démarche

La méthode est destinée à être mise en oeuvre par les gestionnaires des réseaux d'assainissement. Donc, pour faciliter l'utilisation de cette méthode, un prototype d'outil informatique est proposé. Ce dernier donne une réponse rapide pour ce qui concerne le calage des seuils flous. Ce prototype est une interface programmée avec Visual Basic Application sous Excel. Le choix de ce langage informatique se justifie pour la nature visuelle des applications réalisées. La démarche que nous avons programmée est présentée sur la figure suivante :

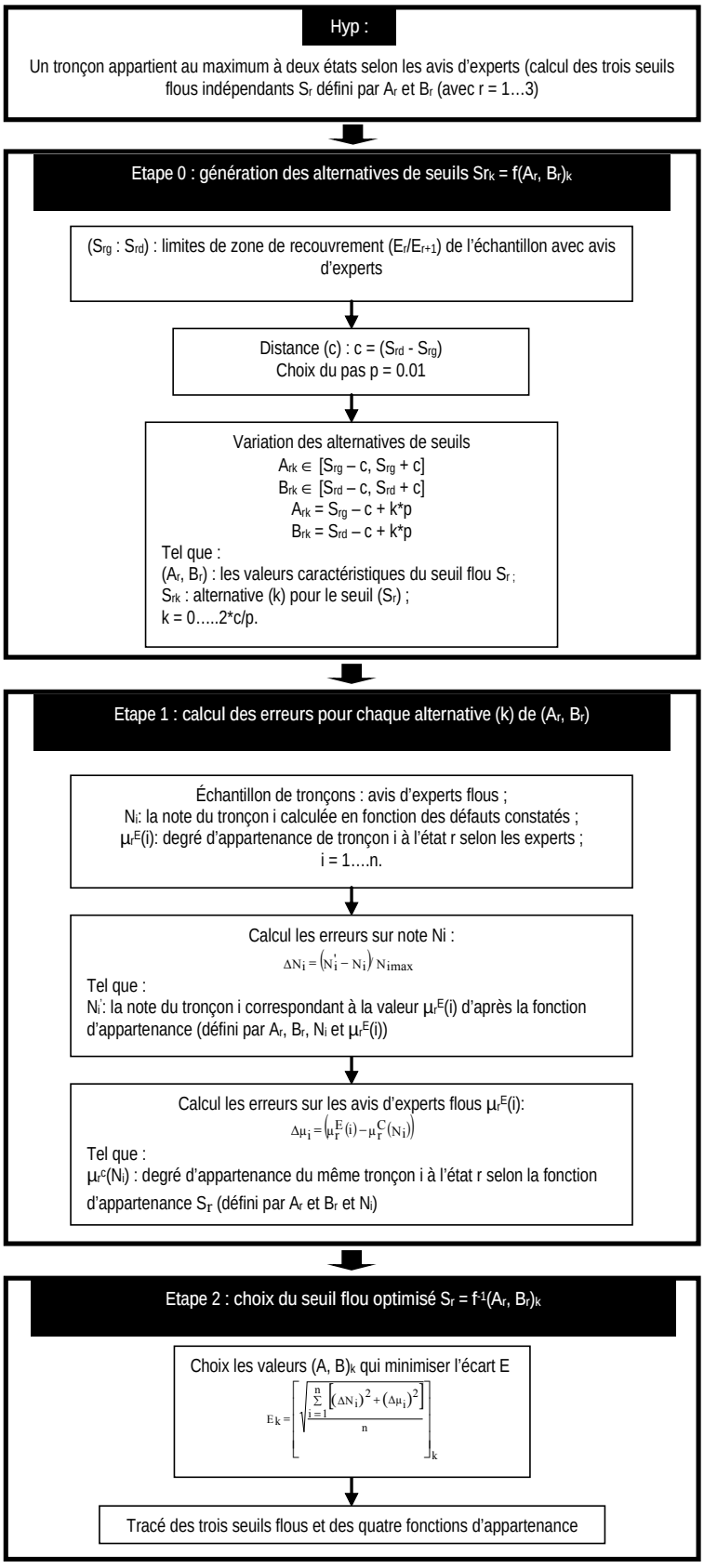


Figure 54 : schéma décrivant le principe de définition des seuils flous $S_{1/2}$, $S_{2/3}$ et $S_{3/4}$ pour l'échantillon avec avis d'experts flous

Nous allons maintenant présenter en détail le calage d'un seuil flou pondéré S_r correspondant à l'étude indépendante d'un sous-échantillon.

5.3 Procédure de calage avec pondération des erreurs d'affectation

Cette procédure est similaire à la procédure précédente, mais elle permet en plus de pondérer les erreurs d'affectation (faux positifs, faux négatifs). La méthode est également destinée à être mise en oeuvre par les gestionnaires des réseaux d'assainissement. Pour cela, un prototype d'outil informatique, programmée avec Visual Basic Application sous Excel, est proposé pour ce qui concerne le calage des seuils flous pondérés.

La démarche que nous avons programmée est présentée sur la figure 56. Cette démarche consiste à générer les alternatives des seuils flous pondérés caractérisées par les valeurs (a, b) (étape 0 - figure 56). Puis on calcule l'écart E pour chaque alternative de seuil flou pondéré (étape 1 - figure 56). Enfin nous choisissons le couple de valeurs (a, b) qui donnent l'écart le plus faible entre l'ensemble des avis d'experts flous et les valeurs calculées (étape 2 - figure 56).

5.3.1 Démarche de pondération

Pour le calcul de E, les gestionnaires fournissent le poids associé à un faux négatif sur μ et N par CFN_μ et CFN_N respectivement et le poids associé à un faux positif sur μ et N par CFP_μ et CFP_N respectivement tel que (voir figure 55) :

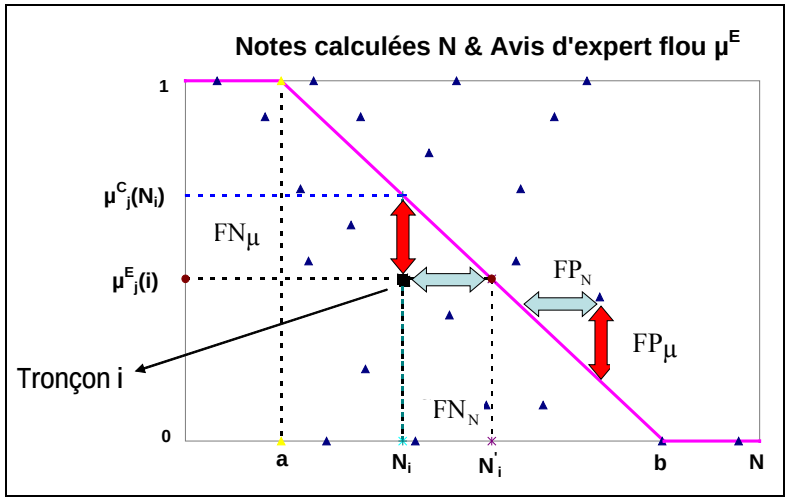


Figure 55 : évaluation d'experts (référence) et valeurs calculées dans le contexte de la logique floue pondérée

Pour cela, on a pondéré deux types d'écart, sur la note N_i selon les équations suivantes (cf. figure 55) :

$$\Delta N_i = \frac{FP_N}{N_{imax}} = \frac{(N'_i - N_i) * CFP_N}{N_{imax}} \quad \text{pour} \quad N'_i < N_i \qquad [46]$$

$$\Delta N_i = \frac{FN_N}{N_{imax}} = \frac{(N'_i - N_i) * CFN_N}{N_{imax}} \quad \text{pour} \quad N'_i > N_i \qquad [47]$$

Et sur les avis d'experts flou $\mu^E_j(i)$ selon les équations suivantes (cf. figure 55).

$$\Delta\mu_i = FP_\mu = \left(\mu^E_r(i) - \mu^C_r(N_i)\right) * CFP_\mu \quad \text{Pour} \quad \mu^C_r(N_i) < \mu^E_i(i) \qquad [48]$$

$$\Delta\mu_i = FN_\mu = \left(\mu^E_r(i) - \mu^C_r(N_i)\right) * CFN_\mu \quad \text{Pour} \quad \mu^C_r(N_i) > \mu^E_i(i) \qquad [49]$$

La formule que nous avons proposée pour calculer de l'écart E (cf. figure 55) est l'équation 45.

5.3.2 Automatisation de la démarche

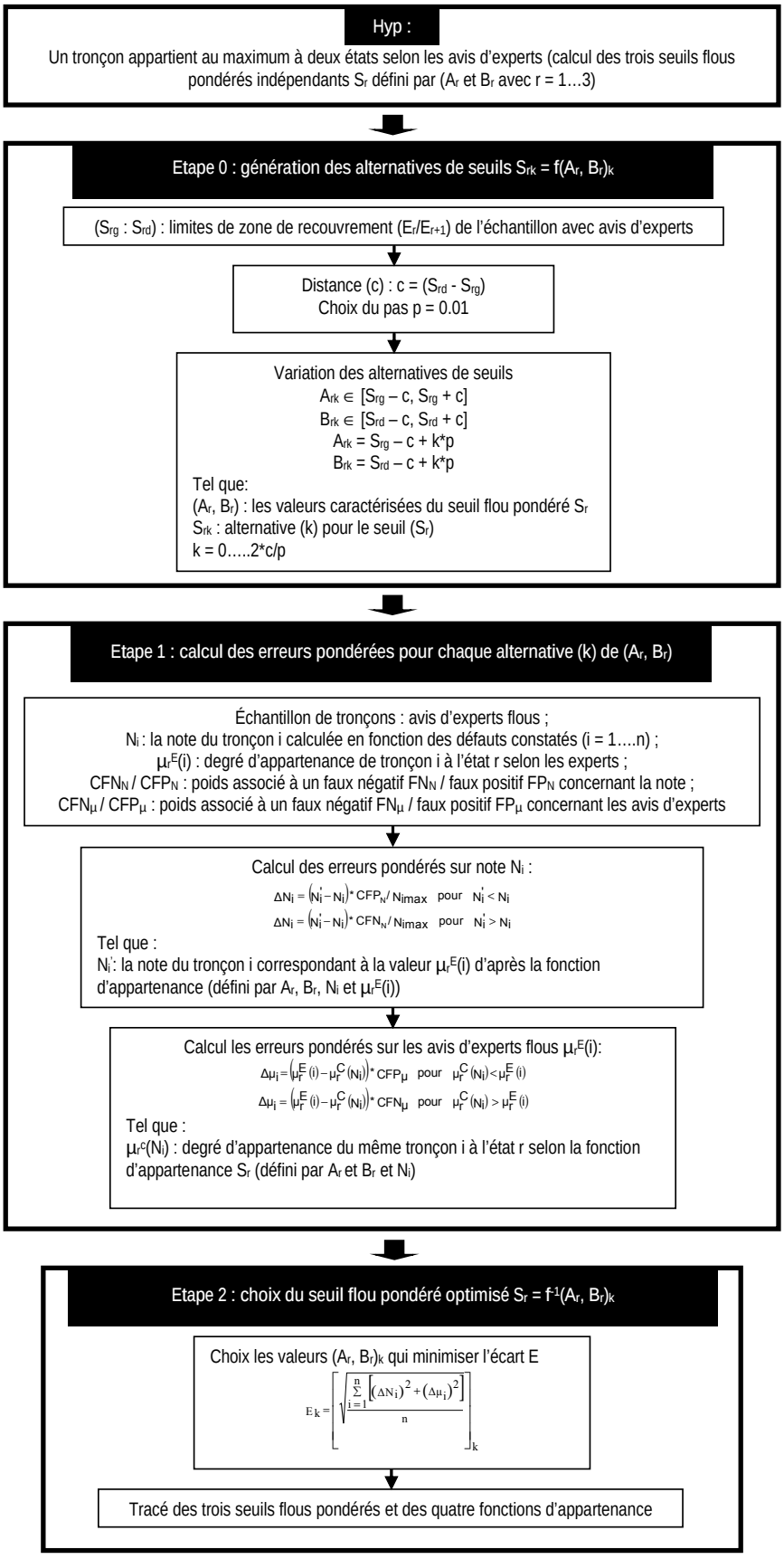


Figure 56 : schéma décrivant la définition des seuils flous pondérés $S_{1/2}$, $S_{2/3}$ et $S_{3/4}$ pour l'échantillon avec avis d'experts flous

5.3.3 Étude de sensibilités vis-à-vis des paramètres économiques

Les valeurs du rapport (CFN/CFP) peuvent avoir des effets importants sur la détermination de la valeur de l'écart E et des seuils flous pondérés correspondants (S_r avec r =1/2 ; 2/3 ; 3/4). Nous avons calculé l'erreur d'affectation $E_{3/4}$ et les valeurs des seuils flous pondérés optimums ($Sr_{3/4}$) correspondant à une gamme de valeurs possibles de rapport CFN/CFP :

Tableau 48 : déplacements du seuil flou pondéré ($Sr_{3/4}$) lors du changement du rapport CFN/CFP

CFN/CFP	$Sr_{3/4}$	
	a	b
1	14.25	18.76
3	13.45	18.36
5	13.15	17.86

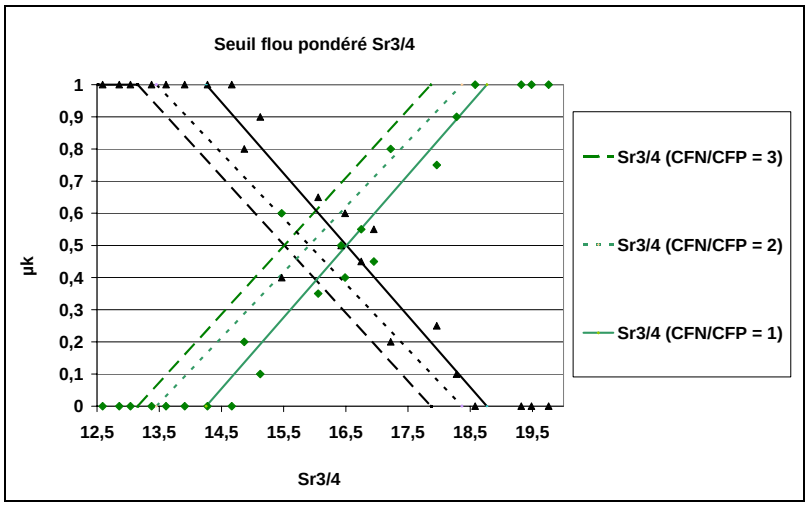


Figure 57 : schéma illustrant les déplacements du seuil pondéré ($Sr_{3/4}$) lors des changements du rapport CFN/CFP

Le tableau et la figure précédents nous permettent de constater qu'en augmentant les valeurs du rapport de CFN/CFP, les valeurs des seuils flous pondérés correspondants (S_i) diminuent (décalage vers la gauche), pour réduire le nombre de faux négatifs.

Pour conclure, la valeur de l'écart E et les valeurs des seuils flous pondérés optimums correspondants (Sr avec r =1/2, 2/3, 3/4) sont sensibles aux variations du rapport CFN/CFP. Ainsi le choix du rapport CFN / CFP par le gestionnaire est important.

5.4 Comparaison des seuils précis et flous

Pour pouvoir comparer les résultats associés aux seuils précis et flous non pondérés, nous avons converti des avis d'experts flous en avis précis afin de remplacer l'échantillon flou par un échantillon précis. Le principe de conversion est présenté par l'équation suivante :

$$\text{si } \mu_k^E(i) > 0.5 \text{ alors } \mu_k^E(i)=1 \text{ et } \mu_{k+1}^E(i)=0 \text{ avec } k=\left[1,\ 3\right] \quad [50]$$

$$\text{si } \mu_k^E(i) < 0.5 \text{ alors } \mu_k^E(i)=0 \text{ et } \mu_{k+1}^E(i)=1 \text{ avec } k=\left[1,\ 3\right] \quad [51]$$

$$\text{si } \mu_k^E(i) = 0.5 \text{ alors } \mu_k^E(i)=1 \text{ et } \mu_{k+1}^E(i)=1 \text{ avec } k=\left[1,\ 3\right] \quad [52]$$

Puis, nous avons calé les trois seuils précis (S1, S2, S3) à l'aide de l'échantillon précis construit (pour CFN/CFP = 1 et 2) selon des procédures du chapitre 2. La figure 58 présente les résultats du calage précis et flou non pondéré.

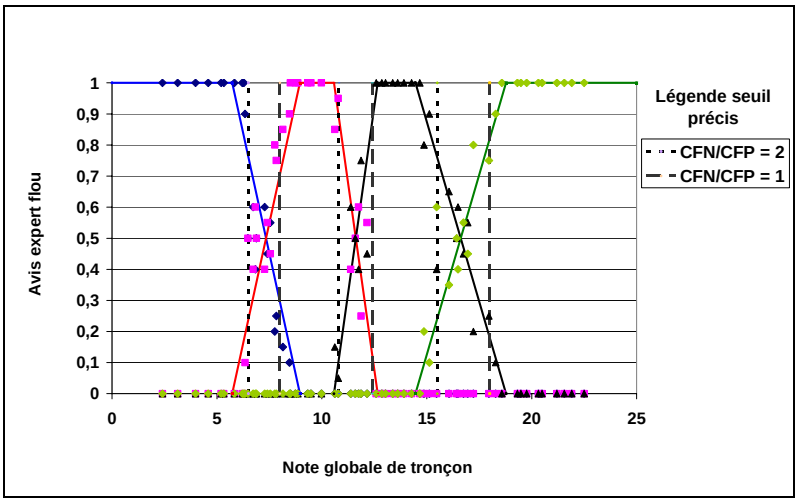


Figure 58 : seuils flous non pondérés et précis (avec CFN/CFP = 1 et CFN/CFP = 2) calés à partir d'un échantillon d'avis d'experts flous

Lors du remplacement des seuils précis par des seuils flous, une note (par. ex: N = 8) n'est plus associée seulement à un état (ici G2) mais à plusieurs (ici à l'état G2 avec un degré d'appartenance de 70% et à l'état G1 avec un degré d'appartenance de 30%). Dans le chapitre 4, nous avons montré les bénéfices attendus en terme de priorité d'intervention grâce à l'utilisation de seuils flous.

5.5 Conclusion et discussion

La théorie des sous-ensembles flous a permis de proposer un outil d'évaluation : l'indicateur flou évalué à partir de résultats d'inspections visuelles. L'évaluation floue permet aux acteurs concernés de prendre des décisions sans ignorer les imprécisions issues des données sur le tronçon et des paramètres de calage.

Le calage des trois seuils flous indépendants a été fait dans l'hypothèse qu'un tronçon appartient au maximum à deux états selon l'avis flou d'experts. Ce calage se base sur la minimisation de l'écart E (pour tous les tronçons concernés) entre l'évaluation floue des experts (servant de référence) et les valeurs floues calculées à partir des seuils étudiés. Cette démarche est destinée à être mise en oeuvre grâce à l'utilisation d'un outil informatique programmée avec Visual Basic Application sous Excel.

Le seuil flou pondéré prend en compte le ratio CFN/CFP. Une étude de sensibilité doit être réalisée de manière analogue à celles que nous présentons dans ce chapitre et au chapitre 6.

Afin d'adapter au mieux les méthodes de calage proposées (précise et floue), nous allons appliquer dans le chapitre 6 ces méthodes sur un cas réel mené dans le cadre du projet INDIGAU.

6 Chapitre 6. Expérimentation 123

6.1 Objectifs 123

6.2 Présentation des cas réels 123

6.3 Application de la méthode de calage des seuils précis 125

6.3.1 Etude de l'échantillon de calage 125

6.3.2 Etude d'un échantillon local 129

6.4 Application des méthodes de calage des seuils flous 133

6.4.1 Détermination des seuils flous 133

6.4.2 Sensibilité des seuils flous vis-à-vis des paramètres économiques 134

6.5 Comparaison des seuils précis et des seuils flous 135

6.6 Conclusion et discussion 135

6 Chapitre 6. Expérimentation

6.1 Objectifs

Nous avons proposé, dans les chapitres 2 et 5, des méthodes pour le calage des seuils précis et flous destinés à définir un niveau de dysfonctionnement à partir de la note de synthèse retenue. Cela nécessite d'évaluer un échantillon de tronçons par un panel d'experts et l'utilisation de modèles de calcul de densités de désordres. L'échantillon déjà utilisé, dans les chapitres 2 et 5, était un cas fictif comme illustration. Nous présentons dans ce chapitre, l'application de ces méthodes de calage proposées sur un cas réel. Il s'agit de :

- un échantillon avec avis d'experts : 37 rapports d'ITV réalisés pour 15 tronçons situés à Strasbourg, 15 tronçons situés dans le Département du Bas-Rhin et 7 tronçons situés à Nantes ;
- un échantillon local : 264 rapports d'ITV issus du patrimoine du Grand-Lyon. Cet échantillon local choisi comprend les notes des tronçons sans les avis d'experts.

Les résultats de ces premières expérimentations permettent de discuter la validité et la sensibilité des méthodes proposées et du prototype informatique. Dans ce chapitre, nous montrons également l'importance de la prise en compte des imprécisions par l'utilisation du calage flou.

6.2 Présentation des cas réels

L'échantillon avec avis d'experts concerne 37 rapports d'ITV. Pour chaque rapport, au moins 1 estimation d'expert est disponible ; dans quelques cas plus de 3 estimations d'experts sont fournies (Werey *et al.*, 2008) (voir figure 59 et tableau 49).

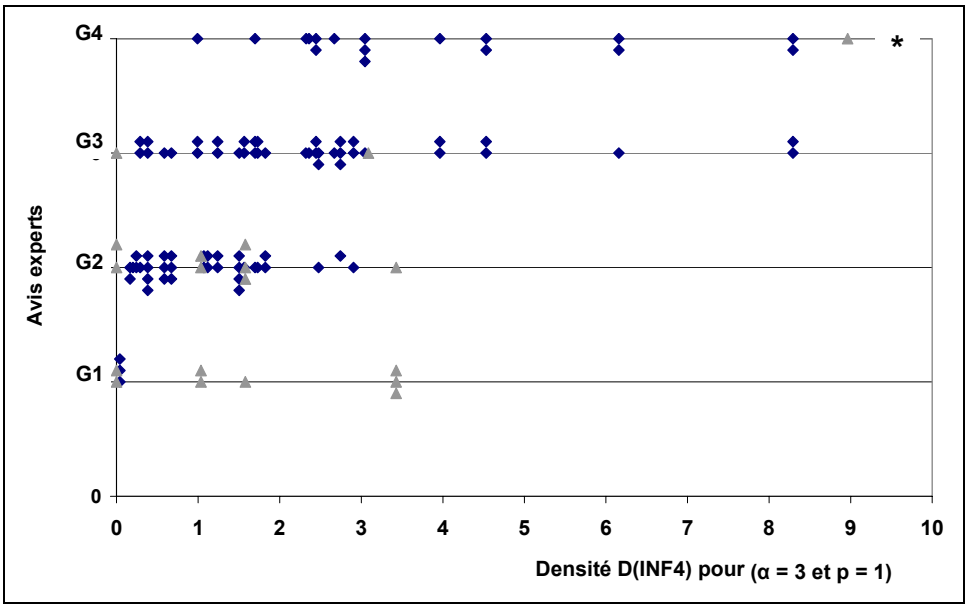


Figure 59 : confrontation entre l'affectation issue du calcul (évaluation d'une note globale) et l'avis d'expert pris pour référence (* deux avis G4 pour D = 20)

La figure précédente présente deux échantillons : échantillon (a) de 30 tronçons en noir (15 à Strasbourg et 15 dans le Bas-Rhin) et échantillon (b) de 37 tronçons (échantillon (a) + 7 tronçons de Nantes en gris). Le tableau suivant présente l'évaluation des 37 tronçons par les experts pour l'indicateur INF4. Seule est conservée la justification en densité des experts (voir procédure b – chapitre 2).

Tableau 49 : avis d'experts et densités pour l'indicateur de dysfonctionnement INF4, réalisés pour 37 rapports d'ITV (15 tronçons situés à Strasbourg, 15 tronçons situés dans le Département du Bas-Rhin et 7 tronçons situés à Nantes)

Tronçon	Densité	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
STG01	2,36		G3				G4		
STG02	3,96		G3	G3			G4		
STG03	1,50		G2				G2	G2	G2/G3
STG04	2,48		G2/G3				G3		
STG05	1,56		G3	G2			G3		
STG06	1,12		G2	G2					
STG07	2,91			G3			G3		G2
STG08	1,73	G2/G3					G3		
STG09	2,32	G3	G3	G3					G2/G3
STG10	2,74	G3	G3						G2/G3
STG11	1,82	G2/G3		G2					
STG12	0,59	G2	G2/G3	G2					
STG13	0,29	G3							G2/G3
STG14	6,16	G3						G4	G4
STG15	0,20								G2
CG01	0,99	G3				G3/G4			
CG02	0,24	G2	G2						
CG03	4,53	G4	G3	G4					G3
CG04	0,17		G2						G2
CG05	1,07		G2						G2
CG06	0,04		G1	G1					G1
CG07	0,38	G2/G3	G2			G2	G3		G2
CG08	1,70	G3	G2/G3					G4	
CG09	1,24		G2/G3			G3			G2
CG10	0,67	G2/G3					G2		G2
CG11	2,32						G4		G3
CG12	2,67	G3					G4		
CG13	3,04					G4	G4	G4	G3
CG14	8,29			G3		G4	G4		G3
CG15	2,45		G3			G4	G4		G3
Nat1	3,43			G2	G1		G1		G1
Nat2	20							G4	G4
Nat3	3,09						G3		
Nat5	1,03			G1	G2		G2		G1
Nat6	8,96								G4
Nat7	0			G1	G2		G1		G2/G3
Nat8	1,58			G1	G2		G2		G2

L'échantillon local est présenté sur la figure suivante :

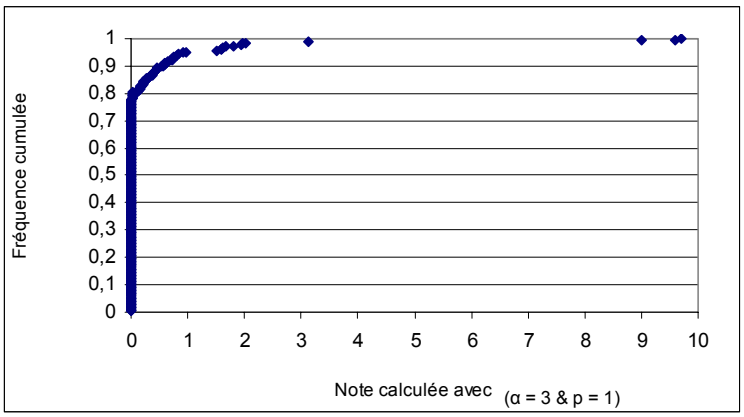


Figure 60 : distribution des notes des tronçons d'un échantillon de 264 tronçons pour (α = 3 & P =1), ITV issues du Grand-Lyon

La figure montre la fonction de répartition des notes des tronçons pour l'échantillon local étudié. La note calculée varie de 0 pour le tronçon le moins défaillant à 9.8 pour le tronçon le plus défaillant. On constate que la majorité des tronçons a une note égale ou proche de 0. De plus l'échantillon ne présente aucun tronçon avec une note comprise entre 3 et 9. On peut conclure que cet échantillon est globalement en très bon état, et de plus l'évaluation du seuil S3 sera difficile à cause du manque de points.

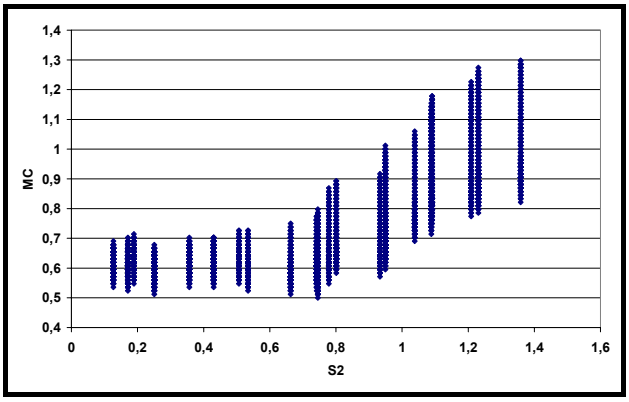
6.3 Application de la méthode de calage des seuils précis

L'échantillon de calage avec avis d'experts utilisé pour cette application est l'échantillon (a) (voir figure 59). L'objectif est de discuter la sensibilité et la validité des méthodes proposées sur des données réelles.

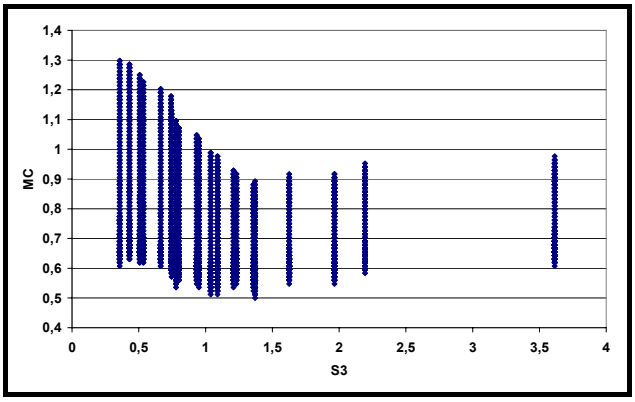
6.3.1 Etude de l'échantillon de calage

6.3.1.1 Détermination des seuils précis

Les seuils (S1, S2 et S3) ont été optimisés selon le critère MC (voir la méthodologie présentée dans le chapitre 2 – 2-4). Nous avons choisi de montrer seulement le calage des seuils dans le cas où les densités sont calculées pour (α = 2 & P = 1) et CFN/CFP = 1, les cas où les densités sont calculées pour (α = 3 et α = 4 & P = 1) seront traitées et calées de la même façon. La figure 61 présente la variation du critère de calage MC en fonction de S2 (figure 61a) et de S3 (figure 61b). Le seuil S1 est fixé et pour chaque valeur de S2, S3 varie (figure 61a) et inversement (figure 61b).



a) calage S2 (S3 varie de 0.4 à 3.6)



b) calage S3 (S2 varie de 0.1 à 1.3)

Figure 61 : optimisation des seuils S2, S3 selon le critère MC

La figure 61 décrit le choix de valeurs des seuils (S2 = 0.745, S3 = 1.37) qui minimise le critère MC. On aurait pu prendre S2 = 0.745 (correspondant à MC mini – figure 61a) et ensuite garder cette valeur pour rechercher S3, mais il nous a semblé intéressant de conserver l'ensemble des points (figure 61b). Les valeurs des trois seuils précis pour les trois cas de calcul de densité et des rapports de coût sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 50 : valeurs des trois seuils calées pour des valeurs différentes de (α & P) et des scénarios CFN/CFP

	CFN/CFP = 1			CFN/CFP = 2			CFN/CFP = 3		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
α = 2 & P = 1	0.064	0.745	1.37	0.064	0.25	1.04	0.064	0.127	0.775
α = 3 & P = 1	0.15	1.5	3.95	0.15	0.65	2.7	0.15	0.48	2.3
α = 4 & P = 1	0.25	2.9	7.6	0.25	1	4.7	0.25	0.76	4.19

Le tableau précédent nous permet de constater que :

- les valeurs des seuils (S1, S2, S3) augmentent quand α augmente car ces seuils sont évalués en fonction des densités calculés à partir de (α & P) ;
- en augmentant les valeurs du rapport (CFN/CFP), les valeurs des seuils diminuent. Ces diminutions s'expliquent par le poids plus important attribué aux faux négatifs (FN), qui doivent être évités, au détriment du nombre de faux positifs (FP). Les seuils se décalent donc vers la gauche.

Suite à ces résultats nous nous sommes posés la question suivante : quelle est la correspondance entre le calage fait avec l'échantillon (a) de 30 tronçons et l'expertise des 30 tronçons utilisés pour ce calage. La réponse à cette question est fournie par l'examen du calage fait avec l'échantillon (a) de 30 tronçons. Les résultats du test sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 51 : résultats du calage fait avec l'échantillon (a) de 30 tronçons (pour CFN/CFP = 1) et ceci pour le cas de calcul de densité (α = 2 & P = 1) vis-à-vis de l'expertise des 30 tronçons de cet échantillon

tronçon	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	calcul
STG01		G3 (ok)				G4 (+1)			G3
STG02		G3 (-1)	G3 (-1)			G4 (ok)			G4
STG03)		G2 (-1)				G2 (-1)	G2 (-1)	G2/G3 (ok)	G3
STG04		G2/G3 (ok)				G3 (ok)			G3
STG05		G3 (ok)	G2 (-1)			G3 (ok)			G3
STG06		G2 (ok)	G2 (ok)						G2
STG07			G3 (-1)			G3 (-1)		G2 (-2)	G4
STG08	G2/G3 (ok)					G3 (+1)			G2
STG09	G3 (ok)	G3 (ok)	G3 (ok)					G2/G3 (ok)	G3
STG10	G3 (ok)	G3 (ok)						G2/G3 (ok)	G3
STG11	G2/G3 (ok)		G2 (-1)						G3
STG12	G2 (ok)	G2/G3 (ok)	G2 (ok)						G2
STG13	G3 (+1)							G2/G3 (ok)	G2
STG14	G3 (-1)						G4 (ok)	G4 (ok)	G4
STG15								G2 (+1)	G1
CG01	G3 (+1)				G3/G4 (+1)				G2
CG02	G2 (ok)	G2 (ok)							G2
CG03	G4 (ok)	G3 (-1)	G4 (ok)					G3 (-1)	G4
CG04		G2 (ok)						G2 (ok)	G2
CG05		G2 (ok)						G2 (ok)	G2
CG06		G1 (ok)	G1 (ok)					G1 (ok)	G1
CG07	G2/G3 (ok)	G2 (ok)			G2 (ok)	G3 (+1)		G2 (ok)	G2
CG08	G3 (ok)	G2/G3 (ok)					G4 (+1)		G3
CG09		G2/G3 (ok)			G3 (+1)			G2 (ok)	G2
CG10	G2/G3 (ok)					G2 (ok)		G2 (ok)	G2
CG11						G4 (+1)		G3 (ok)	G3
CG12	G3 (ok)					G4 (+1)			G3
CG13					G4 (ok)	G4 (ok)	G4 (ok)	G3 (-1)	G4
CG14			G3 (-1)		G4 (ok)	G4 (ok)		G3 (-1)	G4
CG15		G3 (ok)			G4 (+1)	G4 (+1)		G3 (ok)	G3

Nous avons testé le calage fait avec cet échantillon et ceci pour le cas de calcul de **densité** (α = 2, 3, 4 & P = 1) vis-à-vis de l'expertise de ces 30 tronçons utilisés pour ce calage. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 52 : bilan des écarts de classement

	Nb (+3)	Nb (+2)	Nb (+1)	Nb (ok)	Nb (-1)	Nb (-2)	Nb (-3)
α = 2	0	0	13	55	15	1	0
α = 3	0	0	16	60	8	0	0
α = 4	0	0	16	60	8	0	0

Les résultats précédents montrent que le calage fait pour les cas de calcul de densité (α = 2, 3, 4 & P = 1) fournissent de meilleurs résultats avec α = 3 ou 4. Il convient de remarquer qu'un changement d'affectation entre l'état G1 et l'état G2 peut être jugé moins grave qu'un changement d'affectation entre l'état G3 et l'état G4. Nous notons également que le modèle ne peut pas éviter des écarts d'appréciation avec des experts puisque les experts ne sont pas unanimes.

6.3.1.2 Confrontation des résultats avec de nouvelles expertises

Une étape très importante dans l'utilisation du modèle du calage est de déterminer les paramètres de calcul de densité (α & P) qui peuvent être les meilleurs pour le calage. Ceci peut être fait en regardant la stabilité ou bien la sensibilité des résultats obtenus par cette méthode de calage pour l'échantillon (a) de 30 tronçons vis-à-vis de l'expertise de nouveaux tronçons. Pour cela nous avons utilisé l'échantillon de 7 tronçons, situés à Nantes, pour tester le calage fait avec l'échantillon (a) de 30 tronçons. Les résultats sont présentés dans les tableaux 53 et 54. On peut noter, pour certains tronçons, des écarts importants entre avis experts et résultats du modèle. Ces écarts sont explicables par le fait que pour une faible longueur de tronçon la densité calculée peut être élevée avec quelques défauts jugés non critiques par les experts. Par exemple le tronçon Nat 1 (avis calculé : G4) a un longueur d'environ 7 m.

Tableau 53 : comparaison du calage fait (pour CFN/CFP = 1) avec l'échantillon (a) de 30 tronçons et ceci pour le cas de calcul de densité (α = 2 & P = 1) vis-à-vis de l'expertise des 7 tronçons de Nantes

tronçon	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	calcul
Nat1			G2 (-2)	G1 (-3)		G1 (-3)		G1 (-3)	G4
Nat2							G4 (ok)	G4 (ok)	G4
Nat3						G3 (ok)			G3
Nat5			G1 (-1)	G2 (ok)		G2 (ok)		G1 (-1)	G2
Nat6								G4 (ok)	G4
Nat7			G1 (ok)	G2 (+1)		G1 (ok)		G2/G3 (+1)	G1
Nat8			G1 (-2)	G2 (-1)		G2 (-1)		G2 (-1)	G3

Tableau 54 : bilan des écarts de classement

	Nb (+3)	Nb (+2)	Nb (+1)	Nb (ok)	Nb (-1)	Nb (-2)	Nb (-3)
α = 2	0	0	2	8	5	2	3
α = 3	0	0	2	11	4	3	0
α = 4	0	0	2	11	4	3	0

Les résultats précédents montrent que le calage fait pour les cas de calcul de densité (α = 2, 3, 4 & P = 1) fournissent de meilleurs résultats avec α = 3 ou 4. Ces constats nous conduisent à étudier les incertitudes associées au calcul des seuils lors de l'utilisation des 7 tronçons de Nantes. Pour cela, nous avons recalé les trois seuils précis, les résultats de recalage sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 55 : valeurs des trois seuils calés pour des valeurs différentes de (α & P) et pour CFN/CFP = 1

cas a) échantillon (a) de 30 tronçons

	CFN/CFP = 1		
	S1	S2	S3
α = 2 & P = 1	0.064	0.745	1.37
α = 3 & P = 1	0.15	1.5	3.95
α = 4 & P = 1	0.25	2.9	7.6

cas b) échantillon (b) de 37 tronçons

	CFN/CFP = 1		
	S1	S2	S3
α = 2 & P = 1	0.064 (+ 0 %)	0.93 (+ 25 %)	1.96 (+ 43 %)
α = 3 & P = 1	0.15 (+ 0 %)	1.68 (+ 12 %)	4.52 (+ 14 %)
α = 4 & P = 1	0.25 (+ 0 %)	3.4 (+ 17%)	9.27 (+ 22 %)

Les nouveaux seuils calés pour l'échantillon (b) avec 37 tronçons montrent des modifications très importantes. Les modifications viennent du fait de la composition des 7 tronçons de Nantes pour le recalage. On constate également que le seuil S1 ne change pas pour les cas de calcul de densité (α = 2, 3, 4 & P = 1), par contre le seuil S2 est modifié respectivement de 25 %, de 12 % et de 17 %. Le calage fait

pour le cas de calcul de densité (α = 3 & P = 1) présente une faible sensibilité par rapport à (α = 2 ou 4). En conclusion, les comparaisons montrent que :

- les résultats du calage fait avec l'échantillon (a) de 30 tronçons représentent une bonne stabilité lorsqu'on modifie la taille de l'échantillon (30 tronçons en 37 tronçons). Nous prendrons l'échantillon de 30 tronçons pour le calage dans la suite ;
- le cas de calcul de densité (α = 3 & P = 1) est le meilleur pour le calage que ce soit pour 30 ou 37 tronçons.

6.3.2 Etude d'un échantillon local

6.3.2.1 Échantillon considéré comme représentatif du patrimoine à évaluer

Nous faisons l'hypothèse que l'échantillon de 264 tronçons est représentatif du patrimoine du Grand Lyon : le patrimoine est donc jugé en très bon état. Dans ce cas, on applique la méthode proposée dans le chapitre 2 (voir 2-5) en utilisant l'échantillon de calage (a) de 30 tronçons.

Les valeurs des proportions correspondant à chaque état pour les trois cas de calcul de densité (α = 2, 3, 4 & P = 1) sont présentées dans les tableaux suivants (56a et 56b). Ces tableaux (56a et 56b) présentent également la comparaison des cas pour lesquels les densités de tronçon sont calculées pour (α = 3 & P = 1) vis-à-vis de (α = 2 & P = 1) et pour (α = 4 & P = 1) vis-à-vis de (α = 3 & P = 1). Le but de cette comparaison est de voir l'influence du changement de (α).

Tableau 56 : valeurs des proportions et du nombre de tronçons correspondant à chaque état résultant des trois seuils précis calés pour (α = 2, 3, 4 & P = 1) et CFN/CFP = 1

a)

Gj (α = 3) \ Gj (α = 2)	1	2	3	4		
4	0	0	0	3	3	1.2 %
3	0	0	0	0	0	0 %
2	0	44	0	0	44	16.6 %
1	214	3	0	0	217	82.2 %
	214	47	0	3	264	100 %
	81.0 %	17.8 %	0 %	1.2 %	100 %	

b)

Gj (α = 4) \ Gj (α = 3)	1	2	3	4		
4	0	0	0	3	3	1.14 %
3	0	0	0	0	0	0 %
2	0	44	0	0	44	16.6 %
1	217	0	0	0	217	82.2 %
	217	44	0	3	264	100 %
	82.2 %	16.6 %	0 %	1.2 %	100 %	

Pour CFN/CFP = 1, les tableaux 56a et 56b montrent qu'il n'a aucun tronçon en état G3 à cause de l'échantillon local étudié, ce qui a conduit à S2 = S3. Cet échantillon ne comprend aucun tronçon dont les notes varient de 3 à 9, par contre les tronçons dont les notes sont de 0 représentent 80 % (voir 6-2). Les tableaux 56a et 56b montrent également que le nombre de tronçons en états G3 ou G4 est faible (3/264) car l'échantillon local étudié est en très bon état.

Le tableau 56b ne montre aucun changement pour (α = 4 & P = 1) vis-à-vis de (α = 3 & P = 1). Le tableau 56a montre peu de changements du nombre de tronçons dans chaque état : parmi les 217 tronçons en état G1 avec la simulation (α = 3 & P = 1), 214 restent en état G1 avec la simulation (α = 2 & P = 1), 3 passent en état G2.

Le tableau suivant présente les nombres et les taux des tronçons dans chaque état (G1/G2/G3/G4) pour l'échantillon de 264 tronçons, lors de la comparaison des cas (CFN/CFP = 1) vis-à-vis de (CFN/CFP = 2). Le but de cette comparaison est de voir l'influence du changement du rapport CFN/CFP.

Tableau 57 : valeurs des proportions et des nombres de tronçons correspondant à chaque état résultant des trois seuils précis calés pour (α = 3 & P = 1)

Gj(CFN/CFP = 2) \ Gj(CFN/CFP = 1)	1	2	3	4		
4	0	0	0	3	3	1.14 %
3	0	18	0	0	18	6.8 %
2	0	26	0	0	26	9.8 %
1	217	0	0	0	217	82.2 %
	217	44	0	3	264	100 %
	82.2 %	16.6 %	0 %	1.14 %	100 %	

Le tableau montre des changements du nombre de tronçons dans chaque état : parmi les 44 tronçon en état G2 avec la simulation (CFN/CFP = 1), 26 restent en état G2 avec la simulation (CFN/CFP = 2), 18 passent en état G3 (le rapport CFN/CFP = 2 permet d'obtenir S2 ≠ S3). Ces diminutions s'expliquent par le poids plus important attribué aux faux négatifs (FN), qui doivent être évités, au détriment du nombre de faux positifs (FP).

Cependant nous posons la même question que nous avons posé au (1-3-1) : quels sont les paramètres de calcul de densité (α & P) qui peuvent être les meilleurs pour le calage. Ceci peut être fait en regardant les changements associés au calcul des proportions correspondant à chaque état pour les trois cas de calcul de densité (α = 2, 3, 4 & P = 1) lors de la prise en compte des 7 tronçons de Nantes. Pour cela nous avons recalculé le nombre de tronçons dans chaque état en utilisant l'échantillon (b) avec 37 tronçons. Les résultats du calcul sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 58 : valeurs des proportions et des nombres de tronçons correspondant à chaque état résultant des trois seuils précis calés pour échantillon a et b, et avec (α = 2, 3 & P = 1) et CFN/CFP = 1

a) (α = 3 & P = 1)

Gj (échantillon b) \ Gj (échantillon a)	1	2	3	4		
4	0	0	0	3	3	1.14 %
3	0	0	0	0	0	0 %
2	0	43	0	0	43	16.2 %
1	217	1	0	0	218	82.57 %
	217	44	0	3	264	100 %
	82.2 %	16.6 %	0 %	1.14 %	100 %	

b) (α = 2 & P = 1)

Gj (échantillon b) \ Gj (échantillon a)	1	2	3	4		
4	0	0	0	3	3	1.14 %
3	0	0	0	0	0	0 %
2	0	43	0	0	43	16.2 %
1	214	4	0	0	218	82.57 %
	214	47	0	3	264	100 %
	81.06 %	17.8 %	0 %	1.14 %	100 %	

Pour pouvoir comparer les résultats des tableaux précédents nous proposons la somme du nombre de tronçons situés en diagonale comme un indice reflétant la validation présentée par le calage fait avec l'échantillon (a) de 30 tronçons vis-à-vis de la prise en compte des nouveaux tronçons. Le calcul de cet indice pour les trois cas de calcul de densité et de rapport de coût est présenté dans le tableau suivant :

Tableau 59 : validation (%) du calage pour les trois cas de calcul de densité et de rapport de coût

	CFN/CFP = 1
α = 2 & P = 1	260 (260/264)
α = 3 & P = 1	263 (263/264)
α = 4 & P = 1	262 (262/264)

Les résultats de ces simulations montre que le calage fait pour le cas de calcul de densité (α = 3) présente une meilleure validation que les autres calages (α = 2, 4).

6.3.2.2 Échantillon considéré comme non représentatif du patrimoine à évaluer

Nous faisons maintenant l'hypothèse que l'échantillon de 264 tronçons est non représentatif du patrimoine du Grand - Lyon. Dans ce cas, on applique la méthode proposée dans le chapitre 2 (voir 2-6). Le tableau 61 suivant présente le nombre et les taux des tronçons dans chaque état (G1/G2/G3/G4) pour l'échantillon de 264 tronçons. Nous comparons les seuils obtenus pour différentes hypothèses de patrimoine :

Tableau 60 : proportions correspondant à différentes hypothèses de patrimoine

Jeu	P1 = P2 (%)	P3 = P4 (%)	Etat de patrimoine
J1	40	10	bon
J2	25	25	intermédiaire
J3	10	40	mauvais

Le but de cette comparaison est de voir l'influence du changement des proportions (P1, P2, P3 et P4). Les tableaux suivants présentent la comparaison entre les cas pour lesquels les seuils sont calés avec (J1 ou J2 - tableau 61a) et avec (J3 ou J2 - tableau 61b).

Tableau 61 : valeurs des proportions et des nombres de tronçons correspondant à chaque état résultant des trois seuils précis calés avec (α = 3, P = 1) et (CFN/CFP = 1)

a)

Gj (J1) \ Gj (J2)	1	2	3	4		
4	0	0	0	3	3	1.14 %
3	0	0	0	0	0	0 %
2	0	43	4	0	47	17.8 %
1	214	0	0	0	214	81.06 %
	214	43	4	3	264	100 %
	81.06 %	16.28 %	1.51 %	1.14 %	100 %	

b)

Gj (J3) \ Gj (J2)	1	2	3	4		
4	0	0	0	3	3	1.14 %
3	0	14	4	0	18	6.8 %
2	0	29	0	0	29	11 %
1	214	0	0	0	214	81.06 %
	214	43	4	3	264	100 %
	81.06 %	16.28 %	1.51 %	1.14 %	100 %	

Le tableau précédent nous permet de constater qu'une hypothèse de mauvais état du patrimoine correspond bien à une augmentation du nombre de tronçons à réhabiliter, et inversement. Cette variation est limitée puisque le calage dépend également des deux échantillons. Les valeurs des $P(Ei)$ avec $i = 1.....4$ sont donc des facteurs importants pour le calage. Cela montre l'importance de la connaissance du patrimoine et donc l'importance de l'historique (voir chapitre 1). Nous proposons d'évaluer plus précisément l'influence des hypothèses de P (E) sur le calage, à travers deux méthodes basées sur la comparaison du calage avec l'échantillon (a) et l'échantillon (b) et une troisième méthode exposée au chapitre 2 :

- la première approche évalue les incertitudes associées au calcul des seuils lors de l'utilisation des 7 tronçons de Nantes. Pour cela, nous avons recalé les trois seuils précis, les résultats de recalage sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 62 : valeurs des trois seuils calés pour des valeurs différentes de P(E) avec CFN/CFP = 1 et (α = 3 & P = 1)

cas a) échantillon (a) de 30 tronçons

	CFN/CFP = 1		
	S1	S2	S3
J1	0.15	2.9	3.9
J2	0.15	1.9	3.2
J3	0.15	0.63	2.5

Cas b) échantillon (b) de 37 tronçons

	CFN/CFP = 1		
	S1	S2	S3
J1	0.26 (+ 70 %)	3.2 (+ 10 %)	4.5 (+ 15 %)
J2	0.26 (+ 70 %)	2.5 (+ 32 %)	4 (+ 25 %)
J3	0.36 (+ 140 %)	0.92 (+ 52 %)	3.8 (+ 52 %)

Les nouveaux seuils calés pour l'échantillon (b) avec 37 tronçons montrent des modifications très importantes en fonction du jeu utilisé. Les modifications viennent du fait de la composition des 7 tronçons de Nantes pour le recalage. Le calage des seuils (S1, S2, S3) fait pour le jeu J1 présente une plus faible sensibilité par rapport aux calages faits pour les jeux (J2 et J3).

- la deuxième approche est l'indice reflétant la validation (voir 6-3-2-1 tableaux 58 et 59). Le calcul de cet indice pour le cas de calcul de densité (α = 3, P = 1) et le rapport de coût (CFN/CFP = 1) est présenté dans le tableau suivant, l'échantillon a est comparé à l'échantillon b :

Tableau 63 : validation et validation relative (%) du calage pour tous les cas de proportions d'état P(E) avec (α = 3, P = 1) et CFN/CFP = 1, l'échantillon a vs échantillon b

J	P1 = P2 (%)	P3 = P4 (%)
J 1	40	10
J 2	25	25
J 3	10	40

	l'indice de la validation
J1	256 (256/264)
J2	252 (252/264)
J3	238 (238/264)

Nous constatons que les validations relatives dépendent de l'hypothèse sur l'état du patrimoine. Les résultats de ces simulations montre que le calage fait pour le jeu J1 présente la meilleure validation.

- la troisième approche permet de choisir un jeu d'hypothèses. L'application de la méthodologie proposée en chapitre 2 (voir 3-6-2) donne les résultats présentés sur le tableau suivant :

Tableau 64 : les simulations réalisées pour évaluer les $MC_{l,m}$ pour une gamme de CFN = {1, 3, 10}

		Jeux de distribution réelle sur un site (m)		
		Jeu (1)	Jeu (2)	Jeu (3)
Jeux utilisé pour le calage (l)	Jeu (1)	0,14	0,34	0,38
	Jeu (2)	0,22	0,30	0,36
	Jeu (3)	0,39	0,36	0,32

Nous constatons que en augmentant les différences entre jeux l et m, la différence relative entre deux coûts ΔMC^* augmente. Cela montre l'importance de la connaissance du patrimoine et donc l'importance

de l'historique (voir chapitre 1). Le tableau 65 présente le jeu à sélectionner selon le critère utilisé pour comparer les 3 jeux possibles.

Tableau 65 : jeu de $P(E_i)$ retenu selon les critères utilisés

Critère utilisé	choix des meilleurs jeux (I)
Espérance Mathématique	J1
WALD	J1
HURWICZ	J2
SAVAGE	J1

On peut conclure que le jeu J1 est le meilleur pour le calage selon 3 critères envisagés.

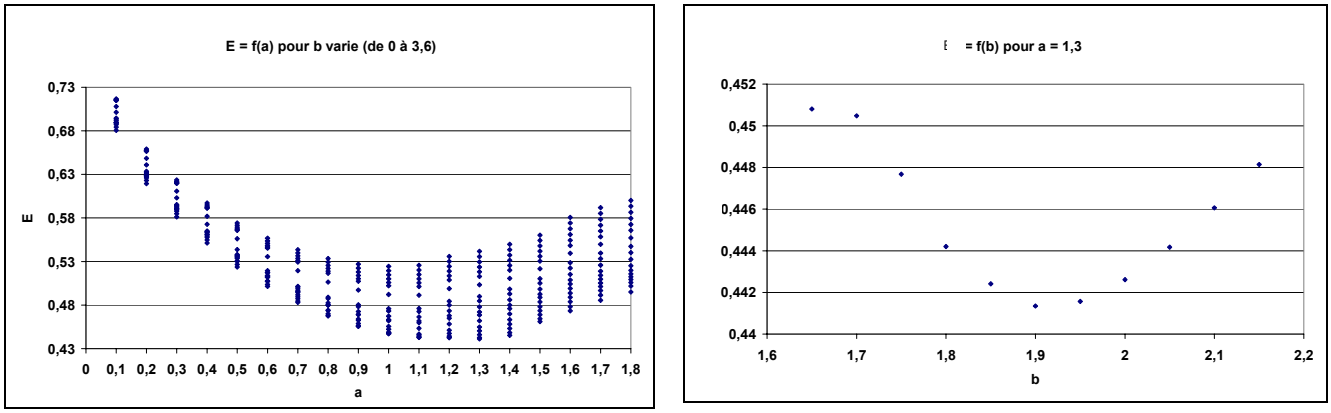
6.4 Application des méthodes de calage des seuils flous

L'échantillon de calage avec avis d'experts utilisé pour cette application est l'échantillon (a) (voir figure 61). L'objectif est de démontrer l'importance de la prise en compte des imprécisions en utilisant le calage flou.

6.4.1 Détermination des seuils flous

En cohérence avec les résultats du calage précis (voir 6-3), les densités des 30 tronçons de l'échantillon réel (a) (voir figure 59) sont calculées pour (α = 3 et p = 1). La figure 63 présente les résultats du calage flou appliqué sur cet échantillon réel.

Dans la suite, nous détaillons l'application des outils proposés dans le chapitre 5 pour caler les trois seuils flous (voir figure 63). Nous avons choisi de montrer seulement le résultat du calage du seuil $S_{2/3}$; les autres seuils ($S_{1/2}$, $S_{3/4}$) sont traitées et calés de la même façon. La figure 62 décrit le choix du couple de valeurs (a, b), caractérisant le seuil flou $S_{2/3}$, qui minimise le critère E (voir chapitre 5 - page 115 - équation 45). Les couples (a, b) caractérisant les trois seuils flous sont présentés dans le tableau 66 et la figure 63 :



a) calage de a (b varie de 0 à 3.6)

b) calage de b pour a = 1.3

Figure 62 : optimisation des paramètres (a et b) caractérisant le seuil flou possible, selon le critère E pour (α = 3 & P = 1) et CFN/CFP = 1

Tableau 66 : paramètres (a, b) choisis, caractérisant les seuils flous possibles pour (α = 3 & P = 1) et CFN/CFP = 1

	a	b
Seuil 1/2	0,15	0,15
Seuil 2/3	1,3	1,9
Seuil 3/4	2,3	5,6

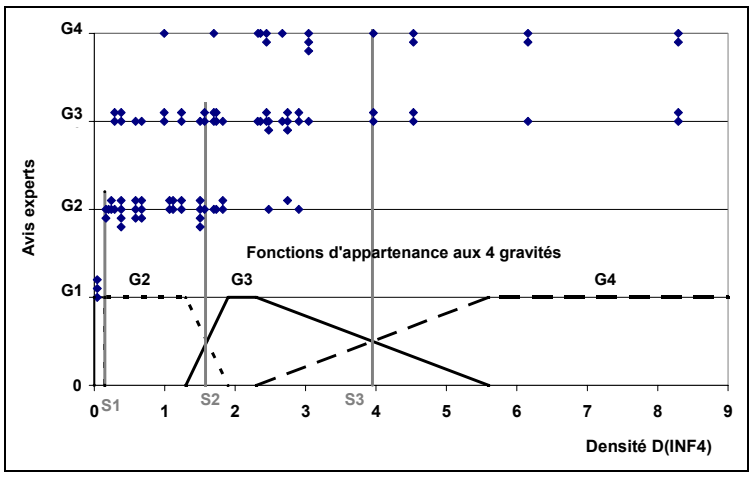


Figure 63 : tracé des trois seuils flous calés et des quatre sous-ensembles flous correspondant pour (α = 3 & P = 1) et CFN/CFP = 1

La figure précédente montre la forme des trois seuils flous et des quatre sous-ensembles flous correspondant qui ont été calés afin de traduire la note de densité (D) d'un tronçon choisi en degrés d'appartenance à chaque état G1, G2, G3, G4 de dysfonctionnement.

6.4.2 Sensibilité des seuils flous vis-à-vis des paramètres économiques

Le tableau 67 et la figure 64 montrent les valeurs des paramètres (a, b) quand le rapport (CFN/CFP) augmente.

Tableau 67 : paramètres (a, b) calées pour (α = 3 & P = 1) et pour des valeurs différentes de CFN/CFP

	CFN / CFP = 1		CFN / CFP = 1.5		CFN / CFP = 2	
	a	b	a	b	a	b
Seuil 1/2	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Seuil 2/3	1,3	1,9	1,1	1,6	0,9	1,4
Seuil 3/4	2,3	5,6	2	3,2	1,5	2

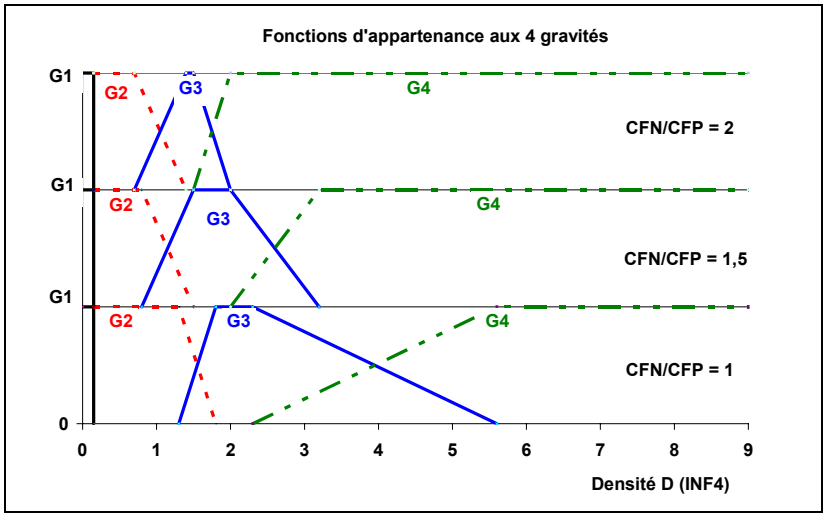


Figure 64 : déplacements des seuils pondérés lors du changement du rapport CFN/CFP avec (α = 3 & P = 1)

La figure montre que le seuil S½ ne change pas car il n'y a pas d'erreur d'affectation. Nous constatons qu'en augmentant le rapport CFN/CFP les valeurs des paramètres a et b diminuent pour réduire le nombre de faux négatifs. Le paramètre b diminue plus vite que le paramètre a. La diminution des intervalles flous est en cohérence avec la baisse de l'imprécision quand le gestionnaire fait une hypothèse forte (« je ne veux surtout pas de faux négatif »).

6.5 Comparaison des seuils précis et des seuils flous

Pour pouvoir comparer les résultats des seuils précis et flous, nous avons appliqué la méthodologie proposée dans le chapitre 5 (voir 5-5), pour une condition fixée de ($\alpha = 3$ &P = 1 et CFN/CFP = 1) :

- nous avons déterminé la fonction d'appartenance à chaque état à partir des avis d'experts flous. Cela a impliqué de caler trois seuils flous pondérés S_r (avec r =1/2 ; 2/3 ; 3/4) (voir figure 63) ;
- nous avons calé les trois seuils précis (S1, S2, S3) à partir de l'échantillon précis converti (voir figure 63) ;

Lors du remplacement des seuils précis par des seuils flous (voir figure 63), une note n'est plus associée seulement à un état mais à plusieurs. Il est aussi possible de voir l'imprécision associée à chaque seuil : dans la figure 63, les zones de transition entre les états G1 et G2, et G2 et G3 sont limitées. Par contre la zone de transition entre les états 3 et 4 est très étalée. On constate également figure 63, que le recouvrement est très important entre les 2 sous-ensembles flous G3 et G4 du fait du petit échantillon provisoire étudiée. La comparaison des résultats précis et flous permet de montrer les bénéfices apportés par le calage en terme de priorité d'intervention. Si l'on considère l'ensemble des tronçons jugés en état G3 par le calage précis ces tronçons seront classés par le calage flou :

- en état G3 voire G2 pour $D < 1.9$;
- en état G3 à 100 % pour $1.9 \leq D \leq 2.3$;
- en état G3 voire 4 pour $D > 2.3$.

Ainsi, on constate que le classement des tronçons (selon leur état) pourra être affiné avec le calage flou (par exemple parmi les tronçons en état G3 précis, seuls seront réhabilités les tronçons en état G3 voire G4 flou).

6.6 Conclusion et discussion

L'application des méthodes de calage proposées sur le cas réel menée dans le cadre du projet INDIGAU illustre la validité du prototype informatique proposé et la sensibilité de la méthode proposée. En effet, ces expérimentations ont montré que :

- nous observons des déplacements légers des seuils précis (ou bien flous) et des nombres de tronçons correspondant à chaque état lors du changements des paramètres (α & P) ;
- les valeurs de ($\alpha = 3$ & P = 1) semblent actuellement fournir les meilleurs résultats de calage ;

- le rapport CFN/CFP est un facteur important permettant de contrôler efficacement les erreurs d'affectation ;
- le seuil précis est très sensible aux variations d'hypothèse de P(E). Il est préférable de s'appuyer sur un échantillon représentatif du patrimoine pour faire le calage ;
- la comparaison des résultats précis et flou permet de dire que l'utilisation de seuils flous permet d'induire des nuances en prenant en compte des aspects éventuels d'imprécision ;
- dans le cas du calage flou, l'augmentation du rapport CFN/CFP conduit à réduire l'imprécision (c'est-à-dire la taille des seuils flous).

Ces constatations montrent l'importance des hypothèses (P(E) et CFN/CFP) : le gestionnaire doit être vigilant et conscient de l'implication de ses choix. En l'absence d'études plus poussées sur les paramètres économiques et/ou en l'absence d'échantillon représentatif, des études de sensibilité devraient être menées pour relativiser les conclusions sur certains tronçons.

Conclusion générale

Le Projet National RERAU (terminé en décembre 2004) a permis d'élaborer un système d'indicateurs de performance répondant aux besoins de gestion patrimoniale et de proposer un ensemble de critères pour la définition des priorités de réhabilitations (Le Gauffre *et al.*, 2004). Les objectifs de nos travaux s'inscrivant dans le projet INDIGAU étaient de compléter et d'améliorer l'outil RERAU. La mise en œuvre de l'outil RERAU a nécessité de paramétrer, de valider et de fiabiliser des critères. Pour ce faire, nous avons apporté quatre réponses qui sont étroitement liées aux limites de l'outil RERAU :

Réponse 1 : concernant les indicateurs de dysfonctionnement précis évalués à partir de résultats d'inspections visuelles. Les propositions de la méthodologie RERAU pour la construction de ces indicateurs sont pertinentes et constituent donc un réel outil pour évaluer les dysfonctionnements sur les tronçons à partir des ITV. Cet outil performant a été paramétré et mis en œuvre efficacement par la définition d'une méthode de calage des seuils pour aider les gestionnaires de réseaux d'assainissement à prendre une décision rationnelle. Cet outil permet de transformer une évaluation numérique en niveau de dysfonctionnement. L'application expérimentale de cet outil a montré :

- la stabilité des seuils précis calés vis-à-vis des paramètres (α, P). Les valeurs de ($\alpha = 3$ & $P = 1$) semblent actuellement fournir les meilleurs résultats de calage ;
- l'importance du rapport des coûts CFN/CFP dans le calage des seuils. Pour cela, les choix pour les coûts CFN/CFP doivent être fournis par le gestionnaire en fonction des pratiques (actions et dépenses occasionnées par un classement en niveau G4 ou G3). En l'absence d'études sur ces coûts on propose de remplacer les coûts par des coefficients d'importance relative des différentes erreurs de classement ;
- l'influence de $P(Ei)$ avec $i = 1....4$ dans le calcul du coût global des erreurs d'affectation. Une méthodologie de choix du meilleur jeu P(Ei) pour le calage a été proposé. Les jeux de valeurs de $P(Ei)$ utilisés pour le calage doivent être proches de la réalité du site étudié. Cela montre l'importance de la connaissance du patrimoine ;
- l'importance de prendre en compte l'imprécision des seuils précis par l'approche floue.

Réponse 2 : porte sur l'analyse critique de la formulation des critères de réhabilitation de *RERAU* afin de vérifier si elle est en accord avec les intentions des experts. Cette analyse se base sur le classement des indicateurs en fonction de leur niveau d'influence, de la détection d'anomalies potentielles de formulation et de la caractérisation de la distribution du critère.

L'étude des 31 critères de RERAU ainsi que les conclusions associées pourront être obtenues dans le rapport T4-1 INDIGAU. L'ensemble de ces conclusions a été discuté lors d'une réunion du projet INDIGAU réunissant différents experts (gestionnaires et chercheurs). **Cette réunion a mis en évidence**

des critères acceptables (pas de modifications nécessaires) et non acceptables (l'analyse a conduit les experts à proposer des modifications/améliorations de certains indicateurs).

Nous pouvons conclure que seul IC (importance relative d'un indicateur au sein d'un critère) est nécessaire pour caractériser le niveau d'influence des indicateurs au sein d'un critère. C'est cet indice, associé à IAP (indice d'anomalie potentielle) et à la distribution du critère, qui sera nécessaire lors d'une prochaine étude.

Réponse 3 : présente le passage au flou pour les critères de RERAU. Le modèle RERAU ne traite pas explicitement de la qualité des données utilisées et des connaissances (les tableaux). Pour traiter ces imprécisions rencontrées, un modèle basé sur la logique floue a été proposé. Lors de l'étude de certains critères, nous avons constaté que le modèle flou proposé, permet de :

- saisir **l'imprécision de l'évaluation d'un tronçon selon l'indicateur et propager cette imprécision dans l'évaluation du critère ;**
- définir une conclusion qui intègre l'information sur la contradiction ;
- apporter une plus grande **robustesse** des évaluations des critères ;
- **représenter plus finement** la hiérarchie des priorités ;

Réponse 4 : présente le passage au flou pour les indicateurs évalués à partir de résultats d'inspections visuelles. Les seuils précis ne prennent pas en compte les imprécisions des données (densités de désordres & avis d'expert précis). L'évaluation floue permet d'exprimer l'imprécision de la limite entre deux niveaux d'état de santé. Le seuil flou pondéré prend en compte le ratio CFN/CFP. L'application expérimentale de cet outil proposé a montré :

- que le seuil flou apporte une **plus grande robustesse** des évaluations des indicateurs ;
- que l'augmentation du rapport CFN/CFP conduit à **réduire l'imprécision** (c'est-à-dire la taille des seuils flous) ;
- les bénéfices apportés en terme de hiérarchie des priorités de réhabilitation.

Afin de faciliter les expérimentations, nous avons mis au point un outil Visual Basic sous Excel. Cet outil sera donc utile pour donner une première version du logiciel à destination des gestionnaires. Les gestionnaires doivent faire des hypothèses concernant les paramètres CFN (i, j), CFP (i, j), voire également les proportions $P(E_i)$. Nous proposons différentes études de sensibilité associées à ce paramétrage.

Perspectives

Ce travail devrait permettre de faire avancer les recherches concernant la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement. Nous avons également pu étudier quelques aspects de l'application de la méthodologie RERAU et plus particulièrement l'évaluation et l'agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous. **Cependant, ces études ont débouché sur un certain nombre de recommandations et de pistes à approfondir. Les perspectives suivantes montrent qu'il reste encore matière à réfléchir sur ce sujet**. Il y a en effet deux niveaux de perspectives :

- le premier concerne directement le calage des seuils, cela nécessite de définir les coefficients CFN et CFP. Deux coefficients principaux ont été proposés, **mais il serait préférable de fournir une aide aux gestionnaires pour définir les coefficients en fonction** :
    - des coûts financiers
    - des coûts environnementaux

  L'évaluation des coûts financiers peut se faire en fonction des actions associées aux différents niveaux de dysfonctionnement. Si le tronçon est classé en niveau G1 ou G2 de dysfonctionnement, a priori, aucune procédure n'est engagée. En cas de classement en niveau G3, des procédures d'investigation peuvent être lancées. En cas de niveau G4, des procédures d'investigation plus poussées, voire de réhabilitation seront lancées. A l'opposé, un niveau de dysfonctionnement important non détecté provoquera une détérioration encore plus poussée de la canalisation et engendrera ainsi des coûts de réparation plus importants voire des dommages sur l'environnement du tronçon. Quoi qu'il en soit, nous pensons que le rapport CFN/CFP doit être étudié pour chaque niveau de dysfonctionnement et ne doit pas être global.

  Concernant les coûts environnementaux, différents cas de pollution sont à envisager, chacun amenant à un coût environnemental. Ensuite, les faux négatifs devront être reliés aux pollutions qu'ils peuvent engendrer.

- ensuite, d'autres axes de travail sont envisageables, tels que le calage de trois seuils en flous des échantillons locaux non représentatifs et des échantillons locaux représentatifs du patrimoine à évaluer. En parallèle, **une expérimentation** peut également être menée **avec des échantillons locaux non représentatifs et des échantillons locaux représentatifs du patrimoine à évaluer. Il serait intéressant de tester les méthodes proposées sur de vrais jeux de données, et de voir si les résultats sont comparables.**

Références bibliographiques

AFNOR (1981). Inventaire de départ d'un contrat de maintenance et expertise de l'état des biens durables à usage industriel et professionnel, NF X60-100, Paris AFNOR.

AFNOR (1996). Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments - Partie 1 : Généralités et définitions. EN 752-1.

AFNOR (2003). NF EN 13508-2 : Condition des réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments. Partie 2 : système de codage de l'inspection visuelle, Paris, 124 p.

AGHTM (1999). Les ouvrages d'assainissement non visitables : fiches pathognomoniques. Techniques Sciences Méthodes, p. 23-90.

AGHTM (2003). Exploitation et maintenance des réseaux d'eau potable et d'assainissement. Conférence Internationale ASTEE (AGHTM), POLLUTEC, Paris-Nord/Villepinte.

Alegre H. (2007). Strategic infrastructure asset management: concepts, 'schools' and research needs, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

Alexandre O., Werey C., Elnaboulsi J. (1994). Optimisation des échéances de renouvellement. Colloque sur le renouvellement des réseaux d'eau potable Lyon, 20-21 octobre, AGHTM, 87-102.

Ana E., Bauwens W., Pessemier M., Thoeye C., Gueldre G. (2007). Sewer deterioration modelling in HYDROPLAN. LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom

Ancelle T. (2002). Statistique épidémiologique. Editions Maloine, ISBN 2224027060 , 300 p.

Angot C. (1991). Prise en compte du coût social pour la promotion de techniques innovantes de pose de conduites. Mémoire de DESS Gestion de la technologie et de l'innovation, Université Paris IX Dauphine, CGE, 87 p.

ASTEE (2004). Inspection visuelle des réseaux d'assainissement : des recommandations à la normalisation. TSM – Techniques Sciences Méthodes : 33-39.

Baur R, Herz R (2002). Selective inspection planning with aging forecast for sewer types. Water Science & Technology, 46 : 389-396.

Benetto E. (2002). Evaluation de l'Incertitude des Impacts environnementaux du Cycle de Vie (EI2 CV) et conception de l'éco-innovation : application à la filière charbon. Thèse de doctorat : INSA de Lyon /laboratoire LAEPSI, 295 p.

Berland J.M. (2004). Réhabilitation des réseaux d'assainissement en zone rurale, Document technique FNDAE n°32, 115 p.

Berrah L. (2002). L'indicateur de performance : concepts et applications. CEPADUES éditions, 171 p.

Bloch I. (2005). Fusion d'informations numériques : panorama méthodologique. Actes des 5e Journées Nationales de la Recherche en Robotique. Guidel, 5-7 octobre, p. 79-88.

Bloch I. and Hunter A. (2001). Fusion : General Concepts and Characteristics. Int J Intell Syst, 16(10), 1107–1134.

Boinel G. (1995). « Le vieillissement des réseaux d'assainissement ». Mémoire ENGEES, 110 P.

Boissier D & Al-Hajjar, J. (1993). Système Interactif d'Aide à la décision (SIAD) et incertain en génie civil. EUROPIA, Delft.

Bonnal P (2004). Where do we stand with fuzzy project scheduling? Journal of construction engineering and management, 130(1), p 114-128.

Borne P., Rozinoer J., Dieulot (1998). Introduction à la Commande Floue, Paris, TECHNIP, 102 p.

Bouchon- Meunier B. (1992). La logique floue, Que-sais-je ? PUF, N° 2702 Presse Universitaire Française.

Bouchon-Meunier B. & Marsala C. (2003b). Traitement de données complexes et commande en logique floue. Hermes science publications, 229 p.

Bouchon-Meunier B. (1995). La logique floue et ses applications. Addison Wesley édition, 257 p.

Bouchon-Meunier B., Marsala C. & Rifiqi (2003a). M. Logique floue, principes, aide à la décision. Hermes science publications, 252 p.

Boudon J., Martin M., Vanden Bossche B., Luço J., Darrées A.P. &. Brodard E. (2007). IS4AM: an information system framework for asset management, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

Bradley A.P. (1997). "The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms "Pattern Recognition, 30(7), 1145-1159.

Breysse D & Vasconcelos E. (2001b). «Valuation of management strategies for sewer system performances». 3rd Int. Conf. On Decision Making in Urban and Civil Engineering, DMUCE, London, p7.

Breysse D., Le Gauffre P., Werey C., Lample M., Laffréchine K. (2001a): « Modélisation des pratiques de gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement non visitable ». XIXème rencontres Universitaires de Génie Civil, COSS', p190-195.

Brueck T. & Blankenship L. (2007). Benchmarking enables utilities to identify asset management best practices in North America, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

Bruyelle J.C. (1999). L'inspection vidéo et la gestion des réseaux d'assainissement. Techniques Sciences Méthodes, p. 76-83.

CERTU (Coord.) (2003). La ville et son assainissement. Principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau. Lyon (France) : CERTU. ISBN : 2-11- 093143-4.

Cherguy S. (1996). Le vieillissement des réseaux d'assainissement. Mémoire de CES Mastère « Eau potable et assainissement », ENGEES Strasbourg, Sept, 57p.

Correc O. (2005). Approche possibiliste de prédiction des risques de dégradation des réseaux de distribution d'eau à l'intérieur des bâtiments. Thèse de Doctorat de l'Université de Marne la Vallée.

Cremona C. (2002). Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. Paris (France) : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 451 p.

Curt C. & Boissier D. (2008). Utilisation de la théorie des possibilités pour l'évaluation de la performance des barrages. 26e Rencontres de l'AUGC (Association Universitaire du Génie Civil), Université de Nancy, juin 4 - 6. Actes sur CD-ROM, 8p.

Delfosse G. (2001). La politique technique de restauration du réseau routier national. In : Journées scientifiques et techniques du CETMEF, 2, 3 et 4 octobre (2).

Dirksen J., Goldina A., Ten Veldhuis J.A.E., Clemens F.H.L.R. (2007). The role of uncertainty in urban drainage decisions: uncertainty in inspection data and their impact on rehabilitation decisions. 2nd Leading Edge Conference on Strategic Asset Management. Lisbon, Portugal, 17-19 Oct, 11 p.

Dorchies D. (2005). « Etude de l'applicabilité de l'outil d'aide à la décision RERAU pour la réhabilitation des réseaux d'assainissement sur l'inventaire du département du Bas-Rhin. » Mémoire de fin d'études : ENGEES Strasbourg, UMR Gestion des Services Publics, 62 p. + annexes.

Dubois D. & Grabisch M., Mouzon O., Prade H. (1985b). Logique floue, principes, aide à la décision, classification et diagnostic, p 154-155.

Dubois D. & Prade H. (1985a). Théorie des possibilités. Applications à la représentation des connaissances en informatiques. Paris : Masson.

Dubois D. & Prade H. (1988). Possibility theory: an approach to computerized processing of uncertainty. Plenum press.

Dubois D. & Prade H. (1997). The three semantics of fuzzy sets. Fuzzy Sets and Systems 90, P 141-150.

Dubois D. & Prade H. (1998). An introduction to fuzzy systems. Clinica Chimica Acta 270, P 3–29.

Egan J.P. (1975). Signal Detection Theory and ROC Analysis. Series in Cognition and Perception. Academic Press, New York.

Elkjaer J. (2007). Asset Management in Copenhagen Energy Sewerage Department, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

EPA (2003). Asset management: a handbook for small water systems, Environmental Protection Agency, August 2005, USA.

Essa R. (2007). Contribution à l'intégration des incertitudes dans l'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments. Thèse de Doctorat de l'Université de Marne la Vallée.

Fawcett T. (2001). "Using rule sets to maximize ROC performance". In Proceedings of the IEEE International Conference on Data Mining (ICDM), p.131-138.

Ferri C., Flach P.; Hernández-Orallo J. (2002). "Learning Decision Trees using the Area Under the ROC Curve", inC. Sammut; A. Hoffman (eds.) "The 2002 International Conference on Machine Learning"(ICML), IOS Press, Morgan Kaufmann Publishers, p. 139-146.

FHWA (1999). Asset Management Primer [en ligne]. U.S. Department of Transportation-Federal Highway Administration Office of Asset Management, Disponible sur : http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/asstmgmt/amprimer.pdf.

Flach P.; Blockeel H.; Ferri C.; Hernández-Orallo J.; Struyf J. (2003). "Decision Support for Data Mining: Introduction to ROC analysis and its applications "in Data Mining and Decision Support: Integration and Collaboration, Kluwer Academic Publishers, Boston.

Georgescu V. (2002). Capturing and Tuning Nonlinear Characteristics of Economic Stabilization Systems by Fuzzy Control Techniques. University of Craiova, Romania, Kluwer Academic Publishers, Computational Economics 19 : 247-271.

Goyon Leroux V. (2006). Élaboration d'une politique d'entretien routier [en ligne], Journée technique : Systèmes d'Informations Routiers. Aix-en-Provence, Jeudi 8 juin Disponible sur : http://cete-aix.fr/div/CD_ROM_SIR/index.htm.

Grabisch M., Orlovski S.A., and Yager R.R. (1998). Fuzzy aggregation of numerical preferences. In: The Handbook of Fuzzy Sets Series, Vol. 4: Fuzzy Sets in Decision Analysis, Operations Research and Statistics. R. Slowinski (ed), Kluwer Academic, 31-68.

Hadj-Ali A. (1996). Raisonnement approché dans les systèmes experts – Méthodes basées sur les ensembles flous. 4th Maghrebain Conference on Software Engineering and Artificial Intelligence, p. 215-224.

Hadj-Ali A. MIRACII (1995). Moteur d'inférence pour le raisonnement approché sur des connaissances imprécises et incertaines. Proceedings of the 2sd International Symposium on Programming and Systems. Alger, p 1-16.

Hahn M., Palmer R., Merrill S., Lukas A. (2002). Expert System for Prioritizing the Inspection of Sewers: Knowledge Base Formulation and Evaluation. J. of Water Resources Planning and Management 128(2) P 121–129.

Haidar H. (2006). Réhabilitation des réseaux d'eau potable : méthodologie d'analyse multicritère des patrimoines et des programmes de réhabilitation. Thèse de doctorat : INSA de Lyon /laboratoire LGCIE, 225 p.

Hand D.J. & Till R.J. (2001). "A Simple Generalisation of the Area under the Classification Problems", Machine Learning, 45, pp. 171-186. ROC Curve for Multiple Classes.

Hansruedi B. (1994). Réglage par la logique floue, presses polytechniques et universitaires ROMANDES, 181 p.

Haskins S. (2006). Case study - Seattle (US). IWA World Water Congress, Session Workshop on Strategic Asset Management, Benchmarking and Performance Indicators, September 11, Beijing, China.

Heywood G., Pearman C., Lumbers J. (2007). Advances in the modelling and optimisation of sewerage infrastructure investment planning, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

Ibrahim M., Cherqui F., Le Gauffre P., Werey C. (2007b). Sewer asset management: from visual inspection survey to dysfunction indicators. 2nd Leading Edge Conference on Strategic Asset Management. Lisbon, Portugal,17-19 Oct, 11 p.

Ibrahim M., Le Gauffre P., Cherqui F.et Werey C. (2007a) Gestion des réseaux d'assainissement : évaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir d'inspections visuelles, 25e rencontres de l'AUGC (Association Universitaire du Génie Civil), Université de Bordeaux, mai 23 - 25. Actes sur CD-ROM, 6 p.

IFEN (2002). Les évolutions récentes de l'assainissement. Les données de l'environnement n°76, Institut français de l'environnement 4 p.

Jenicek M. (1995). Epidemiology: the logic of modern medicine. Montreal (Canada): EPIMED.

Kanso A. (2004). Evaluation des modèles de calcul des flux polluants des rejets urbains par temps de pluie, Thèse à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 245 p.

Kaufmann A. (1973). Introduction à la théorie des sous-ensembles flous Tome 1 : Eléments théoriques de base, Editions Masson et Cie ; Paris; 410 p.

Lair J. (2000). Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment. Thèse de doctorat, université Blaise Pascal- Clermont II, 212 p.

Lane T. (2000). "Extensions of ROC analysis to multi-class domains". In Dietterich, T., Margineantu, D., Provost, F., & Turney, P. (Eds.), ICML- Workshop on Cost-Sensitive Learning.

Le Gauffre P., Ibrahim M. and Cherqui F. (2008). Sewer asset management: fusion of performance indicators into decision criteria. In Cabrera & Pardo (ed.) Performance Assessment of Urban Infrastructure Services. Drinking water, waste water and solid waste. London (UK) : IWA publishing, 195-205.

Le Gauffre P., Joannis C., Breysse D., Gibello C., Desmulliez J.J. (2004). RERAU : Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains. Guide méthodologique. Paris : Lavoisier Tec&Doc, 416 p., ISBN 2-7430-0748-6.

Le Gauffre P., Joannis C., Vasconcelos E., Breysse D., Gibello C., Desmulliez J. J., (2007). Performance indicators and multi-criteria decision support for sewer asset management, Journal of Infrastructure System, 13(2), 105-114.

Le Gauffre P., Ruffier J., Tanguy C., Laffréchine K., Miramond M., Perraudin L.., Richard F. (2001). Projet CAPTUR : Consolidation d'un cadre d'Analyse des Patrimoines Techniques Urbains de type Réseau. Cas des réseaux d'eau et d'assainissement, Ministère de l'éducation Nationale, de la Recherche et de la Technologie, INSA LYON / Unité de Recherche Génie Civil – Hydrologie Urbaine, Décision d'aide n° 99 V 0492.

Malhis M. (2002). Contrôle actif modal flou des rotors flexibles par plan d'action piézoelectrique. Thèse de doctorat : INSA de Lyon / Laboratoire de Mécanique des Structures (UPRESA CNRS 5006), 125 p.

Martin T. Johnson D. Anschel S. (2007). Using historical repair data to create customized predictive failure curves for sewer pipe risk modelling, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

Matos R., Cardoso A., Ashley R., Duarte P., Molinari A., Schulz A. (2003). Performance Indicators for Wastewater Services. IWA (International Water Association) Manual of best practice. London

(UK) : IWA Publishing, 192 p. ISBN : 1900222906.

Mauris G., Benoit E., Foulloy L. (1996). The aggregation of complementary information via fuzzy sensors. Measurement .17(4), 235-249.

Merrill S., Lukas A., Palmer R., Hahn M. (2004). Development of a tool to prioritize sewer inspections. Final report. Alexandria (VA): Water Federation Research Foundation.

Mousseau V. (1993). Problèmes liés à l'évaluation de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision : Réflexions théoriques, expérimentations et implémentations informatiques. Thèse de doctorat : Université Paris-Dauphine.

NF EN 13508-1 (2002). État des réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments. Partie 1 : exigences générales. Paris (France) : AFNOR, 13 p.

NF EN 13508-2 (2003). Condition des réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments. Partie 2 : système de codage de l'inspection visuelle. Paris (France) : AFNOR, 124 p.

NF EN 752-1 (1996). Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments. Partie 1 : généralités et définitions. Paris (France) : AFNOR, 12 p.

NF EN 752-2 (1996). Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments. Partie 2 : prescriptions de performances. Paris (France) : AFNOR, 24 p.

NF EN 752-3 (1996). Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments. Partie 3 : établissement de l'avant-projet. Paris (France) : AFNOR, 28 p.

NF EN 752-4 (1997). Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments Partie 4 : conception hydraulique et considérations liées à l'environnement. Paris (France).

NF EN 752-7 (1998). Réseaux d'évacuation et d'assainissement à l'extérieur des bâtiments. Partie 7 : entretien et exploitation. Paris (France) : AFNOR, 33 p.

NF P15-900-1 (2000). Services publics locaux. Lignes directrices pour les activités de service dans l'alimentation en eau potable et dans l'assainissement. Partie 1 : service à l'usager. Paris (France) : AFNOR, 41 p.

NF P15-900-2 (2001). Services publics locaux. Lignes directrices pour les activités de service dans l'alimentation en eau potable et dans l'assainissement. Partie 2 : gestion d'un réseau d'assainissement. Paris (France) : AFNOR, 44 p.

Orman N.R. et Lambert J.E., (2004). Manual of sewer conditions classification, WRc, UK., 160 pages. - ISBN 1 898920 50 8.

Petroivc D., Roy R., Petroivc R., (1998). « Modelling and simulation of a supply chain in an uncertain environment », European Journal of Operations Research, vol. 109, p. 299–309.

Poinard (2006). Modèles pour la conception de stratégies et de programmes de réhabilitation des réseaux urbains d'eau potable. Thèse de doctorat : INSA de Lyon, 225 p.

Procaccia H. & Suhner M-C. (2003). Démarche bayésienne et applications à la sûreté de fonctionnement. Paris Lavoisier, 411 p.

Quick C. (2007). Institutional, organisational and research aspects: asset management system, the corner stone of managing an asset rich industry, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

Rahman S. & Vanier D.J. (2004). Municipal Infrastructure Investment Planning Report: An Evaluation of Condition Assessment Protocols for Sewer Management, Ottaw (Canada) NRC – CNRC, Report No: B-5123.6, Contract No: B-5123, Program: Urban Infrastructure Program, 20 p.

Rahman S., Vanier D.J., Newton L. (2005). Municipal Infrastructure Investment Planning Report: Social Cost Considerations for Municipal Infrastructure Management, May, Report No: B-5123.8, Contract No: B-5123, Program: Urban Infrastructure Program, 20 p.

Remaley T.A., Sampson L. M., Deleo M.J., Remaley. A. N; Farsi B. D., AND Zweig. M. H., (1999). Prevalence-value accuracy plots: a new method for comparing diagnostic tests based on misclassification costs. Clinical Chemistry, 45:7 pp. 934-941.

RERAU (1998). Méthodologie de programmation de réhabilitation des collecteurs visitables. Paris (France) : Ministère de l'Équipement / DRAST / Projet National RERAU, 68 p. + annexes.

Roy B. (1972). Décision avec critères multiples : Problèmes et méthodes, Revue METRA, Vol. XI, n° 1, 121-151.

Sægrov S. (Ed.) (2006). CARE-S - Computer Aided Rehabilitation for Sewer and Storm water Networks, IWA Publishing, ISBN: 1843391155, 140 p.

Sægrov, S. & Schilling, W. (2004a). Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks (CARES). 2nd International Congress "Advanced Management of Urban Drainage". Barcelona, Spain.

Sægrov, S. & Schilling, W. (2004b). Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks (CARES), COST (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research) 624 Final Meeting, Aix-en-Provence.

Schulting F. L (2007). Global developments of strategic asset management, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

Serre D. (2005). Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. Thèse de doctorat : Université de Marne-la-Vallée, 363 p.

Shafer G. (1976) A mathematical theory of evidence. Chichester (west Sussex) Ed : Princeton university press, , 297 p.

Sklar D. & West R. (2007). Implementing an asset management approach to capital investment planning, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

Talon A. (2006). Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction. Thèse de doctorat, université Blaise Pascal- Clermont II, 240 p.

Vanier D. J. & Rahman S. (2004). MIIP Report: A primer on municipal infrastructure asset management, National Research Council Canada, (71 pp.), Disponible sur : http://irc.nrc cnrc.gc.ca/pubs/fulltext/b5123.3/b5123.3.pdf, ref. July.

Vanier D. J. (2001). Why industry needs asset management tools. Journal of Computing in Civil Engineering, 15 (1), 35-43.

Vanrenterghem-Raven, A.; Hafskjold, S.; Rostum, J.; Laughter, G.; Simpson, P. (2007). Planning the rehabilitation of the Las Vegas distribution network using CARE-W, LESAM 2007, IWA & LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

Vasconcelos E C. & Le Gauffre P. (2003b). Evaluate the risk of deficiencies of sewer pipes using results CCTV inspection. 17th European Junior Scientist Workshop, Rehabilitation management of urban infrastructure networks 3-7, Dresde, (8).

Vasconcelos E .C., Breysse D., Desmulliez J.J., Cholin B. (2003a). Outils de simulations pour l'aide aux gestionnaires de réseaux d'assainissement. AFGC Paris, (10).

Vasconcelos E.C. (2004). Développement d'outils d'aide à la gestion du patrimoine réseau d'assainissement non visitable. Thèse de doctorat : université de Bordeaux I / Centre de Développement des Géosciences Appliquées, 350 p.

Vasconcelos E.C. (2005). Outils d'aide à la gestion du patrimoine réseau d'assainissement non visitable. Doctorat de l'Université Bordeaux I, N°ordre 2970, 347 pages.

Walls III I., and Smith M.R. (1998). Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design. Publication No. FHWA-SA-98-079, Federal Highway Administration, US Department of Transportation.

Werey C. (2000). Politiques de renouvellement des réseaux d'eau potable, thèse en sciences de gestion. Strasbourg, Université Louis Pasteur: 162 p.

Werey C. Torterotot J.P.; Sousa e Silva D.; Barbier D., R., König A., Pereira A., Montginoul M., Waechter V. (2007). Decision-making aid for rehabilitation of sewer networks: addressing socio-economic aspects in the CARE-S project, LESAM, IWA and LNEC, Lisbon, 17-19 October. Proceedings on CD-Rom.

Werey C., Cherqui F., Ibrahim M., Le Gauffre P. (2008). Sewer asset management tool: dealing with experts' opinions. Pi08 – Performance Assessment of Urban Infrastructure Services, Valencia, Spain, 12-14 March. In press.

Werey C., Dorchies D., Mellac Beck I. (2006). « Sewer asset management: assessing criteria for a multicriteria decision support on a county level data base », Joint int. conf. on Computing and decision making in civil and building engineering, Montreal, June 14-16, 886-895.

Werey C., Torterotot J.P., Sousa e Silva D., Kønig A., Peireira A. and Montginoul M. (2004). Rehabilitation impacts on socio-economic costs, CARE-S report D13, Oct.

Werey C.; Torterotot J.P.; Sousa e Silva, D.; Barbier D., R., König A., Pereira A., Montginoul M.; Waechter V.(2005). socio-economic impacts of rehabilitation strategies : rehabilitation impacts on socio-economic costs, CARE-S report D13, Public Utilities Management Joint Research Unit, Cemagref – ENGEES, 171 p.

Zadeh L. A. (1978b). A meaning Representation Language for Natural Languages, International= Journal .Man-Machine Studies, b, 10, pp.395-460.

Zadeh L.A (1978a). «Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility», Fuzzy Set and Systems, vol. 1, p. 3-28.

Zadeh L.A (2005). .What is fuzzy logic and what are its applications? Disponible sur http://www.eecs.berkeley.edu/IPRO/Summary/03abstracts/zadeh.13.html ,

Zadeh. L.A. (1985). The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems. Approximate reasoning in expert systems; Edited by M.M. Gupta, A. Kandel, W. Bandler, J.B. Kiszka; Elsevier Science publishers B.V., North hollond.

Zeidan L. A. (2002) Démarche d'estimation des délais de réalisation d'un tunnel en site urbain. Thèse de doctorat, université de Marne La Vallée 251 p.

Zhang H. (2003). « Application of fuzzy logic to simulation for construction operations », Journal of computing in civil engineering, vol. 17, n° 1.

Zhao J. Q., McDonald S.E., Kleiner Y. (2001). Guide d'évaluation et de réhabilitation des égouts collecteurs, CNRC, Ottawa, Canada. 79 pages. - ISBN 0-660-96584-4.

Zhao J.Q. and Rajani B. (2002). Construction and Rehabilitation Costs for Buried Pipe with a Focus on Trenchless Technologies, Research Report No.101, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa./03abstracts/zadeh.13.html].

Références personnelles

Ibrahim M., Le Gauffre P. (2006). Propositions pour la construction d'indicateurs évalués à partir de résultats d'inspections visuelles, 2ème Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine, Nantes, Octobre 17-18.

Ibrahim M., Le Gauffre P., Cherqui F., Werey C. (2007) Gestion des réseaux d'assainissement : Evaluation d'indicateurs de dysfonctionnement à partir d'inspections visuelles, 25e Rencontres de l'AUGC (Association Universitaire du Génie Civil), Université de Bordeaux, mai 23 - 25. Actes sur CD-ROM, 6p.

Ibrahim M., Cherqui F., Le Gauffre P., Werey C. (2007) Sewer asset management: from visual inspection survey to dysfunction indicators. LESAM 2007 - Leading Edge Conference on Strategic Asset Management, IWA Internation Water Association. Lisbonne, 17-19.Oct.

Le Gauffre P., **Ibrahim M.** and Cherqui F. (2008). Sewer asset management: fusion of performance indicators into decision criteria. In Cabrera & Pardo (ed.) Performance Assessment of Urban Infrastructure Services. Drinking water, waste water and solid waste. London (UK) : IWA publishing, 195-205.

Werey C., Cherqui F., **Ibrahim M.,** Le Gauffre P. (2008). Sewer asset management tool: dealing with experts' opinions. In Cabrera & Pardo (ed.) Performance Assessment of Urban Infrastructure Services. Drinking water, waste water and solid waste. London (UK) : IWA publishing, 125-134.

Cherqui F., Werey C**., Ibrahim M**., Le Gauffre P. (2008). CCTV inspection of sewer segments: calibration of performance indicators based on expert's opinion, ICUD (11th International Conference on Urban Drainage), Edinburgh, Scotland, UK.

Ibrahim M., Cherqui F., Le Gauffre P. (2008). Indicateurs de performance, précis ou flous, évalués à partir d'inspections visuelles, 3ème Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine, Nancy, Octobre 14-15.

Tables des figures et des tableaux

Table des figures

Figure 1 : structuration d'une gestion stratégique du patrimoine (Strategic Asset Management Framework Requirements) (FHWA, 1999) 20
Figure 2 : le principe de base de la gestion patrimoniale 21
Figure 3 : les différentes composantes d'une gestion patrimoniale ainsi que leurs relations (A Generic Asset Management System) (FHWA, 1999) 22
Figure 4 : terminologie utilisée dans la réhabilitation (norme EN 752) et relations avec les autres opérations, par exemple la maintenance des réseaux d'assainissement (AFNOR, 1996) 24
Figure 5 : date optimale de remplacement d'une conduite (Alexandre et al., 1994 ; Werey, 2000 ; Walls & Smith,1998) 27
Figure 6 : domaine d'action visé par le guide méthodologique RERAU 5/6, constitution d'un tableau de bord (Le Gauffre et al., 2004) 30
Figure 7 : utilisation des fonctions de survie pour l'estimation de l'état d'un tronçon avec inspection préalable (Le Gauffre et al., 2004) 34
Figure 8 : principe du système d'indicateurs de RERAU (Le Gauffre et al., 2004) 35
Figure 9 : les différentes tâches du projet INDIGAU et de la thèse, sur fond gris les thèmes abordés dans cette thèse 38
Figure 10 : évaluation d'un indicateur de dysfonctionnement à partir des données d'inspections visuelles d'un tronçon (Ibrahim et al., 2007a) 42
Figure 11 : confrontation entre l'affectation issue du calcul (évaluation d'une note globale puis comparaison à trois seuils) et les avis experts pris pour référence 47
Figure 12 : comportement d'un test de détection -cas simple (Le Gauffre et al., 2004 , Bradley, 1997 ; Fawcett,.2001 , Ancelle, 2002 , Egan, 1975, Ferri et al.,2002, Flach .at al., 2003; Hand & Till, 2001; Lane, 2000). 47
Figure 13 : caractéristiques d'un test de détection - cas simple. 48
Figure 14 : confrontation entre l'affectation issue du calcul (évaluation d'une note globale puis comparaison à un seuil S) et l'avis d'expert pris pour référence (cas simple) 49
Figure 15 : démarche de choix des seuils S1, S2 et S3 pour l'échantillon avec avis experts (INDIGAU – tâche 1) 51
Figure 16 : schéma illustrant le principe de choix des alternatives des seuils (Si, i = 1….3) 52
Figure 17 : schéma décrivant le principe de calcul des erreurs d'affectation 52
Figure 18 : graphique représentant les coûts globaux en fonction des valeurs des intervalles possibles pour (S2, S3) (Phase 1) 53
Figure 19 : estimation des valeurs des intervalles possibles de S1 en fonction du coût global (Phase 1) 54
Figure 20 : graphique visant à estimer les valeurs finales pour S2; S3 (Phase 2) 54
Figure 21 : estimation de la valeur finale de S1 en fonction du coût global (Phase 2) 55
Figure 22 : distribution de notes (densités) des tronçons d'un patrimoine 55
Figure 23 : démarche de choix des seuils S1, S2 et S3 pour l'échantillon local représentatif du patrimoine à évaluer en utilisant l'échantillon avec les avis experts 56
Figure 24 : schéma décrivant les relations entre les proportions qj et les proportions P(Ei) 57
Figure 25 : schéma illustrant les déplacements du seuil (S2) et des états correspondants (nb2, nb3) lors du changement du rapport de coût CFN (3, 2)/CFP (2, 3) 58
Figure 26 : démarche de choix des seuils S1, S2 et S3 pour l'échantillon local non représentatif du patrimoine à évaluer en utilisant l'échantillon avec les avis experts 59
Figure 27 : courbe illustrant les déplacements du seuil (S2) lors du changement des proportions (P2, P3) 60

Figure 28 : l'échantillon avec avis d'experts (deux exemples fictifs) 62
Figure 29 : formulation RERAU du critère R/POL2/DEV-TS/INF : réhabilitation pour infiltrations contribuant à des déversements de temps sec polluant les eaux de surface (Le Gauffre et al., 2004) 66
Figure 30 : formulation informatique des règles d'agrégation du critère R/POL2/DEV-TS/INF à partir de 6 indicateurs. Cas a : INF3 est connu et cas b : INF3 n'est pas connu 69
Figure 31 : distribution des 4 niveaux de performance du critère R/POL2/DEV-TS/INF en fonction de l'ensemble des combinaisons possibles des 6 indicateurs (2304 cas) 70
Figure 32 : formes de distribution possibles (a, b, c) des 4 niveaux de performance d'un critère : les cas (a) et (b) sont acceptables et le cas (c) est considéré comme non-conforme 71
Figure 33 : évaluation du risque « Root_Intrusion_Risk » avec la combinaison de causes « Line_Size = Large » et « Trees_above_line = Yes » (Merril et al., 2004) 91
Figure 34 : tableau des probabilités conditionnelles associé au risque « Root_Intrusion_Risk », selon deux formes possibles de présentation (Merril et al., 2004) 91
Figure 35 : a) graphe représentant l'emboîtement des réponses possibles ; b) répartition des masses de croyance dans le cas d'un échantillon très indécis ; c) répartition des masses de croyance dans le cas d'un ensemble de réponses plutôt affirmées, adapté de (Bloch & Hunter, 2001) 92
Figure 36 : croyances et plausibilités pour le cas de deux conclusions élémentaires possibles (Bloch & Hunter, 2001) 93
Figure 37 : représentation du calcul des masses de croyance par la règle de Dempster pour 2 sources (Bloch & Hunter, 2001) 93
Figure 38 : le changement de décision avec l'erreur d'entrée (Hansruedi, 1994) cité par (Essa, 2007) 94
Figure 39 : formulation des différentes étapes conduisant à l'évaluation d'un critère flou 97
Figure 40 : réponse floue sur quatre modalités d'un tronçon selon un indicateur flou, adapté de (Le Gauffre et al., 2008) 98
Figure 41 : règles d'agrégation floues du critère R/POL2/DEV-TS/INF (cas INF3 ≠ ?) à partir de 6 indicateurs 105
Figure 42 : situation idéale : on peut définir une note N et 3 valeurs seuils (S1, S2, S3) telles que la comparaison de N avec (S1, S2, S3) conduit toujours à la même conclusion que les experts pris pour référence 109
Figure 43 : la note N ne caractérise pas l'état de santé d'un tronçon de manière univoque : 2 tronçons avec une même note N peuvent être évalués différemment par les experts 109
Figure 44 : faux positifs et faux négatifs peuvent être dus à une erreur sur la note N. En conséquence les notes voisines sont jugées de façons très différentes par les experts 110
Figure 45 : dispersion des avis énoncés par plusieurs experts 110
Figure 46 : imprécision de la valeur énoncée par les experts 110
Figure 47: avis d'experts (après visualisation des rapports d'inspections) exprimés sous la forme de degrés d'appartenance, comparés à la note calculée (exemple fictif) 111
Figure 48 : résultats obtenu après calage des trois seuils flous S_r avec $r = 1/2, 2/3, 3/4$ associées aux quatre états k ($k \in [1, 4]$). 112
Figure 49 : démarche de calage des trois seuils flous de l'indicateur considéré (volet 3) 112
Figure 50 : sous-échantillon (j/j+1) avec $j \in [1,3]$, avis d'experts flous ($\mu_j^E(i)$, $\mu_{j+1}^E(i)$) en fonction des notes calculées Ni 113
Figure 51 : évaluation d'experts (référence) et valeurs calculées dans le contexte de la logique floue 114
Figure 52 : démarche de calage du seuil flou 114
Figure 53 : résultats de calage de l'indicateur flou 116
Figure 54 : schéma décrivant le principe de définition des seuils flous S1/2, S2/3 et S3/4 pour l'échantillon avec avis d'experts flous 117
Figure 55 : évaluation d'experts (référence) et valeurs calculées dans le contexte de la logique floue pondérée 118
Figure 56 : schéma décrivant la définition des seuils flous pondérés S1/2, S2/3 et S3/4 pour l'échantillon avec avis d'experts flous 119
Figure 57 : schéma illustrant les déplacements du seuil pondéré (Sr3/4) lors des changements du rapport CFN/CFP 120

Figure 58 : seuils flous non pondérés et précis (avec CFN/CFP = 1 et CFN/CFP = 2) calés à partir d'un échantillon d'avis d'experts flous 121
Figure 59 : confrontation entre l'affectation issue du calcul (évaluation d'une note globale) et l'avis d'expert pris pour référence (* deux avis G4 pour D = 20) 123
Figure 60 : distribution des notes des tronçons d'un échantillon de 264 tronçons pour (α = 3 & P =1), ITV issues du Grand-Lyon 125
Figure 61 : optimisation des seuils S2, S3 selon le critère MC 126
Figure 62 : optimisation des paramètres (a et b) caractérisant le seuil flou possible, selon le critère E pour (α = 3 & P = 1) et CFN/CFP = 1 133
Figure 63 : tracé des trois seuils flous calés et des quatre sous-ensembles flous correspondant pour (α = 3 & P = 1) et CFN/CFP = 1 134
Figure 64 : déplacements des seuils pondérés lors du changement du rapport CFN/CFP avec (α = 3 & P = 1) 134
Figure 65 : formulation du critère R/NUH4/DEB/BOU 168
Figure 66 : opérateurs d'évaluation du critère R/NUH4/DEB/BOU 168
Figure 67 : formulation du critère R/NUH5/DEB-TP/HY 169
Figure 68 : opérateurs d'évaluation du critère R/NUH5/DEB-TP/HY 169
Figure 69 : formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 connu) 170
Figure 70 : opérateurs d'évaluation du critère R/POL2/DEV-TS/INF lorsque INF3 est connu 170
Figure 71 : formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 inconnu) 171
Figure 72 : opérateurs d'évaluation du critère lorsque INF3 est inconnu 171
Figure 73 : fonction caractéristique de l'ensemble classique A 180
Figure 74 : concept d'univers et de sous-ensemble 180
Figure 75 : fonction d'appartenance de l'ensemble flou B 181
Figure 76 : sous ensemble flou trapézoïdal 182
Figure 77 : structure générale d'inférence floue (Malhis, 2002) 184

Table des tableaux

Tableau 1 : types de maintenance selon la norme NF X 60-100 24
Tableau 2 : typologie des dysfonctionnements (Le Gauffre et al., 2004) 31
Tableau 3 : typologie des impacts (Le Gauffre et al., 2004) 32
Tableau 4 : typologie des indicateurs de vulnérabilité (Le Gauffre et al., 2004) 32
Tableau 5 : exemple de table de décision 4 × 4 pour agréger les deux indicateurs INF5 et INF1 (Le Gauffre et al., 2004) 36
Tableau 6 : exemple de table de décision 4 × 4 pour agréger les deux indicateurs INF8 et POL3 (Le Gauffre et al., 2004) 36
Tableau 7 : extrait du tableau RERAU regroupant les règles d'évaluation de l'indicateur INF4 : défaut d'étanchéité, évalué à partir d'une inspection 44
Tableau 8 : peak Deduct Values for Condition Grade (Rahman & Vanier, 2004) 46
Tableau 9 : comparison of Peak, Mean and Total Scores (Rahman & Vanier, 2004) 46
Tableau 10 : déplacements du seuil (S2) et des états correspondants (nb2, nb3) lors du changement du rapport de coût CFN (3, 2) / CFP (2, 3) 58
Tableau 11 : déplacements du seuil (Si) et des états correspondants (nbi, nbj) lors du changement du rapport de coût CFN (i, j) / CFP (i, j) 58
Tableau 12 : déplacements du seuil (S2) et des états correspondants (nb2, nb3) lors du changement des proportions P(E1), P(E2), P(E3), P(E4) 60
Tableau 13 : déplacement des seuil (Si) et états correspondants (nbi, nbj) lors de changements des proportions (P(Ei) / P(Ej) avec i = 1, 2, 3 et j = i +1) 61
Tableau 14 : gamme de valeurs de CFN = {1, 3, 10} utilisée pour les simulations 61
Tableau 15 : combinaisons de valeurs de $P(Ei)$ avec $i = 1.....4$ 61
Tableau 16 : valeurs du coût MCm(Sijl) pour une gamme de CFN = {1, 3, 10} 62
Tableau 17 : jeux de P(Ei) retenus selon le critère utilisé 63
Tableau 18 : indicateurs de performance concernant le critère R/POL2/DEV-TS/INF (Le Gauffre et al., 2004) 67
Tableau 19 : opérateur initial pour l'évaluation de l'indicateur INF8 (Le Gauffre et al., 2004) 67
Tableau 20 : opérateur simplifié pour l'évaluation de l'indicateur INF8 67
Tableau 21 : opérateur simplifié pour l'évaluation de l'indicateur INF8 (modélisation informatique) 68
Tableau 22 : propriétés d'un indicateur représentées par les indices IL et IS, vis-à-vis d'un critère 71
Tableau 23 : répartition des 4 niveaux de performance du critère R/POL2/DEV-TS/INF (2304 cas) en fonction des valeurs de INF2 (indicateur à 3 modalités) 72
Tableau 24 : répartition des 4 niveaux de performance du critère R/POL2/DEV-TS/INF (2304 cas) en fonction des valeurs de INF4 (indicateur à 4 modalités) 72
Tableau 25 : indices IL et IS pour les indicateurs du critère R/POL2/DEV-TS/INF 72
Tableau 26 : table de décision permettant d'agréger deux indicateurs I1 et I2 : I1 à r modalités et I2 à c modalités 74
Tableau 27 : valeurs de Ni pour un opérateur en fonction de sa nature et de la taille de la table de décision 74
Tableau 28 : exemples de table de décision issue du critère R/POL2/DEV-TS/INF 75
Tableau 29 : Ni associés à chaque indicateur du critère R/POL2/DEV-TS/INF 75
Tableau 30 : influence relative d'un indicateur sur l'autre au sein d'un opérateur 75
Tableau 31 : exemples d'évaluation de l'influence relative IR pour INF2, INF4, INF8, POL3 76
Tableau 32 : influences relatives IR associées à chaque indicateur du critère R 76
Tableau 33 : bilan quantitatif et qualitatif pour définir l'importance relative des indicateurs 77
Tableau 34 : importance relative de chaque indicateur pour le calcul d'un critère 78
Tableau 35 : étude de la sensibilité du critère R/POL2/DEV-TS/INF vis – à – vis de chaque indicateur (nombre de cas et proportion) 79
Tableau 36 : indice d'anomalie potentielle associée à chaque indicateur du critère R/POL2/DEV-TS/INF (chiffre en gras si $\Delta I = 1 \rightarrow \Delta R > 2$) 79

Tableau 37 : indicateurs ayant un indice IAP non nul et critère(s) associé(s) (les critères pour lesquels certains $\Delta I = 1 \rightarrow \Delta R > 2$ sont en gras) 80
Tableau 38 : bilan pour étudier le niveau d'influence de chaque indicateur sur le calcul du critère R/POL2/DEV-TS/INF 80
Tableau 39 : synthèse des problèmes identifiés 82
Tableau 40 : notations utilisées pour classer les opérateurs de fusion des indicateurs 86
Tableau 41 : opérateur moyenne pour l'évaluation de l'indicateur INF6-E/O-T (risque d'infiltration estimé après inspection TV à l'échelle de tronçon) (Le Gauffre et al , 2004) 99
Tableau 42 : systèmes d'opérateurs retenus du point de vue opérationnel 102
Tableau 43 : zone d'hésitation entre deux modalités d'évaluation de INF6 102
Tableau 44 : valeurs calculées des nuances entre quatre modalités d'évaluation INF6 (règles RERAU à gauche et règles floues à droite) 103
Tableau 45 : évaluation de INF6 avec les règles précises et les entrées floues 104
Tableau 46 : évaluation de INF6 avec les règles floues et les entrées floues 104
Tableau 47 : évaluation précise et floue du critère R/POL2/DEV-TS/INF 106
Tableau 48 : déplacements du seuil flou pondéré (Sr3/4) lors du changement du rapport CFN/CFP 120
Tableau 49 : avis d'experts et densités pour l'indicateur de dysfonctionnement INF4, réalisés pour 37 rapports d'ITV (15 tronçons situés à Strasbourg, 15 tronçons situés dans le Département du Bas-Rhin et 7 tronçons situés à Nantes) 124
Tableau 50 : valeurs des trois seuils calées pour des valeurs différentes de (α & P) et des scénarios CFN/CFP 126
Tableau 51 : résultats du calage fait avec l'échantillon (a) de 30 tronçons (pour CFN/CFP = 1) et ceci pour le cas de calcul de densité (α = 2 & P = 1) vis-à-vis de l'expertise des 30 tronçons de cet échantillon 127
Tableau 52 : bilan des écarts de classement 127
Tableau 53 : comparaison du calage fait (pour CFN/CFP = 1) avec l'échantillon (a) de 30 tronçons et ceci pour le cas de calcul de densité (α = 2 & P = 1) vis-à-vis de l'expertise des 7 tronçons de Nantes 128
Tableau 54 : bilan des écarts de classement 128
Tableau 55 : valeurs des trois seuils calés pour des valeurs différentes de (α & P) et pour CFN/CFP = 1 128
Tableau 56 : valeurs des proportions et du nombre de tronçons correspondant à chaque état résultant des trois seuils précis calés pour (α = 2, 3, 4 & P = 1) et CFN/CFP = 1 129
Tableau 57 : valeurs des proportions et des nombres de tronçons correspondant à chaque état résultant des trois seuils précis calés pour (α = 3 & P = 1) 130
Tableau 58 : valeurs des proportions et des nombres de tronçons correspondant à chaque état résultant des trois seuils précis calés pour échantillon a et b, et avec (α = 2, 3 & P = 1) et CFN/CFP = 1 130
Tableau 59 : validation (%) du calage pour les trois cas de calcul de densité et de rapport de coût 131
Tableau 60 : proportions correspondant à différentes hypothèses de patrimoine 131
Tableau 61 : valeurs des proportions et des nombres de tronçons correspondant à chaque état résultant des trois seuils précis calés avec (α = 3, P = 1) et (CFN/CFP = 1) 131
Tableau 62 : valeurs des trois seuils calés pour des valeurs différentes de P(E) avec CFN/CFP = 1 et (α = 3 & P = 1) 132
Tableau 63 : validation et validation relative (%) du calage pour tous les cas de proportions d'état P(E) avec (α = 3, P = 1) et CFN/CFP = 1, l'échantillon a vs échantillon b 132
Tableau 64 : les simulations réalisées pour évaluer les $MC_{l,m}$ pour une gamme de CFN = {1, 3, 10} 132
Tableau 65 : jeu de P(Ei) retenu selon les critères utilisés 133
Tableau 66 : paramètres (a, b) choisis, caractérisant les seuils flous possibles 134
Tableau 67 : paramètres (a, b) calées pour (α = 3 & P = 1) et pour des valeurs différentes de CFN/CFP 134
Tableau 68 : comparison of Deduct Values for Operational Defects (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao et al., 2001) 163
Tableau 69 : comparison of Deduct Values for Structural Defects (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao et al., 2001) 164

Tableau 70 : comparison of Deduct Values for Operational Defects (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao et al., 2001) 165
Tableau 71 : comparison of Peak, Mean and Total Scores (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao et al., 2001) 166
Tableau 72 : Peak Deduct Values for Condition Grade (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao et al., 2001) 166
Tableau 73 : exemple de matrice des gains Raj, ei 167
Tableau 74 : critères de choix d'une meilleure action 167
Tableau 75 : nature des opérateurs et influence relative des indicateurs pour le critère étudié 168
Tableau 76 : tableau de synthèse concernant le critère R/NUH4/DEB/BOU 168
Tableau 77 : commentaires associés à la formulation du critère R/NUH4/DEB/BOU 168
Tableau 78 : nature des opérateurs et influence relative des indicateurs pour le critère R/NUH5/DEB-TP/HY 169
Tableau 79 : tableau de synthèse concernant le critère R/NUH5/DEB-TP/HY 169
Tableau 80 : commentaires associés à la formulation du critère R/NUH5/DEB-TP/HY 169
Tableau 81 : nature des opérateurs et influence relative des indicateurs pour le critère R/POL2/DEV-TS/INF, cas INF3 connu 170
Tableau 82 : tableau de synthèse concernant le critère R/POL2/DEV-TS/INF cas INF3 connu 170
Tableau 83 : commentaires associés à la formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 connu) 170
Tableau 84 : nature des opérateurs et influence relative des indicateurs pour le critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 inconnu) 171
Tableau 85 : tableau de synthèse concernant le critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 inconnu) 171
Tableau 86 : commentaires associés à la formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 inconnu) 171
Tableau 87 : indicateurs et critères évalués avec un opérateur max 172
Tableau 88 : indicateurs et critères évalués avec un opérateur min 172
Tableau 89 : indicateurs ou critères calculés avec un opérateur du type W_{max} 174
Tableau 90 : indicateurs ou critères calculés avec un opérateur de type Wmin 176
Tableau 91 : indicateurs ou critères calculés avec un opérateur de type W 176
Tableau 92 : indicateurs et critères calculés avec un opérateur de type synergie 177
Tableau 93 : indicateurs ou critères évalués avec un opérateur de type S 177
Tableau 94 : principales t-normes et t-conormes duales (Bouchon-Meunier, 1995 ; Bouchon-Meunier et al., 2003a) 182
Tableau 95 : exemple d'opérateur compensatoire 186
Tableau 96 : choix de systèmes d'opérateurs compensatoires pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles 186
Tableau 97 : exemple d'opérateur de type S (deux sources) 187
Tableau 98 : choix de systèmes d'opérateurs de type S (situation de conflit) pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles 187
Tableau 99 : choix de systèmes d'opérateurs de type S (situation de confirmation) pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles 188
Tableau 100 : exemple d'opérateur exprimant une synergie 188
Tableau 101 : choix de systèmes d'opérateurs exprimant une synergie pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles 188
Tableau 102 : exemple d'opérateur min 189
Tableau 103 : exemple d'opérateur max 189
Tableau 104 : choix de systèmes d'opérateurs min et max pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles 189
Tableau 105 : valeurs des nuances entre deux modalités d'évaluation INF6 (règles RERAU à gauche et règles floues à droite) 191
Tableau 106 : explications sur le calcul des nuances entre deux modalités 192
Tableau 107 : valeurs calculées des nuances entre quatre modalités d'évaluation INF6 (règles RERAU à gauche et règles floues à droite) 193

7 Annexes

7 Annexes 160

7.1 Annexe 1 : systèmes de notation 162

7.2 Annexe 2 : critères de décision en situation d'incertitude 167

7.2.1 Exemple d'application 167

7.2.2 Critères de décision 167

7.3 Annexe 3 : synthèse de l'étude numérique des différents critères 168

7.3.1 Critère R/NUH4/DEB/BOU 168

7.3.2 Critère R/NUH5/DEB-TP/HY 169

7.3.3 Critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 connu) 170

7.3.4 Critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 inconnu) 171

7.4 Annexe 4 : synthèse de l'étude des critères 172

7.4.1 Les opérateurs min et Max 172

7.4.2 Les opérateurs compensatoires 174

7.4.3 Les opérateurs exprimant une synergie 177

7.4.4 Les opérateurs de type confrontation de plusieurs sources 177

7.5 Annexe 5 : la logique floue 179

7.5.1 Rappel historique 179

7.5.2 Les sous-ensembles flous 179

7.5.3 La théorie des possibilités 182

7.5.4 Possibilités et ensembles flous 183

7.6 Annexe 6 : inférence floue 184

7.6.1 Base de règles 184

7.6.2 Combinaisons des prémisses 184

7.6.3 Implication 185

7.6.4 Agrégation des règles 185

7.6.5 Quelques modèles d'inférence floue 185

7.7 Annexe 7 : choix de systèmes d'opérateurs pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles 186

7.7.1 Les opérateurs compensatoires 186

7.7.2 Les opérateurs de type S, avec possibilité de contradiction entre plusieurs sources 187

7.7.3 Les opérateurs exprimant une synergie 188

7.7.4 Les opérateurs min et Max 189

7.8 Annexe 8 : contrôler l'hésitation (masse de flou) entre 2 modalités de la table d'agrégation 191

7.1 Annexe 1 : systèmes de notation

Chaque pays, tout comme la France, a développé sa propre méthodologie pour définir les besoins prioritaires de réhabilitation et nous pouvons citer ainsi les méthodes WRC (Water Research Centre) (Orman & Lambert, 2004) pour l'Angleterre, NRC (Conseil National de Recherche Canada) (Zhao *et al.*, 2001 ; Rahman & Vanier, 2004) pour le Canada…

Les inspections se font de la même manière qu'en France avec une grande différence dans le système de codage de relevé des défauts. Il est composé de deux ou trois lettres (tableau 68). La première correspond au type de défaut « Defect type » (par exemple cassure : C ; fissure : F…). La deuxième, non obligatoire, correspond au sens du défaut « Defect direction » (C : circulaire ; L : longitudinal ; D : diagonal). La troisième correspond au niveau de gravité « distress level » (L : léger ; M : modéré ; S : sévère). Par exemple FLL correspond à une fissure dans le sens de la longueur dont le niveau de gravité est léger (Zhao *et al.*, 2001 ; Rahman & Vanier, 2004).

Tableau 68 : comparison of Deduct Values for Operational Defects (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao *et al.*, 2001)

Defects	Distress Level	Defect Codes		
Structural		*NRC*	*Edmonton*	WRc
Deformation (D)	*Deformation*			
	• Light (<5% change in diameter)	DL	DL	D
	• Moderate (5%–10% change in diameter)	DM	DM	D
	• Severe (11%–25% change in diameter)	DS	DS	D
Crack (C)	*Crack Longitudinal*			
	• Light (up to 3 cracks, no leakage)	CLL		
	• Moderate (>3 cracks, leakage)	CLM	CM	CL
	Crack Circumferential			
	• Light (up to 3 cracks, no leakage)	CCL	CL	
	• Moderate (>3 cracks, leakage)	CCM		CC
	Crack Diagonal			
	• Light (up to 3 cracks, no leakage)	CDL		
	• Moderate (>3 cracks, leakage)	CDM		
	Crack Severe (multiple cracks, leakage)	CS	CS	CM
Joint Defects (J)	*Joint Displacement*			
	• Light (<1/4 pipe wall thickness)	JDL	JL	
	• Moderate (1/4 – ½ pipe wall thickness)	JDM	JM	JDM
	• Severe (>½ pipe wall thickness)	JDS	JS	JDL
	Joint Opening			
	• Light (<10 mm, gasket in place)	JOL	OL	
	• Moderate (10 to 50 mm, gasket off, leakage)	JOM	OM	OJM
	• Severe (>50 mm, soil visible, leakage)	JOS	OS	OJL
Operational (serviceability)		*NRC*	*Edmonton*	*WRc*
Root (R)	• Light (fine roots, reduction in diameter <10%, F- fine roots, J-joint)	RL	RL	RF(J)
	• Moderate (reduction in diameter 10% – 25%, T-tap roots over 10mm thick)	RM	RM	RT(J)
	• Severe (reduction in diameter >25%, M-mass, J- joint)	RS	RS	RM(J)
Debris (DE)	• Light (reduction in diameter <10%) Edmonton uses B for Blockage	DEL	BL	DE
	• Moderate (reduction in diameter 10% – 25%, S-silt, G- grease)	DEM	BM	DE(S,G)
	• Severe (reduction in diameter >25%)	DES	BS	DE
Encrustation (E)	• Light (reduction in diameter <10%, J- joint)	EL	EL	EL(J)
	• Moderate (reduction in dia.10% – 25%, J- joint)	EM	EM	EM(J)
	• Severe (reduction in diameter >25%, H- heavy, J- joint)	ES	ES	EH(J)
Protrusion (P)	• Light (reduction in diameter <10%)	PL	PL	
	• Moderate (reduction in diameter 10%-25%)	PM	PM	
	• Severe (reduction in diameter >25%)	PS	PS	
Infiltration (I)	• Light (S- seeping, D- dripping, J- joint)	IL	IL	IS(J), ID(J)
	• Moderate (R- running, J- joint)	IM	IM	IR(J)
	• Severe (G- gushing, J-joint)	IS	IS	IG(J)

Les niveaux de performance des conduites sont traduits par des notes. La méthodologie déterminant ces notes est proposée par les protocoles WRc, NRC. La valeur déduite « Deduct Values» est une note élémentaire calculée pour chaque défaut structurel ou opérationnel (voir tableau 69 pour les défauts structurels et tableau 70 pour les défauts opérationnels). Pour chaque tronçon, les valeurs déduites (les notes élémentaires) des défauts sont cumulées afin de calculer :

- la note maximale (« Peak Score ») attribuée à un tronçon unitaire ou au tronçon. Elle correspond au coefficient pondérateur le plus élevé relevé.

$$N_{critique} = \max (\text{« Deduct Values »})$$

- la note globale (« Total Score ») correspond à la somme des coefficients pondérateurs, toujours évaluée soit sur une longueur unitaire, soit sur le tronçon.

$$N_{total} = \sum (\text{« Deduct Values »})$$

- la note moyenne (« Mean Score » correspond à la moyenne des coefficients pondérateurs, c'est-à-dire la note globale divisée par la longueur du tronçon.

$$N_{moy} = \sum (\text{« Deduct Values »}) / L \quad L : \text{longueur du tronçon (m)}$$

Tableau 69 : comparison of Deduct Values for Structural Defects (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao *et al.*, 2001)

Defects and Distress Level	**Unit**	**Deduct Values for Defects**			
		NRC	Edmonton	Winnipeg	WRc
Crack Longitudinal					
• Light (up to 3 cracks, no leakage)	metre	3		2	10
• Moderate (>3 cracks, leakage)	metre	5	2		40
Crack Circumferential					
• Light (up to 3 cracks, no leakage)	metre	3	1	1	
• Moderate (>3 cracks, leakage)	metre	5			10
Crack Diagonal					
• Light (up to 3 cracks, no leakage)	metre	3			
• Moderate (>3 cracks, leakage)	metre	5			
• Crack Severe (multiple cracks, leakage)	metre	10	4	5	40
Deformation					
• Light (<5% change in diameter)	metre	5	2	10	20
• Moderate (5% – 10% change in diameter)	metre	10	4	30	80
• Severe (11% – 25% change in diameter)	metre	15	100	125	165
Joint Displacement					
• Light (<1/4 pipe wall thickness)	each	3	2	0.1	
• Moderate (1/4 – ½ pipe wall thickness)	each	10	3	0.5	1
• Severe (>½ pipe wall thickness)	each	15	100	2	2
Broken Pipe	each	15	110	80	60
Collapse	each	20	115	165	165

Tableau 70 : comparison of Deduct Values for Operational Defects (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao *et al.*, 2001)

Defects	**Distress Level**	**Deduct Values**		
		NRC	Edmonton	WRc
Roots (R)	*Light*: fine roots: reduction in diameter <10%	2	1	
	Fine roots			1
	Mass roots: reduction in diameter <5%			2
	Moderate: reduction in diameter 10% – 25%	8	2	
	Mass roots: reduction in diameter 5% – 20%			4
	Tap roots			5
	Severe: reduction in diameter >25%	10	3	5
	Mass roots: reduction in diameter 20% – 50%			10
	Mass roots: reduction in diameter 50% – 75%			15
	Mass roots: reduction in diameter >75%			20
Debris (DE)	*Light*: reduction in diameter <10%	5	1	
	Silt/grease: reduction in diameter 5%			1
	Moderate: reduction in diameter 10% – 25%	8	2	2
	Silt/grease: reduction in diameter 5% – 20%			2
	Severe: reduction in diameter >25%	10	3	
	Silt/grease: reduction in diameter 20% – 50%			5
	Silt/grease: reduction in diameter 50% – 75%			8
	Silt/grease: reduction in diameter >75%			10
Encrustation (E)	*Light*: reduction in diameter <10%	2	1	1
	Moderate: reduction in diameter 10% – 25%	8	2	2
	Severe: reduction in diameter >25%	10	3	5
Protruding (P)	*Light*: reduction in diameter <10%	2	1	-
	Intruding lateral: reduction in diameter 5%			1
	Intruding lateral: reduction in diameter 5%-20%			2
	Moderate: reduction in diameter 10% – 25%	8	2	-
	Intruding lateral: reduction in diameter 20% - 50%			5
	Severe: reduction in diameter >25%	10	3	-
	Intruding lateral: reduction in diameter 50% – 75%			8
	Intruding lateral: reduction in diameter >75%			10
Infiltration (I)	*Light*: seeping, dripping	2	1	-
	Moderate: running, trickling	5	2	-
	Severe: gushing, spurting	10	3	-

Le niveau de dégradation des conduites, évalué par les méthodes WRC (Water Research Centre) pour l'Angleterre, NRC (Conseil National de Recherche Canada), Winnipeg et Edmonton est basé sur des échelles qualitatives de modalités ordonnés subjectives. Ces niveaux de dysfonctionnement sont déduits simplement à partir d'un découpage régulier du domaine des valeurs possibles de N, de manière à présenter tous les états de santé possibles des conduites (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao *et al.*, 2001) (voir tableau 71 et 72).

Tableau 71 : comparison of Peak, Mean and Total Scores (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao *et al.*, 2001)

Condition Grade	**Peak Score**		**Mean Score**		**Total Score**	
	Winnipeg	Edmonton	Winnipeg	Edmonton	Winnipeg	Edmonton
1	<10	<1.0	<0.3	<0.5	<20	<100
2	10 – 59	1.0 – 2.0	0.3 – 1.49	0.5 – 0.99	20 – 99	100 – 149
3	60 – 99	2.1 – 3.0	1.5 and >	1.0 – 1.49	100 and >	150 – 199
4	100 – 149	3.1 – 5.0	-	1.5 – 2.49	-	200 – 249
5	150 and >	5.0 and >	-	2.5 and >	-	250 and >

Tableau 72 : Peak Deduct Values for Condition Grade (Rahman & Vanier, 2004 ; Zhao *et al.*, 2001)

Condition Grade	**Peak Deduct Value Ranges**			
	WRc		NRC	
	Structural	Operational	Structural	Operational
0	-	-	0	0
1	<10	<1	1 – 4	1 – 2
2	10 - 39	1 – 1.9	5 – 9	3 – 4
3	40 – 79	2 – 4.9	10 – 14	5 – 6
4	80 – 164	5 – 9.9	15 – 19	7 – 8
5	165 and >	10 and >	20 and >	9 – 10

La signification de chaque niveau est relative : un tronçon en état 2 (G2) est plus dégradé qu'un tronçon en état 1 (G1), etc.....

7.2 Annexe 2 : critères de décision en situation d'incertitude

7.2.1 Exemple d'application

On considère 3 actions possibles (a1, a2, a3) aboutissant à des gains différents selon quatre états possibles de l'environnement (e1, e2, e3, e4).

Tableau 73 : exemple de matrice des gains $R_{aj, ei}$

Actions\états	e1	e2	e3	e4
a1	20	25	40	100
a2	5	30	50	125
a3	40	50	75	0

Nous comparons les trois actions possibles afin de sélection le meilleur selon les critères présentés dans la suite.

7.2.2 Critères de décision

Tableau 74 : critères de choix d'une meilleure action

Critère	Fonction de valorisation	Critère de choix	Exemple d'application
LAPLACE	évaluer la moyenne des résultats de chaque action $V_{a_j} = \frac{1}{n}\sum_{e_i=e_1}^{e_i=e_n} R_{a_j,e_i}$	choisir l'action dont la moyenne est la plus élevée. $a^* \in \arg\max(V_{a_j})$ Critère de la raison insuffisante car tout se passe comme si on cherchait à maximiser une espérance mathématique de gain comme si on était dans un univers risqué et équiprobable	$V_{a_1} = \frac{1}{4}(20+25+40+100) = 46{,}25$ $V_{a_2} = \frac{1}{4}(5+30+50+125) = 52{,}5$ $V_{a_3} = \frac{1}{4}(40+50+75+0) = 41{,}25$ $\Rightarrow \arg\max(V_{a_j}) = a^* = a_2$
WALD	Déterminer le résultat minimum que peut rapporter chaque action. $V_{a_j} = \inf_{e_i}(R_{j,i})$	Choisir l'action dont la fonction de valorisation est la plus élevée. $a^* \in \arg\max(V_{a_j})$ Critère trop pessimiste : l'agent se comporte comme un pessimiste	$V_{a_1} = \inf(20;25;40;100) = 20$ $V_{a_2} = \inf(5;30;50;125) = 5$ $V_{a_3} = \inf(40;50;75;0) = 0$ $\Rightarrow \arg\max(V_{a_j}) = a^* = a_1$
HURWICZ	Déterminer une fonction prenant en compte le pire des résultats avec la probabilité α et le meilleur résultat avec la probabilité (1- α). $V_{a_j} = \alpha.\inf_{e_i}(R_{a_j,e_i}) + (1-\alpha)\sup_{e_i}(R_{a_j,e_i})$	Choisir l'action dont la fonction de valorisation est la plus élevée. $a^* \in \arg\max(V_{a_j})$ Généralisation du choix d'un agent qui ne serait ni complètement optimiste, ni complètement pessimiste.	$V_{a_1} = \alpha.20 + (1-\alpha)100 = 100 - 80.\alpha$ $V_{a_2} = \alpha.5 + (1-\alpha).125 = 125 - 120.\alpha$ $V_{a_3} = \alpha.0 + (1-\alpha).75 = 75 - 75.\alpha$ L'agent doit connaître son degré d'optimisme α ! Si α = 0, l'agent est résolument optimiste, $a^* = a_2$ Si α = 1, l'agent est résolument pessimiste, $a^* = a_1$
SAVAGE	On détermine une fonction de regret qui mesure le manque à gagner en n'ayant pas choisi la « bonne action » pour chaque état de la nature. $V_{a_j} = \sum_{e_i=1}^{e_i=n}\left(\sup_{a_j}(R_{a_j,e_i}) - R_{a_j,e_i}\right)$	Choisir l'action dont la fonction de regret est la plus faible. $a^* \in \arg\min(V_{a_j})$	$V_{a_1} = (40-20)+(50-25)+(75-40)+(125-100) = 105$ $V_{a_2} = (40-5)+(50-30)+(75-50)+(125-125) = 80$ $V_{a_3} = (40-40)+(50-50)+(75-75)+(125-0) = 125$ $\Rightarrow \arg\min(V_{a_j}) = a^* = a_2$

7.3 Annexe 3 : synthèse de l'étude numérique des différents critères

7.3.1 Critère R/NUH4/DEB/BOU

Les indices (N, IR, distribution du critère, IL, IS, IC, IAP) sont définis dans le chapitre 3.

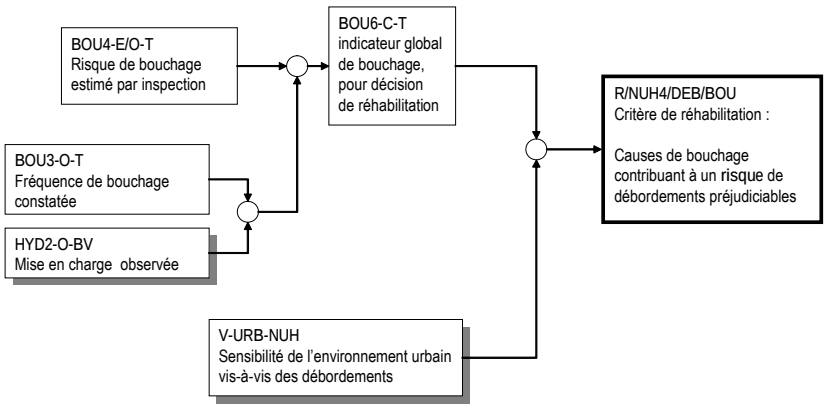


Figure 65 : formulation du critère R/NUH4/DEB/BOU

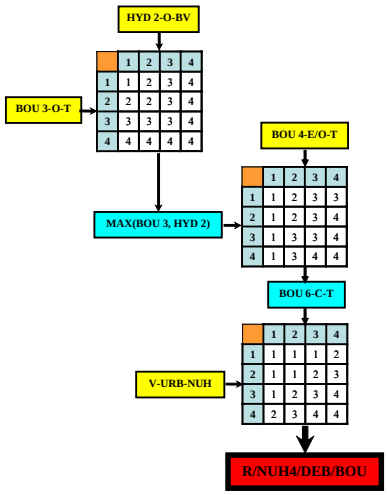


Figure 66 : opérateurs d'évaluation du critère R/NUH4/DEB/BOU

Tableau 75 : nature des opérateurs et influence relative des indicateurs pour le critère étudié

Indicateur	N & IR		
	Opérateur (1)	Opérateur (2)	opérateur (3)
BOU 3	N = 3.125 (max) IR = 50 % (moy)	N = 2.625 (moy-max) IR = 21 % (moy-faible)	N = 2.1875 (moy – min)
HYD 2	IR = 50 % (moy)		IR = 50 % (moy)
BOU 4		IR = 79 % (moy-fort)	
V-URB			IR = 50 % (moy)

Tableau 76 : tableau de synthèse concernant le critère R/NUH4/DEB/BOU

Indicateur	IL (%)	IS (%)	IAP (%)	IC	Niveau d'influence
BOU 3	60	30	0	2.75 (16 %)	faible
HYD 2	60	30	0	2.75 (16 %)	faible
BOU 4	100	47	12.5	1.4 (32 %)	moyen
V	100	67	0	1.1 (36 %)	fort

Tableau 77 : commentaires associés à la formulation du critère R/NUH4/DEB/BOU

Distribution des valeurs : type c	Une distribution uniforme sur BOU4 est trop pessimiste : 31% en état 1, 25 % en état 2, 18 % en état 3, 26 % en état 4
Opérateurs	Opérateur BOU3 ⊗ HYD2 à étudier (pertinence de Max ?)
Niveaux d'influence	BOU4 et V sont prédominants, ce qui est cohérent compte tenu du critère (il ne faut pas attendre que le tronçon se bouche, c'est-à-dire BOU3=4 pour intervenir)
Indice d'anomalie	BOU4 : justifié

7.3.2 Critère R/NUH5/DEB-TP/HY

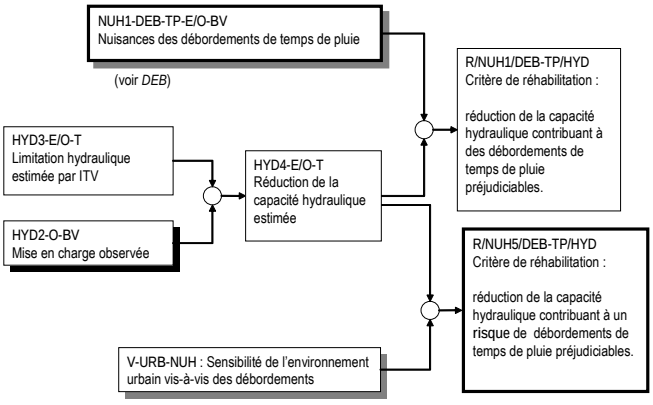


Figure 67 : formulation du critère R/NUH5/DEB-TP/HY

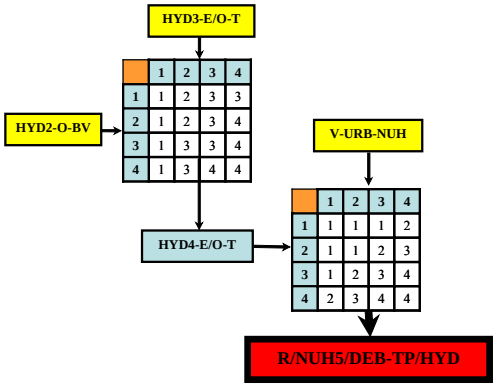


Figure 68 : opérateurs d'évaluation du critère R/NUH5/DEB-TP/HY

Tableau 78 : nature des opérateurs et influence relative des indicateurs pour le critère R/NUH5/DEB-TP/HY

Indicateur	N & IR	
	Opérateur (1)	Opérateur (2)
HYD 2	N = 2.625 (moy – max) IR = 21 % (moy-faible)	N = 2.1875 (moy – min) IR = 50 % (moy)
HYD 3	IR = 79 % (moy – max)	
V-URB-NUH		IR = 50 % (moy)

Tableau 79 : tableau de synthèse concernant le critère R/NUH5/DEB-TP/HY

Indicateur	IL (%)	IS (%)	IAP (%)	IC	Niveau d'influence
HYD2	69	35	0	2.1	faible
HYD3	100	50	9	1.4	moyenne
V-Urb-NUH	100	71	0	1.1	fort

Tableau 80 : commentaires associés à la formulation du critère R/NUH5/DEB-TP/HY

Distribution des valeurs : type c	Une distribution uniforme sur HYD3 est trop pessimiste : 34% en état 1, 25 % en état 2, 19 % en état 3, 22 % en état 4 (type C).
Niveaux d'influence	V est prédominant, ce qui est cohérent compte tenu du critère
Indice d'anomalie	HYD3 justifié

7.3.3 Critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 connu)

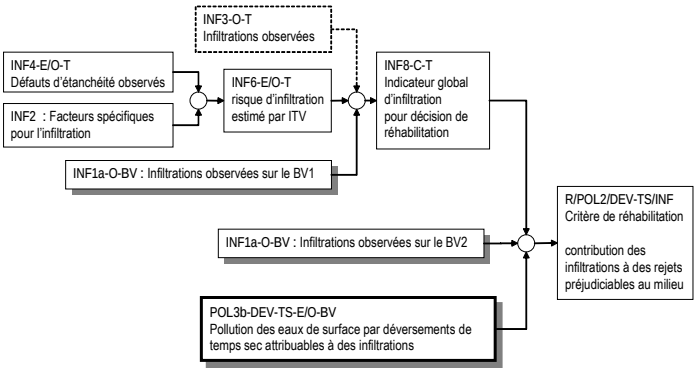


Figure 69 : formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 connu)

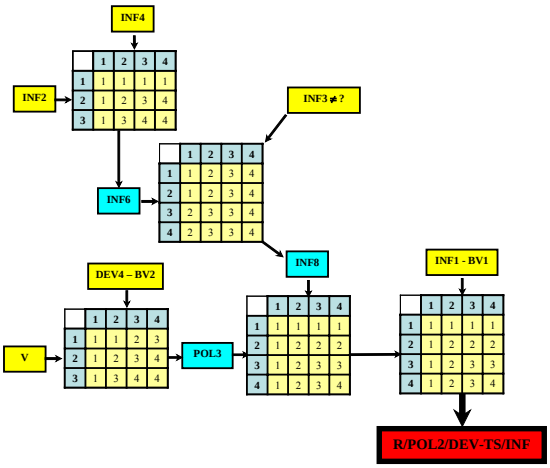


Figure 70 : opérateurs d'évaluation du critère R/POL2/DEV-TS/INF lorsque INF3 est connu

Concernant la distribution du critère, pour une distribution homogène des indicateurs (2304 cas étudiés) on obtient la répartition suivante : 57% en état 1, 27.5 % en état 2, 14 % en état 3, 1.5 % en état 4 (type a)

Tableau 81 : nature des opérateurs et influence relative des indicateurs pour le critère R/POL2/DEV-TS/INF, cas INF3 connu

Indicateur	N & IR			
	Opérateur (1)	Opérateur (2)	opérateur (3)	opérateur (4)
INF4	N = 2.16 (moy – min) IR = 43 % (moy)	N = 2.75 (moy – max) IR = 17 % (faible)	N = 1.875 (min) IR = 50 % (moy)	N = 1.875 (min) IR = 50 % (moy)
INF2	IR = 57 % (moy)			
INF3		IR = 83 % (fort)		
V-ES-POL		N = 2.4 (moy) IR = 38 % (moy – faible)	IR = 50 % (moy)	
DEV4		IR = 62 % (moy – forte)		
INF1 – BV1				IR = 50 % (moy)

Tableau 82 : tableau de synthèse concernant le critère R/POL2/DEV-TS/INF cas INF3 connu

Indicateur	IL (%)	IS (%)	IAP (%)	IC	Niveau d'influence
INF4	87.8	25	0	2.3	faible
INF2	87.8	34	0	2.1	faible
V-ES-POL	92.5	66	0	1.8	moyen - faible
DEV4	100	75	3.5	1.65	moyen
INF3	100	100	0	1.4	moyen - fort
INF1 – BV1	100	100	0	0.95	fort

Tableau 83 : commentaires associés à la formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 connu)

Niveaux d'influence	INF1-BV1 (sur BV2), INF3 et DEV4 : justifiés

7.3.4 Critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 inconnu)

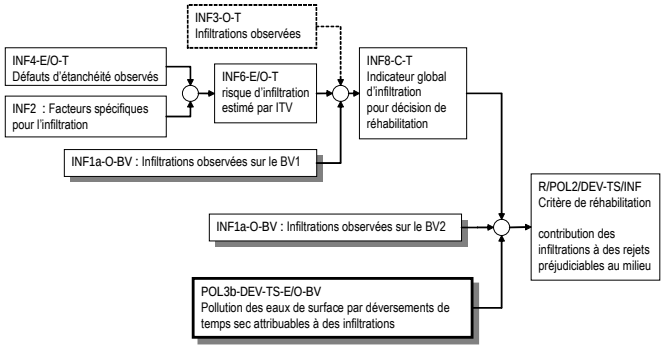


Figure 71 : formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 inconnu)

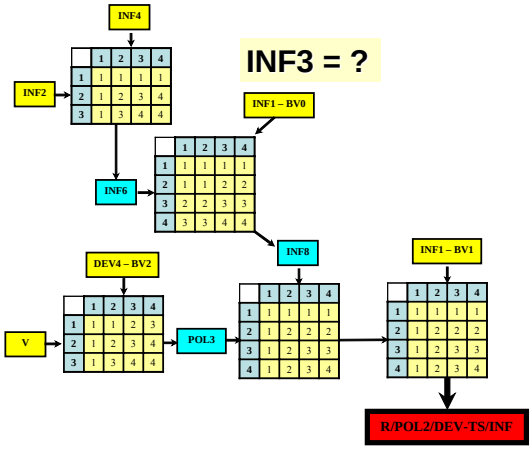


Figure 72 : opérateurs d'évaluation du critère lorsque INF3 est inconnu

Concernant la distribution du critère, pour une distribution homogène des indicateurs (2304 cas étudiés) on obtient la répartition suivante : 77% en état 1, 15 % en état 2, 7.5 % en état 3, 0.5 % en état 4 (type a).

Tableau 84 : nature des opérateurs et influence relative des indicateurs pour le critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 inconnu)

Indicateur	Opérateur (1)	N & IR Opérateur (2)	opérateur (3)	opérateur (4)
INF4	N = 2.16 (moy – min) IR = 43 % (moy)	N = 2.125 (moy – min) IR = 77 % (moy – fort)	N = 1.875 (min) IR = 50 % (moy)	
INF2	IR = 57 % (moy)			
INF1 – BV0		IR = 23 % (moy – faible)		
V		N = 2.4 (moy) IR = 38 % (moy – forte)	IR = 50 % (moy)	N = 1.875 (min) IR = 50 % (moy)
DEV4		IR = 62 % (moy – faible)		
INF1 – BV1				IR = 50 % (moy)

Tableau 85 : tableau de synthèse concernant le critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 inconnu)

Indicateur	IL (%)	IS (%)	IAP (%)	IC	Niveau d'influence
INF1 – BV0	93.75	50	0	1.85	faible
V	96	66	0	1.8	faible
DEV4	100	66	2	1.65	moyen
INF4	100	66	1.5	1.6	moyen
INF2	100	66	4.5	1.55	moyen
INF1 – BV1	100	100	0	0.95	fort

Tableau 86 : commentaires associés à la formulation du critère R/POL2/DEV-TS/INF (INF3 inconnu)

Niveaux d'influence	INF1-BV1 (sur BV2), INF4, INF2 et DEV4 : justifiés

7.4 Annexe 4 : synthèse de l'étude des critères

Les notations utilisées (M, m, W, X, S) pour classer les opérateurs de fusion des indicateurs RERAU sont définies au titre (4-2) dans le chapitre 4.

7.4.1 Les opérateurs min et Max

Tableau 87 : indicateurs et critères évalués avec un opérateur max

Indicateur ou critère calculé	Indicateurs utilisés	Critère(s) concerné(s)
POL6-DEV-TSTP-E/O-BV = (Max(POL3a, POL4)⊗POL2a)	POL3a-DEV-TS-E/O-BV : pollution des eaux de surface par des déversement de temps sec dus à des problèmes hydrau. aval POL4-DEV-TP-E/O-BV : pollution des eaux de surface par des déversement de temps de pluie	R/POL4/DEV/BOU : Causes de bouchage contribuant à des déversements polluant les eaux de surface R/POL5/DEV/ENS : pollution des eaux de surface par des déversements dus à un ensablement aval
BOU6-C-T = (BOU4 ⊗ Max (BOU3, HYD2))	BOU3-O-T : fréquence de bouchage constatée HYD2-O-BV : Mise en charge observée	R/NUH4/DEB/BOU : cause de bouchage contribuant à un risque de débordements préjudiciables R/POL9/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements polluant les eaux de surface R/PON4/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements polluant les eaux souterraines R/NUH2/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements préjudiciables R/POL4/DEV/BOU : Causes de bouchage contribuant à des déversements polluant les eaux de surface
NUH3-DEB-TSTP-E/O-BV = max (NUH1, NUH2)	NUH1-DEB-TP-E/O-BV : Nuisance due à des débordements de temps de pluie NUH2-DEB-TS-E/O-BV : Nuisance due à des débordements de temps sec	R/NUH3/DEB/ENS : réhabilitation pour nuisances de débordements dus à un ensablement aval R/NUH2/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements préjudiciables
EXF8-C-T = S (max (EXF1, EXF3), EXF6)	EXF3-O-T: exfiltration observées EXF1-O-BV : exfiltration observées sur le BV	R/PON1/EXF : exfiltration provoquant une pollution du sol et des eaux souterraines R/DOB2/EXF : exfiltrations provoquant des dommages au bâti
ENS6-C-T = S (ENS4, max (ENS3, HYD2))	HYD2-O-BV : mise en charge observée ENS3-O-T : niveau maximum d'ensablement constaté	R/POL8/DEB/ENS : réhabilitation pour pollution des eaux de surface par des débordements dus à un ensablement aval R/PON3/DEB/ENS : réhabilitation pour pollution des eaux souterraines par des débordements dus à un ensablement aval R/NUH3/DEB/ENS : réhabilitation pour nuisances de débordements dus à un ensablement aval R/POL5/DEV/ENS : pollution des eaux de surface par des déversements dus à un ensablement aval
POL1-INF-STEP-E/O-BV = ?Max (POL2b, (INF1, V-STEP, V- ES))	POL2b – INF – STEP – O – BV : taux de dépassement de l'autorisation de rejet d'une station d'épuration INF1a – O – BV : infiltrations observées V-STEP – INF : sensibilité de la STEP aux EPI V – ES – POL : sensibilités du milieu récepteur	R/POL1/STEP/INF : Contribution des infiltrations probables à des rejets de STEP préjudiciables au milieu récepteur

Tableau 88 : indicateurs et critères évalués avec un opérateur min

Indicateur ou critère calculé	Indicateurs utilisés	Critère(s) concerné(s)
R/NUH1/DEB-TP/HYD = min (NUH1, HYD4)	HYD4-C-T : Réduction de la capacité hydraulique estimée par ITV, présumée contribuer à des dysfonctionnements amont NUH1-DEB-TP-E/O-BV : nuisances des débordements de temps de pluie	R/NUH1/DEB-TP/HYD : Réduction de la capacité hydraulique contribuant à des débordements de temps de pluie préjudiciables

R/POL7/DEB-TP/HYD = min (POL7, HYD4)	HYD4-C-T : Réduction de la capacité hydraulique estimée par ITV, présumée contribuer à des dysfonctionnements amont POL7-DEB-TP-E/O-BV : pollution des eaux de surface par des débordements de temps de pluie	R/POL7/DEB-TP/HYD : limitation hydraulique contribuant à des débordements de temps de pluie polluant les eaux de surface
R/PON2/DEB-TP/HYD = min (PON1, HYD4)	HYD4-C-T : Réduction de la capacité hydraulique estimée par ITV, présumée contribuer à des dysfonctionnements amont PON1-DEB-TP-E/O-BV : pollution des eaux souterraines par des débordements de temps de pluie	R/PON2/DEB-TP/HYD : limitation hydraulique contribuant à des débordements de temps de pluie polluant les eaux souterraines
R/TRA2/ENS = min (ENS4, TRA1)	ENS4-E/O-T: risque d'ensablement constaté par inspection TRA1-ENS-E/O-T : nuisances dues au curage	R/TRA2/ENS : nuisances dues au curage
R/TRA3/BOU = min (BOU4, TRA2)	BOU4-E/O-T: risque de bouchage constaté par inspection TRA2-BOU-E/O-T : nuisances dues au opérations de désobstruction	R/TRA2/ENS : cause de bouchage contribuant à des nuisances d'exploitation
R/POL2/DEV-TS/INF = min (POL3b, INF8, INF1a)	POL3b-DEV-TS-E/O-BV = W^*_{max}(DEV4, V-ES) : Pollution des eaux de surface par déversements de temps sec attribuables à des infiltrations INF8-C-T : indicateur global d'infiltration pour décision de réhabilitation INF1a-O-BV : infiltration observées sur le BV	R/POL2/DEV-TS/INF : contribution des infiltration à des rejets préjudiciables au milieu
R/POL3/DEV-TP/HYD = min (HYD4, POL5a)	HYD4-C-T : Réduction de la capacité hydraulique estimée par ITV, présumée contribuer à des dysfonctionnements amont POL5a : Indicateur global de pollution des eaux de surface par déversements de temps de pluie dus à des problèmes aval	R/POL3/DEV-TP/HYD : limitations hydrauliques contribuant à des déversement de temps de pluie polluant les eaux de surface
R/POL6/DEV-ENS = min (ENS7, POL5b)	ENS7-C-T : indicateur global d'ensablement préjudiciable aux surverses aval POL5b : Indicateur global de pollution des eaux de surface par déversements de temps de pluie reprenant des dépôts amont	R/POL6/DEV-ENS : causes d'ensablement contribuant à la pollution des eaux de surface par des déversements aval
R/POL8/DEB/ENS = min (ENS6, POL8)	ENS6-C-T : ensablement d'origine structurelle, préjudiciable à la capacité hydraulique POL8-DEB-TSTP-E/O-BV : pollution des eaux de surface par des débordements de temps sec ou de temps de pluie	R/POL8/DEB/ENS : réhabilitation pour pollution des eaux de surface par des débordements dus à un ensablement aval
R/PON3/DEB/ENS = min (ENS6, PON2)	ENS6-C-T : ensablement d'origine structurelle, préjudiciable à la capacité hydraulique PON2-DEB-TSTP-E/O-BV : pollution des eaux souterraines par des débordements de temps sec ou de temps de pluie	R/PON3/DEB/ENS : réhabilitation pour pollution des eaux souterraines par des débordements dus à un ensablement aval
R/POL9/DEB/BOU = min (BOU6, POL8)	BOU6-C-T : indicateur global de bouchage pour décision de réhabilitation POL8-DEB-TSTP-E/O-BV : pollution des eaux de surface par des débordements de temps sec ou de temps de pluie	R/POL9/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements polluant les eaux de surface
R/PON4/DEB/BOU = min (BOU6, PON2)	BOU6-C-T : indicateur global de bouchage pour décision de réhabilitation PON2-DEB-TSTP-E/O-BV : pollution des eaux souterraines par des débordements de temps sec ou de temps de pluie	R/PON4/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements polluant les eaux souterraines
R/NUH3/DEB/ENS = min (ENS6, NUH3)	NUH3-DEB-TSTP-E/O-BV : nuisances dues aux débordements de temps sec ou de temps de pluie ENS6-C-T : ensablement d'origine structurelle, préjudiciable à la capacité hydraulique	R/NUH3/DEB/ENS : réhabilitation pour nuisances de débordements dus à un ensablement aval
R/NUH2/DEB/BOU = min (BOU6, NUH3)	NUH3-DEB-TSTP-E/O-BV : nuisances dues aux débordements de temps sec ou de temps de pluie BOU6-C-T : indicateur global de bouchage pour décision de réhabilitation	R/NUH2/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements préjudiciables
R/POL1/STEP/INF = min (POL1, INF8)	POL1-INF-STEP-E/O-BV = Pollution des eaux de surface due à une dégradation des performance de la STEP, préjudiciable au milieu récepteur, et due à des eaux parasites d'infiltration INF8-C-T : indicateur global d'infiltration pour décision de réhabilitation	R/POL1/STEP/INF : Contribution des infiltrations probables à des rejets de STEP préjudiciables au milieu récepteur
R/POL4/DEV/BOU = min (POL6, BOU6)	POL6-DEV-TSTP-E/O-BV : indicateur global de pollution des eaux de surface par déversement de temps sec ou de temps de pluie BOU6-C-T : indicateur global de bouchage pour décision de réhabilitation	R/POL4/DEV/BOU : Causes de bouchage contribuant à des déversements polluant les eaux de surface
R/POL5/DEV/ENS = min (POL6, ENS6)	POL6-DEV-TSTP-E/O-BV : indicateur global de pollution des eaux de surface par déversement de temps sec ou de temps de pluie ENS6-C-T : ensablement d'origine structurelle, préjudiciable à la capacité hydraulique	R/POL5/DEV/ENS : pollution des eaux de surface par des déversements dus à un ensablement aval
	CXS1 – E/O – BV : surcoût d'exploitation de la station d'épuration	

R/CXS1/INF = min (CXS1, INF8)	INF8-C-T : indicateur global d'infiltration pour décision de réhabilitation	R/CXS1/INF : contribution des infiltrations à un surcoût d'exploitation de la station d'épuration
R/CXR3/INF = min (CXR3, INF8)	CXR3 – E/O – BV : surcoût d'exploitation du réseau INF8-C-T : indicateur global d'infiltration pour décision de réhabilitation	R/CXR3/INF : contribution des infiltrations à un surcoût d'exploitation du réseau
R/CXR1/ENS = min (CXR2, ENS4)	ENS4-E/O-T : risque d'ensablement constaté par inspection CXR2-ENS-E/O-T : surcoût d'exploitation du réseau dû aux interventions de curage	R/CXR1/ENS : cause d'ensablement entraînant des coûts de curage prohibitifs
R/CXR2/BOU = min (CXR3, BOU4)	BOU4-E/O-T : risque de bouchage constaté par inspection CXR3-BOU-E/O-T : surcoût d'exploitation du réseau dû aux interventions de désobstruction	R/CXR2/BOU : cause de bouchage contribuant à des surcoûts d'exploitation du réseau

7.4.2 Les opérateurs compensatoires

On a distingué plusieurs familles d'opérateurs compensatoires :

- W* : indique un opérateur compensatoire traduit par un tableau 4x4 comportant une ligne de 1 ou une colonne de 1 ; ex : une vulnérabilité très élevée ne compense pas l'absence de dysfonctionnement : le tableau comporte une colonne de 1 (impact nul ou négligé).
- W** : indique un opérateur compensatoire traduit par un tableau 4x4 comportant une ligne de 1 et une colonne de 1 ;
- $W_{\min}$ indique un indicateur compensatoire se rapprochant de l'opérateur min ;
- $W_{\max}$ indique un indicateur compensatoire se rapprochant de l'opérateur max.

7.4.2.1 Les opérateurs compensatoires du type «W_{max}»

Tableau 89 : indicateurs ou critères calculés avec un opérateur du type $W_{\max}$

Indicateur ou critère calculé	Indicateurs utilisés	Poids	Critère(s) concerné(s)
POL3- DEV-TS-E/O-BV = W^*_{max}(DEV4, V) pollution des eaux de surface par déversement de temps sec	DEV4-TS-O-BV : déversements observés en temps sec V-ES-POL : vulnérabilité des eaux de surface	1/2 1/2	R/POL4/DEV/BOU : Causes de bouchage contribuant à des déversements polluant les eaux de surface R/POL5/DEV/ENS : pollution des eaux de surface par des déversements dus à un ensablement aval
POL4- DEV-TP-E/O-BV = W^*_{max}(DEV5, V) pollution des eaux de surface par déversement de temps de pluie	DEV5-TP-O-BV : déversements observés avec pluies significatives V-ES-POL : vulnérabilité des eaux de surface	1/2 1/2	R/POL3/DEV-TP/HYD : limitations hydrauliques contribuant à des déversement de temps de pluie polluant les eaux de surface R/POL6/DEV-ENS : causes d'ensablement contribuant à la pollution des eaux de surface par des déversements aval R/POL4/DEV/BOU : Causes de bouchage contribuant à des déversements polluant les eaux de surface R/POL5/DEV/ENS : pollution des eaux de surface par des déversements dus à un ensablement aval
HYD4-C-T = W^*_{max}(HYD2, HYD3)	HYD2-O-BV : mise en charge observée	2/5	R/NUH5/DEB-TP/HYD : Réduction de la capacité hydraulique contribuant à un risque de débordements de temps de pluie

Indicateur ou critère calculé	Indicateurs utilisés	Poids	Critère(s) concerné(s)
Réduction de la capacité hydraulique estimée par ITV, présumée contribuer à des dysfonctionnements amont	HYD3-E/O-T : limitation hydraulique estimée par ITV	3/5	contribuant à un risque de débordements de temps de pluie préjudiciables R/NUH1/DEB-TP/HYD : Réduction de la capacité hydraulique contribuant à des débordements de temps de pluie préjudiciables R/POL7/DEB-TP/HYD : limitation hydraulique contribuant à des débordements de temps de pluie polluant les eaux de surface R/PON2/DEB-TP/HYD : limitation hydraulique contribuant à des débordements de temps de pluie polluant les eaux souterraines R/POL3/DEV-TP/HYD : limitations hydrauliques contribuant à des déversement de temps de pluie polluant les eaux de surface
NUH1-DEB-TP-E/O-BV = W^*_{max}(DEB5, V) nuisances des débordements de temps de pluie	DEB5-TP-O-BV : débordement observés avec pluie significative inférieure au seuil de dimensionnement V-URB-NUH : sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis des débordements	1/2 1/2	R/NUH1/DEB-TP/HYD : Réduction de la capacité hydraulique contribuant à des débordements de temps de pluie préjudiciables R/NUH3/DEB/ENS : réhabilitation pour nuisances de débordements dus à un ensablement aval R/NUH2/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements préjudiciables
POL7-DEB-TP-E/O-BV = W^*_{max}(DEB5, V) Pollution des eaux de surface par des débordements de temps de pluie	DEB5-TP-O-BV : débordement observés avec pluie significative inférieure au seuil de dimensionnement V-ES-POL : vulnérabilité des eaux de surface	1/2 1/2	R/POL7/DEB-TP/HYD : limitation hydraulique contribuant à des débordements de temps de pluie polluant les eaux de surface
PON1-DEB-TP-E/O-BV = W^*_{max}(DEB5, V) Pollution des eaux souterraines par des débordements de temps de pluie	DEB5-TP-O-BV : débordement observés avec pluie significative inférieure au seuil de dimensionnement V-SN-PON : sensibilité du milieu récepteur	1/2 1/2	R/PON2/DEB-TP/HYD : limitation hydraulique contribuant à des débordements de temps de pluie polluant les eaux souterraines
NUH2-DEB-TS-E/O-BV = W^*_{max}(DEB4, V) Nuisance due à des débordements de temps sec	DEV4-TS-O-BV : déversements observés en temps sec V-URB-NUH : sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis des débordements	1/2 1/2	R/NUH3/DEB/ENS : réhabilitation pour nuisances de débordements dus à un ensablement aval R/NUH2/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements préjudiciables
EXF6-E/O-T = W^{**}_{max}(EXF2, EXF4) Risque d'exfiltration estimé par ITV	EXF2-E/R-T:facteur spécifiques pour l'exfiltration EXF4-E/O-T:défauts d'étanchéité observées	2/5 3/5	R/DOB2/EXF : exfiltration provoquant des dommages au bâti R/PON1/EXF : exfiltration provoquant une pollution du sol et des eaux souterraines
R/PON1/EXF = W^*_{max}(EXF8, V-SN)	EXF8-C-T : indicateur global d'exfiltration pour décision de réhabilitation V-SN-PON : vulnérabilité du sol et de la nappe	1/2 1/2	
INF6-E/O-T = W^{**}_{max}(INF2, INF4) Risque d'infiltration estimé par ITV	INF2-E/R-T : facteur spécifiques pour l'exfiltration INF4-E/O-T:défauts d'étanchéité observées	2/5 3/5	R/POL2/DEV-TS/INF : contribution des infiltration à des rejets préjudiciables au milieu R/POL1/STEP/INF : Contribution des infiltrations probables à des rejets de STEP préjudiciables au milieu récepteur R/CXS1/INF : contribution des infiltrations à un surcoût d'exploitation de la station d'épuration R/CXR3/INF : contribution des infiltrations à un surcoût d'exploitation du réseau
POL8-DEB-TSTP-E/O-BV = W^*_{max}(DEB4, V-ES) Pollution des eaux de surface par des débordements de temps de pluie ou de temps sec	DEB4-Ts-O-BV : débordement observés avec pluie significative ou de temps sec V-ES-POL : vulnérabilité des eaux de surface	1/2 1/2	R/POL8/DEB/ENS : réhabilitation pour pollution des eaux de surface par des débordements dus à un ensablement aval R/POL9/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements polluant les eaux de surface
PON2-DEB-TSTP-E/O-BV = W^*_{max}(DEB4, V)	DEB4-Ts-O-BV : débordement observés avec pluie significative ou de temps sec	1/2	R/PON3/DEB/ENS : réhabilitation pour pollution des eaux souterraines par des débordements dus à un ensablement aval

Indicateur ou critère calculé	Indicateurs utilisés	Poids	Critère(s) concerné(s)
Pollution des eaux souterraines par débordements de temps de pluie ou de temps sec	V-SN-PON : vulnérabilité du sol et de la nappe	1/2	R/PON4/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements polluant les eaux souterraines
(INF1a, V-STEP) = W*max(INF1a, V - STEP)	INF1a – O – BV : infiltrations observées	1/2	R/POL1/STEP/INF : Contribution des infiltrations probables à des rejets de STEP préjudiciables au milieu récepteur
	V-STEP – INF : sensibilité de la STEP aux EPI	1/2	
(INF1a, V-STEP, V- ES) = W*max((INF1a, V - STEP), V – ES)	INF1a – O – BV : infiltrations observées	1/2	
	V-STEP – INF : sensibilité de la STEP aux EPI	1/2	
	V – ES – POL : sensibilités du milieu récepteur		
DOB1-O-T = W**max(EXF6, DOB1) dommages au bâti par infiltration d'eau	EXF6-E/O-T : Risque d'exfiltration estimé par ITV	1/2	R/DOB2/EXF : exfiltration provoquant des dommages au bâti
	DOB1-O-T: dommages au bâti par infiltration d'eau	1/2	
R/DOB2/EXF = W**max(EXF8, DOB1)	EXF8-C-T : indicateur global d'exfiltration pour décision de réhabilitation	1/2	
	DOB1-O-T: dommages au bâti par infiltration d'eau	1/2	

7.4.2.2 Les opérateurs compensatoires du type «W_{min}»

Tableau 90 : indicateurs ou critères calculés avec un opérateur de type W_{min}

Indicateur ou critère calculé	Indicateurs utilisés	Poids	Critère(s) concerné(s)
R/NUH4/DEB/BOU = W_{min}(BOU6, V) cause de bouchage contribuant à un risque de débordements préjudiciables	BOU6-C-T : indicateur globale de bouchage, pour décision de réhabilitation	1/2	R/NUH4/DEB/BOU : cause de bouchage contribuant à un risque de débordements préjudiciables
	V-URB-NUH : sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis des débordements	1/2	
R/NUH5/DEB-TP/HYD = W_{min}(HYD4, V-URB-NUH) Réduction de la capacité hydraulique contribuant à un risque de débordements de temps de pluie préjudiciables	HYD4-C-T : Réduction de la capacité hydraulique estimée par ITV, présumée contribuer à des dysfonctionnements amont	1/2	R/NUH5/DEB-TP/HYD : Réduction de la capacité hydraulique contribuant à un risque de débordements de temps de pluie préjudiciables
	V-URB-NUH : sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis des débordements	1/2	
TRA1-ENS-E/O-T = W_{min}(ENS1, V-URB-TRA) nuisances dues au curage	ENS1-O-T: fréquence de curage pratiquée	1/2	R/TRA2/ENS : nuisances dues au curage
	V-URB-TRA : sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis des opérations d'exploitation et des travaux	1/2	
TRA2-BOU-E/O-T = W_{min}(BOU3, V-URB-TRA) nuisances dues aux opérations de désobstruction	BOU3-O-T: fréquence de bouchage constatée	1/2	R/TRA2/ENS : cause de bouchage contribuant à des nuisances d'exploitation
	V-URB-TRA : sensibilité de l'environnement urbain vis-à-vis des opérations d'exploitation et des travaux	1/2	
R/DOB1/EFF = W_{min}(EFF5, V-URB-DOB-EFF)	EFF5-C-T : risque d'effondrement estimé d'après investigation	1/2	R/DOB1/EFF : risque de dommages au bâti dus à un effondrement
	V-URB-DOB-EFF: sensibilité de l'environnement bâti : risque de dommages	1/2	
R/TRA1/EFF = W_{min}(EFF5, V-URB-TRA)	EFF5-C-T : risque d'effondrement estimé d'après investigation	1/2	R/TRA1/EFF : risque de perturbations dues à un effondrement
	V-URB-TRA: sensibilité de l'environnement urbain : perturbations importantes des activités	1/2	

7.4.2.3 Les opérateurs compensatoires du type «W»

Tableau 91 : indicateurs ou critères calculés avec un opérateur de type W

Indicateur ou critère calculé	Indicateurs utilisés	Poids	Critère(s) concerné(s)
R/CDV2/ATC = W*(ATC7, V-CDV)	ATC7-O-T : dégradation de la canalisation par attaque chimique, constatée par investigation	1/2	R/CDV2/ATC Surcoût d'une réduction de la

	V-CDV : facteurs de coûts en cas de remplacement (diamètre, …)	1/2	
R/CDV3/RAC = W*(RAC4, V-CDV)	RAC4-O-T : dégradation de la canalisation par intrusion de racines, constatée par investigation	1/2	R/CDV3/RAC Surcoût d'une réduction de la durée de vie de la conduite par intrusion de racines
	V-CDV : facteurs de coûts en cas de remplacement (diamètre, …)	1/2	
R/CDV4/ABR = W*(ABR4, V-CDV)	ABR4-O-T : dégradation de la canalisation par abrasion, constatée par investigation	1/2	R/CDV4/ABR Surcoût d'une réduction de la durée de vie de la conduite par abrasion
	V-CDV : facteurs de coûts en cas de remplacement (diamètre, …)	1/2	
CXS1 – E/O – BV = W*(INF1a, V – CXS1) surcoût d'exploitation de la station d'épuration	INF1a – O – BV : infiltrations observées sur le BV	1/2	R/CXS1/INF : contribution des infiltrations à un surcoût d'exploitation de la station d'épuration
	V – CXS1 – INF : facteurs de coûts	1/2	
CXR1 – E/O – BV = W*(INF1a, V – CXS1) surcoût d'exploitation du réseau	INF1a – O – BV : infiltrations observées sur le BV	1/2	R/CXR3/INF : contribution des infiltrations à un surcoût d'exploitation du réseau
	V – CXR– INF : facteurs de coûts	1/2	
CXR2-ENS-E/O-T = W*(ENS1, V – CXR) coût du curage, constaté	ENS1-O-T : fréquence de curage pratiquée	1/2	R/CXR1/ENS : cause d'ensablement entraînant des coûts de curage prohibitifs
	V-CXR-ENS : coût unitaire du curage (par intervention)	1/2	
CXR3-BOU-E/O-T = W*(BOU3, V – CXR) surcoût d'exploitation du réseau du aux interventions de désobstruction	BOU3-O-T : fréquence de bouchage constatée	1/2	R/CXR2/BOU : cause de bouchage contribuant à des surcoûts d'exploitation du réseau
	V-CXR-BOU : coût unitaire des interventions de désobstruction	1/2	
R/CDV1/DSC = W*(DSC8, V – CDV)	DSC8-C-T : réduction de la durée de vie, par dégradation du complexe sol-conduite	1/2	R/CDV1/DSC : surcoût d'une réduction de la durée de vie, par dégradation du complexe sol-conduite
	V – CDV : facteurs de coûts en cas de remplacement	1/2	

7.4.3 Les opérateurs exprimant une synergie

Tableau 92 : indicateurs et critères calculés avec un opérateur de type synergie

Indicateurs ou critères calculés	Indicateurs utilisés	Critère(s) concerné(s)
EFF4-C-T = (DSC8 X ATC7) ⊗ (RAC4 ⊗ ABR4)	DSC8-C-T : réduction de la durée de vie (DDV) par dégradation du complexe sol-conduite	R/DOB1/EFF : risque de dommages au bâti dus à un effondrement
	ATC7-O-T : réduction de la DDV par attaque chimique	R/TRA1/EFF : risque de perturbations dues à un effondrement
DSC5-C-T = X (INF8, min(HYD1, EXF4))	INF8-C-T : indicateur global d'infiltration pour décision de réhabilitation	R/CDV1/DSC : surcoût d'une réduction de la durée de vie, par dégradation du complexe sol-conduite
	HYD1-O-BV : mise en charge observée ; EXF4 : défaut d'étanchéité	
DSC6-C-T = X (DSC5, DSC1) Facteurs de risque de dégradation du complexe sol-conduite	DSC5-C-T : Facteurs de risque internes	R/CDV1/DSC : surcoût d'une réduction de la durée de vie, par dégradation du complexe sol-conduite
	DSC1-E/R-T : Facteurs de risque externes	

7.4.4 Les opérateurs de type confrontation de plusieurs sources

Tableau 93 : indicateurs ou critères évalués avec un opérateur de type S

Indicateurs ou critères calculés	Indicateurs utilisés	Critère(s) concerné(s)
POL6 = S (POL2a, max (POL3a, POL4)) indicateur global de pollution des eaux de surface par déversement de temps sec ou de temps de pluie	POL3a-DEV-TS-E/O-BV : pollution des eaux de surface par des déversement de temps sec dus à des problèmes hydrau. aval POL4-DEV-TP-E/O-BV : pollution des eaux de surface par des déversement de temps de pluie POL2a- DEV-O-BV : taux de dépassement de l'autorisation de rejet d'un déversoir d'orage	R/POL5/DEV/ENS : pollution des eaux de surface par des déversements dus à un ensablement aval R/POL4/DEV/BOU : Causes de bouchage contribuant à des déversements polluant les eaux de surface
POL5 = S (POL2a, POL4) indicateur global de pollution	POL4-DEV-TP-E/O-BV : pollution des eaux de surface par des déversement de temps de pluie	R/POL3/DEV-TP/HYD : limitations hydrauliques contribuant à des déversement de temps de pluie polluant les eaux de

Indicateurs ou critères calculés	Indicateurs utilisés	Critère(s) concerné(s)
indicateur global de pollution des eaux de surface par déversement de temps de pluie	POL2a- DEV-O-BV : taux de dépassement de l'autorisation de rejet d'un déversoir d'orage	à des déversement de temps de pluie polluant les eaux de surface R/POL6/DEV-ENS : causes d'ensablement contribuant à la pollution des eaux de surface par des déversements aval
BOU6-C-T = S (BOU4, Max (BOU3, HYD2)) BOU6-C-T : indicateur globale de bouchage, pour décision de réhabilitation	BOU3-O-T : fréquence de bouchage constatée HYD2-O-BV : Mise en charge observée BOU4-E/O-T : risque de bouchage estimé par inspection	R/NUH4/DEB/BOU : cause de bouchage contribuant à un risque de débordements préjudiciables R/POL9/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements polluant les eaux de surface R/PON4/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements polluant les eaux souterraines R/NUH2/DEB/BOU : réhabilitation pour causes de bouchage contribuant à des débordements préjudiciables R/POL4/DEV/BOU : Causes de bouchage contribuant à des déversements polluant les eaux de surface
EXF8-C-T : = S (max (EXF1, EXF3), EXF6) indicateur global d'exfiltration pour décision de réhabilitation	EXF6-E/O-T : Risque d'exfiltration estimé par ITV EXF3-O-T: exfiltration observées EXF1-O-BV : exfiltration observées sur le BV	R/PON1/EXF : exfiltration provoquant une pollution du sol et des eaux souterraines R/DOB2/EXF : exfiltration provoquant des dommages au bâti
ENS7-C-T = S (ENS4, ENS9, ENS3) indicateur global d'ensablement préjudiciable aux surverses aval	ENS3-O-T : niveau maximum d'ensablement constaté ENS4-E/O-T : risque d(ensablement constaté par inspection ENS9 : facteurs d'ensablement liés à la conception du réseau.	R/POL6/DEV-ENS : causes d'ensablement contribuant à la pollution des eaux de surface par des déversements aval
ENS6-C-T = S (ENS4, ENS9, max (ENS3, HYD2)) ensablement d'origine structurelle, préjudiciable à la capacité hydraulique	ENS9 : facteurs d'ensablement liés à la conception du réseau. ENS4-E/O-T : risque d'ensablement constaté par inspection ENS3-O-T : niveau maximum d'ensablement constaté HYD2-O-BV : mise en charge observée	R/POL8/DEB/ENS : réhabilitation pour pollution des eaux de surface par des débordements dus à un ensablement aval R/PON3/DEB/ENS : réhabilitation pour pollution des eaux souterraines par des débordements dus à un ensablement aval R/NUH3/DEB/ENS : réhabilitation pour nuisances de débordements dus à un ensablement aval R/POL5/DEV/ENS : pollution des eaux de surface par des déversements dus à un ensablement aval
INF8-C-T = S (INF3, INF6) pour INF3 ≠ ? indicateur global d'infiltration pour décision de réhabilitation	INF6-E/O-T : Risque d'infiltration estimé par ITV INF3-O-T : infiltration observées	R/POL1/STEP/INF : Contribution des infiltrations probables à des rejets de STEP préjudiciables au milieu récepteur R/POL2/DEV-TS/INF : contribution des infiltration à des rejets préjudiciables au milieu R/CXS1/INF : contribution des infiltrations à un surcoût d'exploitation de la station d'épuration R/CXR3/INF : contribution des infiltrations à un surcoût d'exploitation du réseau
INF8-C-T = S (INF1, INF6) pour INF3 = ? indicateur global d'infiltration pour décision de réhabilitation	INF6-E/O-T : Risque d'infiltration estimé par ITV INF1a-O-BV : infiltration observées sur le BV	R/POL1/STEP/INF : Contribution des infiltrations probables à des rejets de STEP préjudiciables au milieu récepteur R/POL2/DEV-TS/INF : contribution des infiltration à des rejets préjudiciables au milieu R/CXS1/INF : contribution des infiltrations à un surcoût d'exploitation de la station d'épuration R/CXR3/INF : contribution des infiltrations à un surcoût d'exploitation du réseau
DSC8-C-T = S (DSC7, DSC6) réduction de la durée de vie, par dégradation du complexe sol-conduite	DSC7-O-T : dégradation du complexe sol-conduite constatée par investigation DSC6-C-T : Facteurs de risque de dégradation du complexe sol-conduite	R/CDV1/DSC : surcoût d'une réduction de la durée de vie, par dégradation du complexe sol-conduite

7.5 Annexe 5 : la logique floue

7.5.1 Rappel historique

Les quelques points de repères historiques suivants permettent de situer dans le temps le développement de la logique floue :

17ième siècle : les connaissances incertaines ont été abordées par la notion de probabilité avec les travaux de Pascal, de Fermat et de Bernoulli.

Dans les années 30 : la notion de choix rationnel dans l'incertain a été formalisée par de Finetti et Ramsey. Dans le même temps, Russel a remarqué que la logique formelle semble mal adaptée pour formaliser le raisonnement humain.

1965 : Le Prof. L. A. Zadeh de l'université de Berkeley (Californie) a posé les bases théoriques de la logique floue à partir de l'idée d'appartenance partielle à une classe et de catégories aux limites mal définies.

1973 : L. A. Zadeh propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage.

1974 : Mamdani expérimente la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connaît la complexité, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel.

1978 : L. A. Zadeh introduit la théorie des possibilités qui fait le lien entre les ensembles flous et la modélisation non probabiliste de l'incertitude.

Un nombre important d'applications de la commande floue a été développé depuis la fin des années 60, en Europe, aux Etats-Unis, en Chine et au Japon. Ce type de commande a été largement utilisé en Europe au début des années 70 et au Japon au début des années 80, pour en faire des succès industriels.

Plus récemment les travaux se sont tournés vers le raisonnement approximatif dans le contexte de l'analyse de la décision, de la représentation des connaissances, de la classification des formes et des systèmes experts. Les sous-ensembles flous et la théorie des possibilités sont des éléments importants de la représentation de connaissances imparfaitement définies (Bouchon-Meunier, 1995).

7.5.2 Les sous-ensembles flous

La théorie des sous-ensembles flous a pour but de raisonner à partir de connaissances imparfaites (imprécises, incertaines voire incomplètes) de la pensée humaine qui opposent résistance à la logique classique. Elle permet la standardisation de la description d'un système et du traitement de données imprécises dues à l'hésitation et à la subjectivité présentes dans des résultats d'experts afin de maîtriser ses incertitudes (Dubois & Prade, 1998).

La théorie des sous-ensembles flous a été appliquée à la prédiction, le processus décisionnel et le contrôle d'actions dans des environnements caractérisés par l'incertitude, le manque de précision, et la subjectivité. Dans le domaine de la construction, la modélisation d'incertitudes par des sous ensembles flous a été utilisée pour plusieurs applications, notamment la chaîne d'approvisionnement (Petroivc *et al.*, 1998), la

planification de projet (Bonnal, 2004) et la simulation d'opérations de construction (Zhang, 2003 ; Essa, 2007).

Pour cela, la logique floue se propose de remplacer les variables booléennes par des variables flous. Ces variables fournissent un cadre théorique de représentation et de traitement de données imparfaites. Elles cherchent à assouplir ces cadres.

- **un sous-ensemble classique A** d'un ensemble de référence X ne possède que les éléments qui satisfont l'ensemble des propriétés précises. Il ne considère pas les éléments voisins car les frontières sont clairement déterminées. Sa fonction d'appartenance μ_A est décrite de la manière suivante (Bouchon-Meunier *et al.*, 2003a) :

$$\forall\, x \in X \qquad \mu_A(x) = 0 \text{ si } x \notin A$$

$$\mu_A(x) = 1 \text{ si } x \in A$$

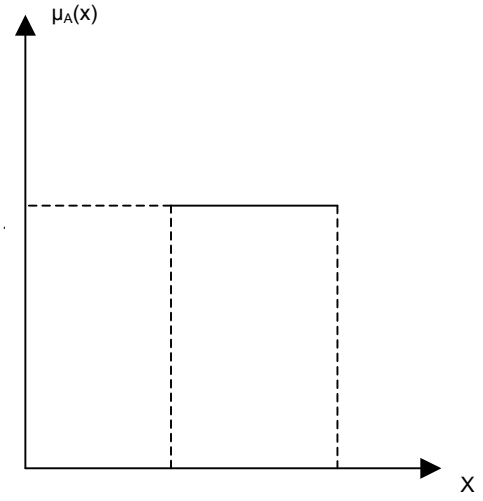


Figure 73 : fonction caractéristique de l'ensemble classique A

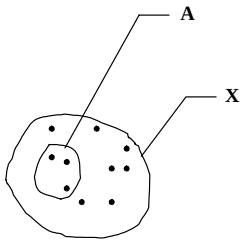


Figure 74 : concept d'univers et de sous-ensemble

- **un sous-ensemble flou B** d'un ensemble de référence X permet de mettre en évidence les nuances d'appartenance pour les éléments de X car les frontières ne sont pas clairement déterminées. En fait la notion classique d'ensemble n'est qu'un cas particulier de la notion d'ensemble flou. Sa fonction d'appartenance μ_B est définie de la manière suivante (Bouchon-Meunier *et al.*, 2003a) :

$$\forall\, x \in X \qquad \mu_B(x) \in [0\,;1]$$

L'information apportée par un degré d'appartenance peut être plus qualitative (psychologique et linguistique), cependant celle apportée par une probabilité peut être plus quantitative puisqu'elle réfère à une fréquence. A partir d'une telle fonction, un certain nombre de caractéristiques du sous-ensemble flou peuvent être étudiées (Bouchon-Meunier *et al.*, 2003a) :

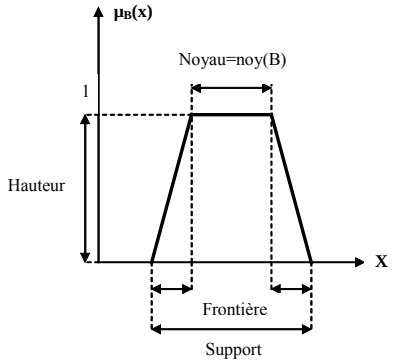


Figure 75 : fonction d'appartenance de l'ensemble flou B

- noyau, noté noy(B) : est l'ensemble des éléments pour lesquels la fonction d'appartenance est égale à 1 ;

$$Noy(B) = \{x \in X \mid \mu_B(x)=1\}$$

- support, noté supp(B) : est l'ensemble des éléments dont l'appartenance au sous-ensemble B n'est pas nulle ;

$$Supp(B) = \{x \in X \mid \mu_B(x)>0\}$$

- hauteur, noté h(B) : est la valeur maximale atteinte sur le support de sous-ensemble B

$$h(B) = \sup_{x \in X} \mu_B(x) \qquad [59]$$

si h(B)=1⇒ le sous-ensemble B est normalisé.

La théorie mathématique sur les sous-ensembles flous définit de nombreuses opérations sur ces sous-ensembles et sur les fonctions d'appartenances qui rendent ces notions utilisables. Je ne présente ici que les opérations de base de cette théorie.

Si A et B sont deux sous-ensembles flous de X et $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ leur fonction d'appartenance, on définit :

- le complémentaire de A, A´, par la fonction d'appartenance :

$$\mu A'(x) = 1 - \mu A(x)$$

- le sous-ensemble A et B, A∩B, par la fonction d'appartenance :

$$\mu (A \cap B) = \min (\mu (A), \mu (B))$$

- le sous-ensemble A ou B, A∪B, par la fonction d'appartenance :

$$\mu (A \cup B) = \max (\mu (A), \mu (B))$$

Ces définitions sont celles les plus communément utilisées mais parfois, pour certains cas, d'autres sont plus appropriées. Par exemple l'intersection peut être définie par le produit des fonctions d'appartenance et l'union par la moyenne arithmétique des fonctions d'appartenance. Ces différentes techniques de calcul engendrent une énorme capacité d'adaptation des raisonnements flous.

Les ensembles flous fournissent un cadre conceptuel et formel pour représenter mathématiquement des labels linguistiques. Ces labels sont largement utilisés dans l'expression de connaissances expertes et manipulées dans le raisonnement approché qui est fait à partir de cette connaissance. Ils apparaissent donc

comme un moyen de réaliser l'interface entre l'information numérique (quantitative) et l'information symbolique (linguistique, qualitative) (Kaufmann, 1973). Les ensembles flous offrent la possibilité de modéliser des informations (connaissances) imprécises dans les systèmes de contrôle et de commande floue, les systèmes à bases de connaissances et les systèmes d'information.

Les opérations d'intersection, d'union et de complémentation usuelles pour les sous-ensembles flous peuvent être remplacées par d'autres opérateurs que le minimum, le maximum, la complémentation à 1. Toutes les opérations arithmétiques peuvent être effectuées pour les sous ensembles flous, et les résultats seront des sous-ensembles flous eux-mêmes (Bouchon-Meunier, 1995 ; Bouchon-Meunier *et al.*, 2003a).

t-norme est une fonction $T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ qui vérifie pour tous x, y et z de [0,1] :

- $T(x, y) = T(y, x)$
- $T(x, T(y, z)) = T(T(x,y),z)$
- $T(x, y) \leq T(z,t)$ si $x \leq z$ et $y \leq t$
- $T(x, 1) = x$

t-conorme est une fonction $T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ qui vérifie pour tous x, y et z de [0,1] :

- $\perp (x, y) = \perp (y, x)$
- $\perp (x, \perp (y, z)) = \perp (\perp (x, y), z)$
- $\perp (x, y) \leq \perp (z, t)$ si $x \leq z$ et $y \leq t$
- $\perp (x, 0) = x$

Tableau 94 : principales t-normes et t-conormes duales (Bouchon-Meunier, 1995 ; Bouchon-Meunier *et al.*, 2003a)

t-norme	t-conorme	Nom
Min (x, y)	Max(x, y)	Zadeh
x.y	x+y-xy	Probabiliste
Max(x+y-1,0)	Min(x+y, 1)	Lukasiewicz

7.5.3 La théorie des possibilités

Le concept de base de cette théorie est le sous ensemble flou. C'est un ensemble d'éléments où chaque paramètre a une valeur associée dans l'intervalle [0, 1]. Le sous-ensemble flou trapézoïdal sera utilisé pour modéliser les paramètres quantitatifs dans cette étude. Il est montré dans la figure 76.

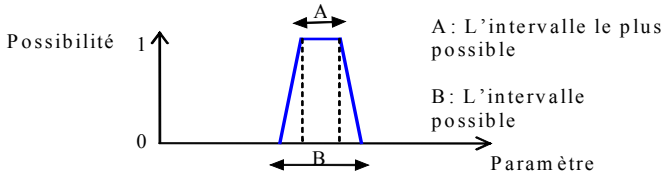


Figure 76 : sous ensemble flou trapézoïdal

Considérons un ensemble de référence E et l'ensemble des sous-ensembles de E, P(E). On attribue à chaque événement défini sur E, un coefficient compris entre 0 et 1 évaluant à quel point cet événement est possible. Une mesure de possibilité Π est une fonction définie sur l'ensemble des parties de E, P(E), prenant les valeurs dans [0,1] telle que :

$$\Pi (\emptyset) = 0 \text{ et } \Pi (E) = 1$$

$$\forall A_i \in P(E) \quad \text{, pour } i = 1,2,\ldots., \Pi (\cup_{i=1,2.} Ai) = \text{Sup}_{i=1,2.} \Pi (Ai)$$

Plus la mesure de la possibilité est proche de 1, plus la réalisation de cet évènement est possible et plus la mesure de la possibilité est proche de 0, plus la réalisation de cet évènement est impossible (Bouchon-

Meunier *et al.,* 1995 ; Dubois & Prade, 1988 ; Zadeh, 1978a). La mesure de la possibilité satisfait la condition de normalisation suivante :

$$\text{Sup}_{x \in E}\, \pi(x) = 1$$

A partir d'une distribution de Π, on construit une mesure de possibilité π en considérant, pour toute partie de X, les coefficients des éléments de X qui la composent. On définit alors :

$$\forall A \in P(E) \quad \Pi(A) = \text{Sup}_{x \in A}\, \pi(x)$$

La mesure de possibilité ne suffit pas pour décrire l'incertitude existante sur la réalisation d'un évènement. Pour cela, on indique le degré avec lequel la réalisation de cet événement est certaine par l'intermédiaire de la mesure de nécessité. Elle permet de lever cette incertitude en apportant un niveau de certitude. Elle est définie comme la mesure de l'impossibilité de l'évènement contraire. C'est la mesure duale de la possibilité (Bouchon-Meunier & Marsala, 2003b ; Dubois & Prade, 1988 ; Zadeh, 1978a). Une mesure de nécessité N est une fonction définie sur l'ensemble des parties de E, P(E), à valeurs dans [0,1] telle que :

$$N(\emptyset) = 0 \text{ et } N(E) = 1$$

$$\forall A_i \in P(E) \text{ , pour } i = 1,2,\ldots, N(\cap_{i=1,2} A_i) = \text{Inf}_{i=1,2} N(A_i)$$

La valeur de la nécessité indique le degré de certitude avec lequel un évènement sera réalisé. Plus ce degré est proche de 1, plus il est certain que cet évènement sera réalisé. Il existe une relation entre la mesure de possibilité et la mesure de nécessité :

$$\forall A_i \in p(E),\ N(A) = 1 - \Pi(A^c)$$

Un évènement A est certain si l'évènement contraire est impossible. Plus la nécessité de A est grande, moins A^c est possible et donc plus on est certain que A sera réalisé. Si la mesure de la possibilité Π est définie à partir d'une distribution de possibilité π, on peut définir la mesure de nécessité duale de Π par :

$$\forall A \in p(E) \text{ , } N(A) = \text{Inf}_{x \notin A}(1 - \pi(x))$$

La donnée d'une distribution de possibilité suffit à déterminer une mesure de nécessité, par dualité avec la mesure de possibilité associée.

7.5.4 Possibilités et ensembles flous

L'ensemble flou A est considéré comme la trace d'une mesure de possibilité π sur les singletons x du univers U. Etant donné une variable linguistique x prenant ses valeurs dans un univers U, et étant donné un attribut A de cette variable qui est l'événement certain sur lequel focalise π. On peut interpréter la distribution π comme la fonction d'appartenance d'un élément x de U à l'ensemble flou A (Dubois & Prade, 1988 ; Zadeh, 1978a).:

$$\pi(x) = \mu_A(x) = \text{possibilité (x est A)}$$

$\pi(x) = \mu_A(x) = 0$ signifie que x ne peut en aucun cas prendre la valeur A (impossible).

$\pi(x) = \mu_A(x) = 1$ signifie qu'il est tout à fait possible que x prenne la valeur A.

7.6 Annexe 6 : inférence floue

L'inférence floue utilise les principes de la logique floue. Dans cette partie, nous allons détailler la structure générale d'une inférence floue et quelques modèles d'inférences floues (Hadj-ali, 1995 ; Mauris *et al.*, 1996 ; Borne *et al.*, 1998 ; Bouchon-Meunier, 1995 ; Bouchon-Meunier & Marsala, 2003b).

A partir de la base de règles fournie par l'expert et des sous-ensembles flous X de x et Y de y dans le domaine $X \times Y$, le mécanisme d'inférence calcule le sous-ensemble flou dans le domaine Z correspondant, relatif à la commande de chaque règle. Ce calcul met en œuvre la combinaison de prémisses, l'implication et l'agrégation des règles (voir figure 77).

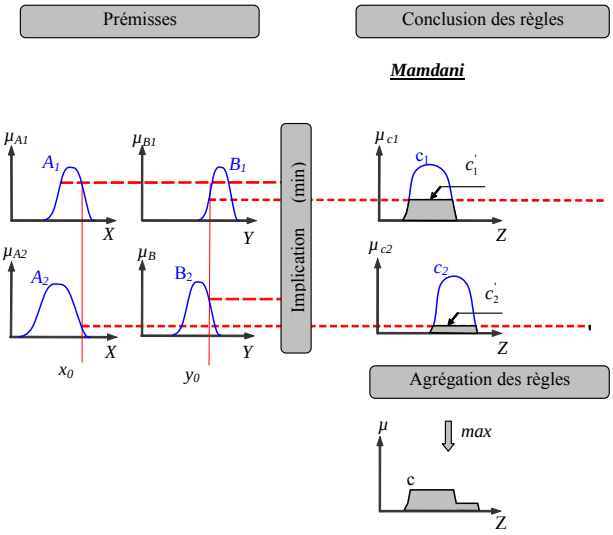


Figure 77 : structure générale d'inférence floue (Malhis, 2002)

7.6.1 Base de règles

Une inférence floue établit une relation non linéaire entre ses entrées et ses sorties. Cette relation est assurée par des règles floues "SI - ALORS". Chacune de ces règles traduit un comportement local. La base des règles floues peut être obtenue à partir d'une représentation de connaissances exprimées de façon naturelle par des acteurs humains. Les règles peuvent prendre la forme générale suivante :

SI (x est A) et (y est B) ALORS (z est C)

Combinaison de prémisse — Conclusion

7.6.2 Combinaisons des prémisses

La figure (77) illustre un exemple des deux règles suivantes :

Règle 1 : SI x est A_1 et y est B_1 ALORS z est C_1

Règle 2 : SI x est A_2 et y est B_2 ALORS z est C_2

Si les deux variables x et y ont les valeurs x_0 et y_0 , leurs fonctions d'appartenance prennent les valeurs $\mu_{A_1}(x_0)$ et $\mu_{B_1}(y_0)$ respectivement pour la règle 1 et $\mu_{A_2}(x_0)$ et $\mu_{B_2}(y_0)$ pour la règle 2. L'application de l'opérateur de combinaison des prémisses Λ_1 entre les deux fonctions d'appartenances $\mu_{A_i}(x_0)$ et $\mu_{B_i}(y_0)$ fournit la fonction d'appartenance $\mu_{A_i B_j}(x_0; y_0)$:

$$\mu_{A_1 B_1}(x_0; y_0) = \mu_{A_1}(x_0) \ \Lambda_1 \ \mu_{B_1}(y_0) \qquad \text{pour la règle 1}$$

$$\mu_{A_2 B_2}(x_0; y_0) = \mu_{A_2}(x_0) \ \Lambda_1 \ \mu_{B_2}(y_0) \qquad \text{pour la règle 2}$$

7.6.3 Implication

Pour qualifier la sortie correspondant à chaque règle, l'opérateur de l'implication $\wedge_2$ est appliqué entre la fonction d'appartenance $\mu_{A_i B_j}(x_0; y_0)$ associée à la prémisse de cette règle et la fonction d'appartenance de sa conclusion $\mu_{C_k}(z)$(poids de la règle – dégrée du vérité), ce qui donne par exemple :

$$\mu_{A_1 B_1 C_1}(z) = \mu_{A_1 B_1}(x_0; y_0) \ \Lambda_2 \ \mu_{C_1}(z) = \left(\mu_{A_1}(x_0) \ \Lambda_1 \ \mu_{B_1}(y_0)\right) \ \Lambda_2 \ \mu_{C_1}(z) \qquad \text{pour la règle 1}$$

$$\mu_{A_2 B_2 C_2}(z) = \mu_{A_2 B_2}(x_0; y_0) \ \Lambda_2 \ \mu_{C_2}(z) = \left(\mu_{A_2}(x_0) \ \Lambda_1 \ \mu_{B_2}(y_0)\right) \ \Lambda_2 \ \mu_{C_2}(z) \qquad \text{pour la règle 2}$$

Cet opérateur $\wedge_2$ est défini de différentes manières suivant l'implication utilisée. L'implication de Mamdani utilise l'opérateur minimum (min.). Celle de Larsen, utilise l'opérateur produit (prod.) (Georgescu, 2002).

7.6.4 Agrégation des règles

La fonction de sortie floue est calculée en fonction des sorties de toutes les règles par l'opérateur d'agrégation $\perp$. L'union des conclusions de deux règles prend la forme suivante :

$$\left\{\mu_C(Z) = \mu_{A1B1C1}(z) \perp \mu_{A2B2C2}(Z)\right\}$$

Les opérateurs Somme ou Max sont utilisables pour $\perp$

7.6.5 Quelques modèles d'inférence floue

Le modèle de Mamdani, repose sur l'utilisation de l'opérateur *min.* pour l'implication et l'opérateur *max.* pour l'agrégation des règles. Le modèle de Larsen, repose sur l'utilisation de l'opérateur prod pour l'implication et l'opérateur max. pour l'agrégation des règles. Une variation du modèle de Larsen consiste à remplacer l'opérateur max de l'agrégation des règles par l'opérateur sum (Georgescu, 2002).

7.7 Annexe 7 : choix de systèmes d'opérateurs pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles

La démarche utilisée pour la sélection d'opérateurs pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles (Λ_1–Λ_2–$\perp$) est présentée au titre (4-5-3-1) dans le chapitre 4. Nous présentons ici la confrontation entre les résultats obtenus avec plusieurs systèmes d'opérateurs et les résultats exprimés par des « experts »[1]. Les systèmes de représentation ont été conservés ou éliminés en fonction de leur proximité avec le raisonnement expert.

7.7.1 Les opérateurs compensatoires

Tableau 95 : exemple d'opérateur compensatoire

W	1	2	3	4
1	1 ; 0 ; 0 ; 0	0.5 ; 0.5 ; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0
2	0.5 ; 0.5 ; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0
3	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0	0 ; 0 ; 0.5 ; 0.5
4	0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0	0 ; 0; 1 ; 0	0 ; 0 ; 0.5 ; 0.5	0 ; 0 ; 0 ; 1

Tableau 96 : choix de systèmes d'opérateurs compensatoires

	Cas 1					Cas 2				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0.25	0.25	0.25	0.25		0	0.7	0.3	0	
I2	0.5	0.5	0	0		0	0	0.3	0.7	
Prod-prod-max	0.33	0.33	0.33	0	Éliminé	0	0.15	0.7	0.15	Conservé
Prod-prod-sum	0.25	0.5	0.25	0	Conservé	0	0.105	0.79	0.105	Conservé
Min-prod-max	0.33	0.33	0.33	0	Éliminé	0	0.15	0.7	0.15	Conservé
Min-prod-sum	0.25	0.5	0.25	0	Conservé	0	0.09375	0.8125	0.0937	Conservé
Min-min-max	0.33	0.33	0.33	0	Éliminé	0	0.231	0.538	0.231	Éliminé
Min-min-sum	0.3	0.4	0.3	0	Éliminé	0	0.19	0.63	0.19	Éliminé
Experts	0.25	0.5	0.25	0		0	0.1	0.8	0.1	

	Cas 3					Cas 4				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0	0	1	0		0	0	0.7	0.3	
I2	0.25	0.25	0.25	0.25		0	0.3	0.7	0	
Prod-prod-max	0	0.4	0.4	0.2	Éliminé	0	0.15	0.7	0.15	Conservé
Prod-prod-sum	0	0.375	0.5	0.125	Conservé	0	0.105	0.79	0.105	Conservé
Min-prod-max	0	0.4	0.4	0.2	Éliminé	0	0.15	0.7	0.15	Conservé
Min-prod-sum	0	0.375	0.5	0.125	Conservé	0	0.09375	0.8175	0.09375	Conservé
Min-min-max	0	0.33	0.33	0.33	Éliminé	0	0.231	0.538	0.231	Éliminé
Min-min-sum	0	0.33	0.5	0.17	Conservé	0	0.19	0.63	0.19	Éliminé
Experts	0	0.375	0.5	0.125		0	0.1	0.8	0.1	

	Cas 5					Cas 6				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0.5	0.5	0	0		0.1	0.2	0.3	0.4	
I2	0	0.3	0.7	0		0.25	0.25	0.25	0.25	
Prod-prod-max	0.125	0.5833	0.29166	0	Éliminé	0.083	0.25	0.33	0.33	Éliminé
Prod-prod-sum	0.075	0.75	0.175	0	Conservé	0.0625	0.3125	0.4375	0.1875	Conservé
Min-prod-max	0.1666	0.555	0.277	0	Éliminé	0.1176	0.2941	0.29411	0.29411	Éliminé
Min-prod-sum	0.09375	0.75	0.15625	0	Conservé	0.0778	0.3437	0.4218	0.1562	Conservé
Min-min-max	0.231	0.385	0.385	0	Éliminé	0.211	0.263	0.263	0.263	Éliminé
Min-min-sum	0.17	0.56	0.28	0	Éliminé	0.13	0.32	0.32	0.24	Éliminé
Experts	0.1	0.75	0.15	0		0.1	0.3	0.4	0.2	

[1] Les « experts » étant les directeurs de thèse

	Cas 7					Cas 8				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0.1	0.2	0.3	0.4		0.1	0.2	0.3	0.4	
I2	0.5	0.25	0.25	0		0.4	0.3	0.2	0.10	
Prod-prod-max	0.14285	0.4285	0.2857	0.14285	Conservé	0.125	0.375	0.375	0.125	Conservé
Prod-prod-sum	0.1125	0.45	0.3875	0.05	Conservé	0.095	0.405	0.405	0.095	Conservé
Min-prod-max	0.129	0.387	0.322	0.161	Conservé	0.125	0.375	0.375	.0125	Conservé
Min-prod-sum	0.096	0.4519	0.403	0.048	Conservé	0.083	0.416	0.416	0.083	Conservé
Min-min-max	0.16	0.32	0.32	0.2	Éliminé	0.0167	0.33	0.33	0.167	Éliminé
Min-min-sum	0.15	0.38	0.38	0.09	Éliminé	0.14	0.36	0.36	0.14	Éliminé
Experts	0.1	0.45	0.4	0.05		0.1	0.4	0.4	0.1	

7.7.2 Les opérateurs de type S, avec possibilité de contradiction entre plusieurs sources

Tableau 97 : exemple d'opérateur de type S (deux sources)

S	1	2	3	4
1	1 ; 0 ; 0 ; 0	0.5 ; 0.5 ; 0 ; 0	0.5 ; 0 ; 0.5 ; 0	0.5 ; 0 ; 0 ; 0.5
2	0.5 ; 0.5 ; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0	0 ; 0.5 ; 0 ; 0.5
3	0.5 ; 0 ; 0.5 ; 0	0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0	0 ; 0 ; 0.5 ; 0.5
4	0.5 ; 0 ; 0 ; 0.5	0 ; 0.5; 0 ; 0.5	0 ; 0 ; 0.5 ; 0.5	0 ; 0 ; 0 ; 1

Conflit

Tableau 98 : choix de systèmes d'opérateurs de type S (situation de conflit) pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles

	Cas 1					Cas 2				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0.5	0.5	0	0		0.9	0.1	0	0	
I2	0	0	0.5	0.5		0	0	0.1	0.9	
Prod-prod-max	0.25	0.25	0.25	0.25	Conservé	0.45	0.05	0.05	0.45	Conservé
Prod-prod-sum	0.25	0.25	0.25	0.25	Conservé	0.45	0.05	0.05	0.45	Conservé
Min-prod-max	0.25	0.25	0.25	0.25	Conservé	0.45	0.05	0.05	0.45	Conservé
Min-prod-sum	0.25	0.25	0.25	0.25	Conservé	0.41	0.083	0.083	0.416	Éliminé
Min-min-max	0.25	0.25	0.25	0.25	Conservé	0.416	0.083	0.083	0.416	Éliminé
Min-min-sum	0.25	0.25	0.25	0.25	Conservé	0.375	0.125	0.125	0.375	Éliminé
Experts	0.25	0.25	0.25	0.25		0.45	0.05	0.05	0.45	

	Cas 3					Cas 4				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0	0	0.1	0.9		0	0	0.4	0.6	
I2	0	1	0	0		0	1	0	0	
Prod-prod-max	0	0.47	0.05	0.47	Éliminé	0	0.375	0.25	0.375	Éliminé
Prod-prod-sum	0	0.5	0.05	0.45	Conservé	0	0.5	0.2	0.3	Conservé
Min-prod-max	0	0.47	0.05	0.47	Éliminé	0	0.375	0.25	0.375	Éliminé
Min-prod-sum	0	0.5	0.05	0.45	Conservé	0	0.5	0.2	0.3	Conservé
Min-min-max	0	0.5	0	0.5	Éliminé	0	0.5	0	0.5	Éliminé
Min-min-sum	0	0.5	0.083	0.41	Éliminé	0	0.5	0.22	0.27	Éliminé
Experts	0	0.5	0.05	0.45		0	0.5	0.2	0.3	

Confirmation

Tableau 99 : choix de systèmes d'opérateurs de type S (situation de confirmation) pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles

	Cas 1					Cas 2				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0	0	0.7	0.3		0	0.7	0.3	0	
I2	0	0.3	0.7	0		0	0.7	0.3	0	
Prod-prod-max	0	0.15	0.7	0.15	Éliminé	0	0.823	0.176	0	Éliminé
Prod-prod-sum	0	0.15	0.7	0.15	Conservé	0	0.7	0.3	0	Conservé
Min-prod-max	0	0.15	0.7	0.15	Éliminé	0	0.7	0.3	0	Conservé
Min-prod-sum	0	0.1875	0.625	0.1875	Éliminé	0	0.625	0.375	0	Éliminé
Min-min-max	0	0.23	0.538	0.23	Éliminé	0	0.53	0.23	0.23	Éliminé
Min-min-sum	0	0.2727	0.4545	0.2727	Éliminé	0	0.52	0.47	0	Éliminé
Expert 1	0	0.05	0.9	0.05		0	0.7	0.3	0	
Expert 2, 3	0	0.15	0.7	0.15		0	0.7	0.3	0	

7.7.3 Les opérateurs exprimant une synergie

Tableau 100 : exemple d'opérateur exprimant une synergie

X	1	2	3	4
1	1 ; 0 ; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0
2	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 0.5 ; 0.5 ; 0	0 ; 0.25 ; 0.75 ; 0	0 ; 0 ; 0.75 ; 0.25
3	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 0.25 ; 0.75 ; 0	0 ; 0 ; 0.5 ; 0.5	0 ; 0 ; 0.25 ; 0.75
4	0 ; 0 ; 1 ; 0	0 ; 0; 0.75 ; 0.25	0 ; 0 ; 0.25 ; 0.75	0 ; 0 ; 0 ; 1

Tableau 101 : choix de systèmes d'opérateurs exprimant une synergie pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles

	Cas 1					Cas 2				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0,1	0,9	0	0		0,1	0,2	0,3	0,4	
I2	0	0	0,9	0,1		0,1	0,9	0	0	
Prod-prod-max	0	0.243	0.729	0.027	Éliminé	0.027	0.195	0.586	0.195	Éliminé
Prod-prod-sum	0	0.292	0.685	0.0225	Conservé	0.01	0.29	0.6	0.09	Conservé
Min-prod-max	0	0.243	0.729	0.027	Éliminé	0.166	0.166	0.5	0.166	Éliminé
Min-prod-sum	0	0.27	0.708	0.02	Conservé	0.071	0.339	0.517	0.07	Éliminé
Min-min-max	0	0.227	0.68	0.09	Éliminé	0.1	0.25	0.4	0.25	Éliminé
Min-min-sum	0	0.25	0.678	0.0714	Éliminé	0.047	0.357	0.476	0.119	Éliminé
Experts	0	0.3	0.7	0		0	0.3	0.6	0.1	

	Cas 3					Cas 4				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0,5	0,5	0	0		0,1	0,2	0,3	0,4	
I2	0	0,3	0,7	0		0,4	0,3	0,2	0,1	
Prod-prod-max	0	0.571	0.428	0	Éliminé	0.105	0.315	0.421	0.157	Éliminé
Prod-prod-sum	0	0.66	0.337	0	Conservé	0.04	0.3125	0.46	0.1875	Conservé
Min-prod-max	0	0.571	0.428	0	Éliminé	0.105	0.315	0.421	0.157	Éliminé
Min-prod-sum	0	0.67	0.328	0	Conservé	0.033	0.308	0.483	0.175	Conservé
Min-min-max	0	0.5	0.5	0	Éliminé	0.09	0.285	0.381	0.175	Éliminé
Min-min-sum	0	0.55	0.44	0	Éliminé	0.0328	0.327	0.327	0.311	Éliminé
Experts	0	0.7	0.3	0		0	0.3	0.5	0.2	

7.7.4 Les opérateurs min et Max

Tableau 102 : exemple d'opérateur min

m	1	2	3	4
1	1 ; 0 ; 0 ; 0	1 ; 0 ; 0 ; 0	1 ; 0 ; 0 ; 0	1 ; 0 ; 0 ; 0
2	1 ; 0 ; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0
3	1 ; 0; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0
4	1 ; 0 ; 0 ; 0	0 ; 1; 0 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0	0 ; 0 ; 0 ; 1

Tableau 103 : exemple d'opérateur max

M	1	2	3	4
1	1 ; 0 ; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0	0 ; 0 ; 0 ; 1
2	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 1 ; 0 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0	0 ; 0 ; 0 ; 1
3	0 ; 0; 1 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0	0 ; 0 ; 1 ; 0	0 ; 0 ; 0 ; 1
4	0 ; 0 ; 0 ; 1	0 ; 0; 0 ; 1	0 ; 0 ; 0 ; 1	0 ; 0 ; 0 ; 1

Tableau 104 : choix de systèmes d'opérateurs min et max pour la combinaison des prémisses, l'implication et l'agrégation des règles

	Cas 1 (M)					Cas 1 (m)				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0,5	0,5	0	0		0,5	0,5	0	0	
I2	0	0,3	0,7	0		0	0,3	0,7	0	
Min-prod-max	0	0,375	0,625	0	Éliminé	0,5	0,5	0	0	Conservé
Min-prod-sum	0	0,375	0,625	0	Éliminé	0,5	0,5	0	0	Conservé
Prod-prod-max	0	0,3	0,7	0	Conservé	0,5	0,5	0	0	Conservé
Prod-prod-sum	0	0,3	0,7	0	Conservé	0,5	0,5	0	0	Conservé
Min-min-max	0	0,38	0,63	0	Éliminé	0,5	0,5	0	0	Conservé
Min-min-sum	0	0,38	0,63	0	Éliminé	0,5	0,5	0	0	Conservé
Experts	0	0.3	0.7	0		0.5	0.5	0	0	

	Cas 2 (M)					Cas 2 (m)				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0	0,3	0,7	0		0	0,3	0,7	0	
I2	0	0	0,7	0,3		0	0	0,7	0,3	
Min-prod-max	0	0	0,7	0,3	Conservé	0	0,3	0,7	0	Conservé
Min-prod-sum	0	0	0,625	0,375	Éliminé	0	0,375	0,625	0	Éliminé
Prod-prod-max	0	0	0,7	0,3	Conservé	0	0,3	0,7	0	Conservé
Prod-prod-sum	0	0	0,7	0,3	Conservé	0	0,3	0,7	0	Conservé
Min-min-max	0	0	0,7	0,3	Conservé	0	0,3	0,7	0	Conservé
Min-min-sum	0	0	0,63	0,38	Éliminé	0	0,38	0,63	0	Éliminé
Experts	0	0	0.7	0.3		0	0.3	0.7	0	

	Cas 3 (M)					Cas 3 (m)				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0	0	0,4	0,6		0	0	0,4	0,6	
I2	0	1	0	0		0	1	0	0	
Min-prod-max	0	0	0,4	0,6	Conservé	0	1	0	0	Conservé
Min-prod-sum	0	0	0,4	0,6	Conservé	0	1	0	0	Conservé
Prod-prod-max	0	0	0,4	0,6	Conservé	0	1	0	0	Conservé
Prod-prod-sum	0	0	0,4	0,6	Conservé	0	1	0	0	Conservé
Min-min-max	0	0	0,4	0,6	Conservé	0	1	0	0	Conservé
Min-min-sum	0	0	0,4	0,6	Conservé	0	1	0	0	Conservé
Experts	0	0	0.4	0.6		0	1	0	0	

	Cas 4 (M)					Cas 4 (m)				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0	0,7	0,3	0		0	0,7	0,3	0	
I2	0	0	0,3	0,7		0	0	0,3	0,7	
Min-prod-max	0	0	0,3	0,7	Conservé	0	0,7	0,3	0	Conservé
Min-prod-sum	0	0	0,375	0,625	Éliminé	0	0,625	0,375	0	Éliminé
Prod-prod-max	0	0	0,3	0,7	Conservé	0	0,7	0,3	0	Conservé
Prod-prod-sum	0	0	0,3	0,7	Conservé	0	0,7	0,3	0	Conservé
Min-min-max	0	0	0,3	0,7	Conservé	0	0,7	0,3	0	Conservé
Min-min-sum	0	0	0,38	0,62	Éliminé	0	0,62	0,38	0	Éliminé
Experts	0	0	0.3	0.7		0	0.7	0.3	0	

	Cas 5 (M)					Cas 5 (m)				
	1	2	3	4		1	2	3	4	
I1	0,25	0,25	0,25	0,25		0,25	0,25	0,25	0,25	
I2	0,5	0,5	0	0		0,5	0,5	0	0	
Min-prod-max	0,25	0,25	0,25	0,25	Éliminé	0,5	0,5	0	0	Éliminé
Min-prod-sum	0,125	0,375	0,25	0,25	Conservé	0,625	0,375	0	0	Conservé
Prod-prod-max	0,25	0,25	0,25	0,25	Éliminé	0,5	0,5	0	0	Éliminé
Prod-prod-sum	0,125	0,375	0,25	0,25	Conservé	0,625	0,375	0	0	Conservé
Min-min-max	0,25	0,25	0,25	0,25	Éliminé	0,5	0,5	0	0	Éliminé
Min-min-sum	0,13	0,43	0,29	0,29	Éliminé	0,57	0,43	0	0	Éliminé
Experts	0.125	0.375	0.25	0.25		0.625	0.375	0	0	

7.8 Annexe 8 : contrôler l'hésitation (masse de flou) entre 2 modalités de la table d'agrégation

L'opérateur INF6 = INF2 ⊗ INF4 est traduit par un tableau 4x3 comportant une ligne de G1 et une colonne de G1 (la zone d'avis certain) :

- pour un tronçon au dessus de la nappe, quelque soit le niveau des défauts d'étanchéité, on considère qu'il n'y a pas de dysfonctionnement infiltration (avis certain G1) ;
- de même, en l'absence de défaut d'étanchéité il n'y a pas non plus de dysfonctionnement infiltration (avis certain G1) ;

Le tableau peut être divisée alors en une zone d'avis certain et une zone d'hésitation. La zone d'hésitation représente la zone des règles floues qu'il faut construire. Parmi les 12 règles en précis, nous avons 8 règles considérées comme certaines (et donc précises) et 4 règles présentant de l'hésitation et qu'il faut donc convertir en règles floues (cellules grisées dans le tableau 105) :

La masse de flou entre deux modalités (comme le présente le tableau 105) est calculée en exploitant au maximum les intentions des « experts » associées aux tableaux RERAU et en utilisant deux indices numériques proposés dans le chapitre 3 :

- l'indice (A) qui reflète la nature de la zone d'hésitation : la zone d'hésitation de l'opérateur INF6 = INF2 ⊗ INF4 se rapprochant de l'opérateur max ;
- et l'indice (IR) qui reflète la pondération d'un indicateur par rapport à l'autre au sein d'une zone d'hésitation (voir chapitre 3). La pondération (préférence) de INF4 (3/5) par rapport à INF2 (2/5), pouvant être fixée en fonction des valeurs respectives des informations INF4 et INF2 fournies par les sources (voir chapitre 3).

Tableau 105 : valeurs des nuances entre deux modalités d'évaluation INF6 (règles RERAU à gauche et règles floues à droite)

	Règles RERAU				Règles floues (INDIGAU)			
INF4 / INF2	G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
G1	G1	G1	G1	G1	1, 0, 0,0	1, 0, 0,0	1, 0, 0,0	1, 0, 0,0
G2	G1	G2	G3	G4	1, 0, 0,0	0, 1, 0,0	0, a, b, 0	0, 0, a, b
G3	G1	G3	G4	G4	1, 0, 0,0	0, c, d, 0	0, 0, c, d	0, 0, 0,1

Par exemple : pour introduire des nuances (masse de flou) entre 2 modalités **G2 et G3** de la sortie INF6 (0, **a, b** ,0) à partir du croisement (G2/INF2) et (G3/INF4), nous proposons la démarche suivante :

Tableau 106 : explications sur le calcul des nuances entre deux modalités

calculer	utiliser	explications
a = G2/INF6	(A_{max}-A)	G2/INF6↗ quand A↘ et donc quand (A_{max}-A)↗ (A_{max}-A) augmente quand la nature d'opérateur A s'approche de min
	IR (INF2)	G2/INF6↗ quand IR (INF2)↗ car INF2 est l'indicateur qui justifie une conclusion G2
b = G3/INF6	(A-A_{min})	G3/INF6↗ quand A↗ et donc quand (A-A_{min})↗ (A-A_{min}) augmente quand la nature d'opérateur A s'approche de max
	IR (INF4)	G3/INF6↗ quand IR (INF4)↗ car INF4 est l'indicateur qui justifie une conclusion G3
a = G2/INF6	(A_{max}-A) * IR (INF2)	Les termes (A_{max}-A), IR (INF2), (A-A_{min}), IR (INF4) aident à calculer les masses de flou entre les deux modalités G2, G3 de INF6 de manière à : ➢ refléter le comportement compensatoire entre les deux gravités G2, G3 des deux indicateurs INF2 et INF4 ➢ refléter les intentions (les raisonnements) d'experts lors de croissement de (INF2, INF4)
b = G3/INF6	(A-A_{min}) * IR (INF4)	

Les termes (a, b, c, d) sont calculées alors à partir des équations suivantes :

$$c = (A_{max} - A) * IR(INF4) / [(A_{max} - A) * IR(INF4) + (A - A_{min}) * IR(INF2)]$$

$$d = (A - A_{min}) * IR(INF2) / [(A_{max} - A) * IR(INF4) + (A - A_{min}) * IR(INF2)]$$

$$a = (A_{max} - A) * IR(INF2) / [(A_{max} - A) * IR(INF2) + (A - A_{min}) * IR(INF4)]$$

$$b = (A - A_{min}) * IR(INF4) / [(A_{max} - A) * IR(INF2) + (A - A_{min}) * IR(INF4)]$$

Quand « opérateur = max » alors « c = a = 0 et d = b = 1 » ;

Quand « opérateur = min » alors « c = a = 1 et d = b = 0 » ;

Quand « IR (INF4) = 1 » alors « IR (INF2) = 0 » et donc « c = b = 1 et d = a = 0 » ;

Quand « IR (INF0) = 1 » alors « IR (INF2) = 1 » et donc « c = b = 0 et d = a = 1 ».

Avec :

A : indice mesurant la nature de la zone d'hésitation étudiée (Caractère limitant de la zone d'hésitation étudiée) pour l'opérateur I1 × I2 (voir chapitre 3) ;

A_{max} : valeur de l'indice A pour le cas de l'opérateur max ;

A_{min} : valeur de l'indice A pour le cas de l'opérateur min ;

IR : indice mesurant l'influence relative d'un indicateur sur l'autre au sein d'une zone d'hésitation (voir chapitre 3).

Prenons l'exemple de l'opérateur INF6 = INF2 ⊗ INF4, les indices (A, A_{max}, A_{min}, IR) prennent les valeurs suivantes :

$$A = 20 \qquad IR(INF4) = 3/5 = 0.6$$

$$A_{max} = 21 \qquad IR(INF2) = 2/5 = 0.4$$

$$A_{min} = 15$$

Les termes (a, b, c, d) prennent les valeurs suivantes :

$$c = (21-20)*0.6/[(21-20)*0.6+(20-15)*0.4] = 0.23$$

$$d = (20-15)*0.4/[(21-20)*0.6+(20-15)*0.4] = 0.77$$

$$a = (21-20)*0.4/[(21-20)*0.4+(20-15)*0.6] = 0.12$$

$$b = (20-15)*0.6/[(21-20)*0.4+(20-15)*0.6] = 0.88$$

Le tableau suivant présente les résultats de la construction de règles à conclusions floues à partir des règles RERAU :

Tableau 107 : valeurs calculées des nuances entre quatre modalités d'évaluation INF6 (règles RERAU à gauche et règles floues à droite)

	Règles RERAU				Règles floues (INDIGAU)			
INF4 / INF2	G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
G1	G1	G1	G1	G1	1, 0, 0,0	1, 0, 0,0	1, 0, 0,0	1, 0, 0,0
G2	G1	G2	G3	G4	1, 0, 0,0	0, 1, 0,0	0,0.12, 0.88, 0	0, 0,0.12, 0.88
G3	G1	G3	G4	G4	1, 0, 0,0	0,0.23, 0.77, 0	0, 0, 0.23, 0.77	0, 0, 0,1

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : IBRAHIM DATE de SOUTENANCE : 15 décembre 2008

Prénoms : Mazen

TITRE :

Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs de performance précis ou flous

NATURE : Doctorat Numéro d'ordre : 2008-ISAL-0116

Formation doctorale : Génie Civil

Cote B.I.U. - Lyon : T 50/210/19 /et bis CLASSE :

RESUME : Les réseaux d'assainissement se dégradent plus ou moins rapidement dans le temps. La gestion patrimoniale doit donc établir des programmes afin d'évaluer et de réduire cette dégradation. En France, le projet national RERAU (Réhabilitation des réseaux d'assainissement urbains) a proposé une méthodologie pour évaluer l'état des réseaux et ses évolutions probables et hiérarchiser des tronçons prioritaires vis-à-vis d'investigations et de réhabilitations. Cependant cette méthodologie nécessite encore des calages, des améliorations et des expérimentations pour permettre son application par les gestionnaires. La thèse constitue un prolongement des recherches menées dans le cadre du PN RERAU et s'inscrit dans le programme INDIGAU (Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains – ANR – PRGCU 2006).

Le premier volet de la recherche porte sur une analyse critique des indicateurs et des critères RERAU. Ce volet comprend deux tâches :

- tâche 1 : construction d'indicateurs de dysfonctionnement précis évalués à partir de résultats d'inspections visuelles. L'ensemble des observations obtenues sur un tronçon est résumé par une note qui est ensuite comparée à trois valeurs seuils. Cette tâche traite du calage des paramètres de calcul de la note de synthèse et du calage des trois seuils délimitant les quatre niveaux de gravité. Nous proposons un critère de calage qui permet de prendre en compte les impacts de plusieurs types d'erreurs possibles.

- tâche 2 : analyse critique de la formulation des critères de réhabilitation de RERAU. Les formulations des critères sont modélisées numériquement afin de les tester. Des indices sont proposés et calculés pour permettre de vérifier si la formulation d'un critère est en accord avec les intentions des experts.

Le second volet de la recherche présente une approche basée sur la théorie des sous ensembles flous pour les indicateurs et les critères RERAU. Nous proposons une approche floue à la fois plus robuste pour évaluer les critères et plus fine pour représenter la hiérarchie des priorités. Ce volet comprend les deux tâches suivantes :

- tâche 3 : modèle de fusion des indicateurs. Le « modèle RERAU » ne traite pas explicitement de la qualité des données utilisées et des connaissances (règles d'agrégation). Nous proposons un modèle de fusion basé sur l'inférence floue ainsi que des règles floues dérivées des règles RERAU.

- tâche 4 : indicateurs flous évalués à partir de résultats d'inspections visuelles, permettant d'exprimer l'imprécision de la transition entre deux niveaux d'état de santé. Un critère de calage d'un seuil flou est proposé.

Les méthodes de calage proposées sont expérimentées avec des données issues du projet INDIGAU. Les résultats obtenus démontrent la valeur opérationnelle de nos propositions.

Mots clés : gestion patrimoniale, réseaux d'assainissement, réhabilitation, évaluation, fusion, critère, indicateur, flou.

Laboratoire de recherches : LGCIE

Directeurs de thèse : M. Pascal LE GAUFFRE (Maître de conférences - HDR)

M. Frédéric CHERQUI (Maître de conférences)

Président du jury : M. MIRAMOND

Composition du jury : D. BOISSIER, Y. DIAB, A. MAILHOT, M. MIRAMOND, C. WEREY, F. CHERQUI, P. LE GAUFFRE