

Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaisssances. Application aux barrages en remblai

Corinne Curt

▶ **To cite this version:**

Corinne Curt. Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaisssances. Application aux barrages en remblai. Génie des procédés. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2008. Français. NNT : 2008CLF21819 . tel-00728284

HAL Id: tel-00728284

https://theses.hal.science/tel-00728284

Submitted on 5 Sep 2012

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

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

N° d'odre : DU 1819
EDSPIC : 397

UNIVERSITE BLAISE PASCAL - CLERMONT II

ECOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

Thèse
présentée par

Corinne CURT
Ingénieur ENSAIA Nancy
Docteur en Génie des Procédés

pour obtenir le grade de :

Docteur d'Université
Spécialité : Génie Civil

Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances

Application aux barrages en remblai

Soutenue publiquement le 21 janvier 2008 devant le jury composé de :

M. Claude BACCONNET	Examinateur
M. Daniel BOISSIER	Directeur de thèse
M. Denys BREYSSE	Rapporteur
M. Roger FRANK	Président du jury
M. Richard GERVAIS	Invité
Mme Farimah MASROURI	Rapporteur
M. Laurent PEYRAS	Examinateur

Thèse préparée au Cemagref – Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie
et au Laboratoire Génie Civil

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein de l'Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie du Cemagref d'Aix-en-Provence en collaboration avec le Laboratoire Génie Civil de l'Université Blaise Pascal – Clermont II.

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse, M. Daniel Boissier pour l'encadrement de cette thèse : dès le premier jour et avant même de commencer ce travail, toujours disponible pour répondre à mes interrogations, il m'a offert un cadre de réflexion très riche et un environnement de travail dynamique et chaleureux qui ont participé pour beaucoup à la réalisation de cette thèse.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers plusieurs personnes du Cemagref d'Aix-en-Provence pour leur implication dans ce travail. Je remercie M. Laurent Peyras pour m'avoir fait découvrir la pathologie des barrages ce qui a contribué à l'efficacité des séances de recueil. Je tiens à exprimer ma reconnaissance au groupe d'experts de l'équipe Secure : que MM. Gérard Degoutte, Patrice Mériaux, Laurent Peyras, Paul Royet et Rémy Tourment soient remerciés pour leur disponibilité ainsi que pour la convivialité et la richesse des débats qui ont participé à la réalisation de ce travail. Un grand merci à Mme Huguette Félix pour son implication dans la réalisation des dossiers tests pour la validation des modèles et pour son accueil toujours chaleureux.

Je remercie M. Alexandre Antoine et Mlle Laure Argelliès, stagiaires pendant l'année 2006 et l'année 2007 et maintenant ingénieurs : certains de leurs résultats sur la base de connaissances et sur le recueil des connaissances concernant les scénarios en fondation ont été intégrés dans ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues d'Hydro-Québec, MM. Denis Caron et Richard Gervais, pour la qualité et l'intérêt de nos rencontres et échanges ainsi que pour leur accueil toujours très convivial. Merci également à M. Guy Jenkins pour la qualité de son accueil à Baie-Comeau.

Je remercie MM. Vincent De Laleu (EDF) et Khaldoun Zreik (Université de Caen) pour leurs apports lors du comité de thèse.

J'adresse mes remerciements à Mme Farimah Masrouri (Ecole Nationale Supérieure de Géologie) et à M. Denys Breysse (Université de Bordeaux) pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse ainsi qu'à MM. Claude Bacconnet (Université Blaise Pascal) et Roger Frank (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées) pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie toutes les personnes, notamment d'Auvergne ou de Provence, qui se sont intéressées à mon travail.

Enfin je tiens à remercier Thomas qui, maintes fois au cours de ces trois ans, m'a redonné élan et confiance qui m'ont permis de mener à bien cette deuxième thèse.

Avant-propos

On peut s'interroger sur la raison de faire une deuxième thèse. Dans mon cas, la raison en est un changement d'activité. Mon cas est sûrement rare mais pas unique : Joseph Hossenlopp, chef de mon ancienne équipe au Cemagref, co-directeur de ma thèse en génie des procédés[1] (« la première ») et ami depuis plus de dix ans, a lui aussi à son actif deux thèses dans des domaines très différents. Son expérience m'a-t-elle influencée ? Peut-être. En tout cas, j'ai sûrement abordé cette deuxième thèse avec plus de sérénité en sachant que quelqu'un qui a toute mon estime en avait fait l'expérience avant moi ! Maintenant, remontons aux origines.

Le 6 octobre 2003, mes collègues et moi avons appris, à notre grande stupeur et notre grand désarroi, que notre équipe Automatique et Qualité Alimentaire du Cemagref de Clermont-Ferrand allait disparaître du prochain plan stratégique de l'Etablissement. Ingénieur de recherche dans cette équipe, j'y poursuivais depuis plusieurs années, dans une ambiance dynamique et chaleureuse, des travaux dans le domaine de ma formation de base, le génie des procédés. En effet, je suis ingénieur de l'ENSAIA (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires) de Nancy et docteur en génie des procédés de l'ENSIA (Ecole Nationale Supérieure des Industries Alimentaires) de Massy.

Quelques semaines plus tard, j'ai demandé une mobilité au sein de l'unité de recherche Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie (UR OHAX) du Cemagref d'Aix-en-Provence. Les raisons de ma demande de mobilité pour l'UR OHAX, et plus spécifiquement le Thème de Recherche Secure, étaient motivées par le souhait de conserver l'investissement scientifique valorisé par quatorze publications dans des revues scientifiques à comité de lecture (cotées ISI), trois chapitres de livre, une trentaine de communications dans des congrès nationaux et internationaux… Il s'agissait pour moi de poursuivre ma thématique de recherche sur la formalisation et l'agrégation des connaissances pour le contrôle des processus. Le champ applicatif et les orientations du TR Secure me sont apparus comme particulièrement propices pour valoriser les compétences acquises sur ma thématique. Ceci a été confirmé par l'accueil favorable du Département Ressources en Eau et de l'UR OHAX à ma mobilité au sein du TR Secure et par l'accord donné par l'Etablissement à cette mobilité.

Depuis le 1er septembre 2004, je fais partie de l'UR OHAX. J'ai en conséquence, à cette date-là, abandonné mon domaine d'activité initial et abordé les barrages comme nouvel objet d'études. Il est prévu que mon activité présente, à terme, en plus du volet recherche développée dès le 1er septembre 2004 dans la communauté scientifique du génie civil, un volet expertise sur les ouvrages hydrauliques. Au cours de ces missions d'expertise, je serai amenée à côtoyer des exploitants de barrage, personnels des services de contrôle et de bureaux d'étude. Ainsi, je devais m'impliquer dans une formation diplômante pour être crédible dans ces nouvelles communautés au sein desquelles je vais évoluer. La thèse s'est imposée à moi comme la formation diplômante la plus pertinente à titre personnel et pour l'équipe. Au-delà de cet aspect de formation diplômante, la problématique particulière de cette thèse m'a permis de me former directement à l'évaluation de la performance des barrages tout en poursuivant et en enrichissant ma recherche sur la prise en compte des connaissances dans l'évaluation et le contrôle des processus. Elle m'a également offert l'opportunité de faire évaluer mes travaux par des spécialistes du génie civil.

Pour finir, je souhaite témoigner qu'en contrepartie cette thèse a nécessité un investissement personnel tout aussi fort que la première même si je disposais, du fait de mon activité antérieure, d'une partie des compétences nécessaires. En outre, elle m'a amenée à me retrouver dans la position ambiguë et inconfortable d'ingénieur-chercheur confirmé et de doctorant, position souvent difficile à expliquer et quelquefois difficile à vivre…

[1] CURT C., 2002. Méthode d'analyse, d'évaluation et de contrôle des propriétés sensorielles en conduite de procédé alimentaire. Thèse en génie des procédés. ENSIA Massy, 192 pages.

Résumé

Le développement de méthodes et d'outils d'aide à l'évaluation de la performance et de la sécurité des ouvrages de génie civil représente un enjeu industriel important et une thématique de recherche forte. Un des verrous importants de cette thématique vient de ce que plusieurs types de connaissances et de données sont employés pour caractériser performance et sécurité et que seul, aucun n'est suffisant pour définir la performance ou la sécurité d'un ouvrage de la complexité d'un barrage. Dans ce mémoire, des approches contribuant à l'évaluation de la performance d'un barrage sont proposées. Elles ont été développées en forte connexion avec un groupe d'experts support des connaissances. Ces développements portent sur :

- une méthode d'évaluation déterministe de la performance des barrages par recueil, formalisation et agrégation de différentes sources de connaissances ;
- une base de connaissances sur les phénomènes de dégradation des barrages permettant la capitalisation des connaissances du domaine ;
- une méthode d'analyse des imperfections ;
- une méthode non déterministe d'évaluation de la performance qui procède par représentation des imperfections et leur propagation dans le modèle.

Ces différentes méthodes ont conduit à trois outils informatiques : une interface d'aide à l'évaluation de la performance, un système de traçabilité des données et une base de connaissances sur les phénomènes de dégradation.

Ces approches sont illustrées sur les barrages en remblai et plus spécifiquement le mécanisme d'érosion interne.

Mots clés :
Barrage – Phénomènes de dégradation – Performance – Formalisation de connaissances – Théorie des possibilités

Abstract

The development of tools and methods able to manage the performance and safety of civil structures represents a main industrial issue and an interesting way of research. One of the difficulties relies on the necessity to combine various kinds of knowledge and data to assess the performance and safety. In this Ph.D. thesis, approaches contributing to assess dam performance are proposed. They are based on knowledge collected among an expert panel. The developments concern:

- a deterministic method for the assessment of dam performance based on the collection, formalisation and aggregation of various kinds of knowledge;
- a knowledge base related to phenomena that lead to damages in embankment dams. This base allows domain knowledge capitalization;
- a method to analyse the origins of data imperfections;
- a non-deterministic method for the assessment of performance that proceeds by representation and propagation of data imperfections.

These methods lead to three user tools: a performance assessment interface, a data traceability system and a knowledge base concerning degradation phenomena.

These approaches are illustrated on embankment dams and more specifically on the internal erosion mechanism.

Keywords:
Dam — Degradation phenomenon – Performance – Knowledge formalisation – Theory of possibility

Table des matières

Introduction *1*

Partie 1 Problématique posée par l'évaluation de la performance des barrages en service .. *1*

Chapitre 1 – Approches développées pour l'évaluation de la performance des barrages en service **3**

1. Difficultés posées par l'évaluation de la performance des barrages *3*

2. Approches pour l'évaluation de la performance *5*

Chapitre 2 - Démarche d'évaluation de la performance basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances **7**

1. Travaux basés sur une modélisation de l'approche experte pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques *7*

2. Proposition de recherche *8*

3. Description des connaissances à formaliser et à agréger *8*

3.1 Variables d'entrée et de sortie du modèle **8**

3.2 Connaissances explicites et connaissances tacites **9**

4. Retombées de la démarche de formalisation et agrégation des connaissances *11*

Chapitre 3 - Formaliser et agréger les connaissances **13**

1. Savoir-mesurer et savoir-analyser *13*

1.1 Analyse de la littérature **13**

1.2 Caractéristiques des différentes données **13**

1.3 Difficultés posées par la formalisation des différentes données **14**

1.4 Questions scientifiques **15**

2. Savoir-agréger *15*

2.1 Analyse de la littérature **15**

2.2 Questions scientifiques **16**

Chapitre 4 – Formaliser les connaissances du domaine **17**

1. Intérêts d'une base de connaissances *17*

2. Domaine de la base de connaissances *18*

3. Propriétés requises par la base de connaissances *18*

4. Questions scientifiques *19*

Chapitre 5 - Prendre en compte et analyser les imperfections 20

1. Différents types d'imperfections et cahier des charges de leur prise en compte..... 20

2. Méthodes de prise en compte des imperfections..... 22

2.1 Logique floue et théorie des possibilités 22

2.2 Théorie de l'évidence 24

3. Analyse des imperfections des données d'entrée..... 28

4. Questions scientifiques..... 29

Chapitre 6 – Conclusion : définition de la problématique de la thèse 30

Partie 2 Méthodologies d'évaluation de la performance des barrages et de capitalisation des connaissances du domaine..... 33

Chapitre 1 - Evaluation déterministe de la performance des barrages 32

1. Problème posé et domaine d'application..... 32

1.1 Problème posé 32

1.2 Domaine d'application 33

2. Construction du modèle d'évaluation déterministe de la performance..... 35

2.1 Recueil des connaissances 35

2.2 Formalisation des indicateurs 38

2.3 Agrégation des indicateurs 46

3. Validation interne..... 49

3.1 Objectifs 49

3.2 Méthode 50

4. Synthèse sur la méthode d'évaluation déterministe de la performance..... 52

Chapitre 2 – Formalisation des connaissances du domaine 53

1. Démarche de construction de la base de connaissances..... 53

2. Présentation de la base de connaissances sur les phénomènes de dégradation des barrages 54

2.1 Structuration 54

2.2 Instanciation et validation 55

Chapitre 3 – Analyse et prise en compte des imperfections dans l'évaluation de la performance 60

1. Analyse des imperfections..... 60

1.1 Types de données 60

1.2 Démarche 61

2. Prise en compte des imperfections..... 64

2.1 Présentation de la méthodologie 64

2.2 Représentation des données entachées d'imperfections 64

2.3 Propagation des distributions de possibilité dans le modèle 74

2.4 Etablissement du résultat 76

3. Synthèse sur l'analyse et la prise en compte des imperfections 76

Partie 3 Applications et outils opérationnels..... 78

Chapitre 1 – Evaluation déterministe de la performance des barrages en remblai vis-à-vis de l'érosion interne 77

1. Description du mécanisme d'érosion interne..... 78

2. Indicateurs et modèle d'agrégation pour l'érosion interne dans le remblai..... 82

2.1 Caractéristiques du groupe d'experts 82

2.2 Identification des fonctions impliquées dans le mécanisme d'érosion interne 83

2.3 Recueil et formalisation des indicateurs 85

2.4 Agrégation des indicateurs 89

2.5 Validation interne 94

3. Suivi de la performance d'un barrage au cours du temps..... 100

3.1 Description du barrage 100

3.2 Chronologie des défaillances 100

3.3 Représentation des désordres et analyse 103

4. Comparaison de la méthode développée par le Cemagref avec la méthode développée par Hydro-Québec 106

4.1 Comparaison des types de connaissances utilisés 106

4.2 Agrégation des données 107

4.3 Bilan 111

4.4 Comparaison des résultats obtenus avec les deux méthodes 111

Chapitre 2 – Analyse et prise en compte des imperfections 117

1. Analyse des imperfections..... 117

1.1 Analyse du système 117

1.2 Analyse des défaillances du système 118

1.3 Notation des caractéristiques de qualité 124

1.4 Agrégation des caractéristiques de qualité 127

1.5 Bilan 128

2. Prise en compte des imperfections..... 129

2.1 Données recueillies 129

2.2 Traitement des données 130

2.3 Propagation des imperfections et obtention du résultat 135

2.4 Fusion de données 138

3. Etude de sensibilité..... 143

3.1 Types d'analyses de sensibilité 143

3.2 Approche développée 144

3.3 Applications 144

Partie 4 Discussion ***151***

Chapitre 1 - Apports et perspectives méthodologiques **150**

1. Evaluation de la performance du barrage ***150***

1.1 Apports méthodologiques **150**

1.2 Perspectives méthodologiques **154**

2. Développement d'une base de connaissances ***156***

2.1 Apports méthodologiques **156**

2.2 Perspectives méthodologiques **156**

3. Analyse des imperfections ***156***

3.1 Apports méthodologiques **156**

3.2 Perspectives méthodologiques **157**

4. Traitement des imperfections ***158***

4.1 Apports méthodologiques **158**

4.2 Perspectives méthodologiques **159**

5. Transmission des connaissances ***165***

Chapitre 2 – Apports et perspectives opérationnels **166**

1. Evaluation de la performance du barrage ***166***

1.1 Apports opérationnels **166**

1.2 Perspectives opérationnelles **166**

2. Développement d'une base de connaissances ***167***

2.1 Apports opérationnels **167**

2.2 Perspectives opérationnelles **170**

Conclusion ***171***

Bibliographie ***173***

Annexes ***179***

Annexe 1 – Phénomènes de vieillissement ***179***

Annexe 2 – Catégories d'informations utilisées dans des systèmes d'évaluation et de contrôle d'ouvrages de génie civil ***180***

Annexe 3 – Exemple de dossier de validation ***181***

Annexe 4 – Etapes de la construction de la base de connaissances ***185***

Annexe 5 - Notation des barrages par les experts lors de la validation interne et tableaux de résultats associés ***188***

Annexe 6 – Distributions de possibilité données les experts E1, E2 et E3 ***190***

Annexe 7 – Propagation des imperfections dans le modèle ***198***

Table des illustrations

Figures

Figure 1 : Variables d'entrée et de sortie pour l'évaluation de la performance et de la conformité aux règles de l'art En pointillés, calcul des données issues de modèles mécaniques En traits gras, agrégation pour l'évaluation de la performance En traits fins, agrégation pour l'évaluation de la conformité aux règles de l'art---------- 9
Figure 2 : Intérêt du développement d'une base de connaissances ----------18
Figure 3 : Exemple de sous-ensemble flou ----------23
Figure 4 : Problématique de la thèse----------31
Figure 5 : Formalisation et agrégation pour la détermination de la performance et de la conformité aux règles de l'art----------32
Figure 6 : Organigramme de la méthode pour chaque scénario----------33
Figure 7: Différents types de barrages en remblai (extrait de Peyras (2003))----------34
Figure 8 : Exemple de graphe orienté du scénario de suffusion dans un barrage en remblai avec drain vertical (extrait de Peyras (2003))----------36
Figure 9 : Diagramme équivalent électrique support des séances de recueil et formalisation / Performance - Conformité aux règles de l'art ----------37
Figure 10 : Echelles retenues par le groupe----------41
Figure 11 : Exemple de références pour des mesures visuelles – (a) : schéma montrant la formation d'une marche sur le rip-rap pour l'indicateur « Qualité de la couche anti-batillage (enrochements) – (b) : photographie illustrant le faïençage pour l'indicateur « Qualité du béton bitumineux » ----------43
Figure 12 : Modélisation de l'évaluation de la performance vis-à-vis d'un mode de rupture ----------47
Figure 13 : Agrégation des indicateurs pour l'évaluation de la conformité aux règles de l'art----------49
Figure 14 : Démarche de construction de la base de connaissances----------53
Figure 15 : Les différents champs de la base de connaissances et leurs relations sémantiques ---------55
Figure 16 : Données de base, données brutes et données élaborées ----------60
Figure 17 : Démarche d'identification et de quantification des origines des imperfections des données63
Figure 18 : Etapes de la démarche de déclaration des imperfections des mesures ----------65
Figure 19 : Exemple de fiche descriptive d'indicateur ----------66
Figure 20 : Exemple de distribution de possibilité trapézoïdale ----------67
Figure 21 : Différents formats retenus pour la représentation des imperfections----------68
Figure 22 : Comparaison qualitative des notes précises et des distributions de possibilité ----------70
Figure 23 : Exemple d'intervalle flou sous la forme L-R----------71
Figure 24 : Démarche de détermination du degré de compatibilité entre deux notations ----------72
Figure 25 : Cas de deux distributions de possibilité dont l'intersection est un singleton----------73
Figure 26 : Représentation et propagation des données imparfaites dans le modèle défini par le groupe d'experts ----------74
Figure 27 : Mécanismes d'érosion interne (extrait de CFGB (1997))----------79
Figure 28 : Diagrammes équivalents électrique pour le cas de l'érosion interne dans le remblai – (a) : cas des masques en béton bitumineux, des masques en argile et des DEG – (b) : cas des masques en béton conventionnel et des masques en maçonnerie----------83
Figure 29 : Erosion interne liée à un ouvrage traversant – (a) : érosion le long de l'ouvrage traversant – (b) : érosion induite par l'eau présente dans la conduite ----------84
Figure 30 : Diagrammes série et parallèle – Erosion interne liée à un ouvrage traversant ----------84
Figure 31 : Agrégation des indicateurs et des fonctions pour l'évaluation de la performance vis-à-vis de l'érosion interne dans le remblai à étanchéité amont (en gras : indicateurs directs – entre crochets : gamme de variation de l'indicateur) ----------89

Figure 32 : Agrégation des indicateurs pour l'évaluation de la performance - Erosion interne liée à la présence d'un ouvrage traversant (en gras : indicateur direct) ---------- 91
Figure 33 : Agrégation des indicateurs pour l'évaluation de la conformité aux règles de l'art - Exemple du système de drainage ---------- 92
Figure 34 : Interface d'aide à l'évaluation ---------- 95
Figure 35 : Exemples de représentation sous la forme radar de désordres ayant affecté les fonctions du barrage de Cublize entre 1978 et 1988 ---------- 104
Figure 36 : Représentation chronologique des événements survenus sur le barrage de Cublize entre 1978 et 1988 ---------- 105
Figure 37 : Démarche Hydro-Québec et démarche Cemagref ---------- 108
Figure 38 : Coupe du barrage V1-BAR1 ---------- 113
Figure 39 : Etat du rip-rap amont ---------- 114
Figure 40 : Présence de zones humides sur le remblai aval ---------- 115
Figure 41 : Présence de zones humides sur le remblai aval ---------- 115
Figure 42 : Présence de végétation sur le remblai aval ---------- 116
Figure 43 : Relations de flux et de contact pour le sous-système de mesure ---------- 121
Figure 44 : Relations de flux et de contact en fonction du type de sous-système de mesure ---------- 121
Figure 45 : Distribution de possibilité déclarée par l'expert E2 pour l'indicateur « Etat des enrochements » ---------- 129
Figure 46 : Propagation des distributions de possibilité dans le modèle d'agrégation (E3 – V1-BAR1) – μPR : Performance Fonction de Protection – μET : Performance Fonction d'étanchéité – μDR : Performance Fonction de drainage – μAF : Performance Fonction d'auto-filtration – μEIR : Performance par rapport à l'érosion interne dans le remblai ---------- 136
Figure 47 : Distributions de possibilité utilisées pour réaliser la fusion des données ---------- 138
Figure 48 : Courbe de consensus obtenue pour la fusion (Donnée E1 ⊕ Donnée E2 ⊕ Donnée E3) de la Figure 47 ---------- 140
Figure 49 : Courbe de consensus obtenue pour la fusion (Donnée E1 ⊕ Donnée E2 ⊕ Donnée E3) avec introduction de masses de qualité pour l'évaluation des trois experts ---------- 143
Figure 50 : Résultat de la propagation de données imprécises dans le modèle de calcul de la performance d'une fonction ---------- 145
Figure 51 : Résultat de la propagation de données imprécises dans le modèle de calcul des performances - a et c : entrées du modèle, b et d : sorties du modèle (performance d'une fonction) - 146
Figure 52 : Réduction de l'imprécision sur les données d'entrée – en rouge, donnée de base, en bleu, donnée traitée ---------- 149
Figure 53 : Apports méthodologiques et opérationnels de la thèse – Apports méthodologiques en gras et apports opérationnels en italique ---------- 151
Figure 54 : Perspectives méthodologiques de la thèse ---------- 152
Figure 55 : Nombre d'heures passées par le groupe d'experts par type de scénario ---------- 154
Figure 56 : Temps mis par trois experts pour noter les indicateurs sous forme floue ---------- 159
Figure 57 : Lien entre distribution de possibilité et origines des imperfections ---------- 160
Figure 58 : Illustration de la non monotonie de la base de règles ---------- 161
Figure 59 : Distributions différentes menant à la même note précise de 7 par utilisation de la méthode du maximum ---------- 162
Figure 60 : Degré de possibilité et de nécessité de dépasser un seuil F ---------- 163
Figure 61 : Comparaison d'une performance évaluée de manière floue à un objectif défini de manière floue ---------- 165
Figure 62 : Exemple d'utilisation conjointe des deux outils ---------- 169

Tableaux

Tableau 1 : Connaissances tacites et connaissances explicites pour les barrages ---------- 10
Tableau 2 : Exemples d'imperfections sur les informations ---------- 21
Tableau 3 : Travaux sur la prise en compte des imperfections dans le domaine du génie civil avec utilisation de la théorie des possibilités ou de la logique floue (liste non exhaustive) ---------- 24
Tableau 4 : Fusion de deux preuves dans le cas où les preuves sont concordantes ---------- 25
Tableau 5 : Fusion de deux preuves dans le cas où les preuves sont conflictuelles ---------- 25
Tableau 6 : Grille de formalisation des indicateurs ---------- 39
Tableau 7 : Passage numérique – symbolique – Exemple du débit de drainage ---------- 40
Tableau 8 : Description des indicateurs de piézométrie selon la fonction qu'ils caractérisent ---------- 42
Tableau 9 : Intégration des informations spatiales et temporelles dans les références ---------- 44
Tableau 10 : Composants concernés par les phénomènes de dégradation - Remblais à étanchéité interne ---------- 58
Tableau 11 : Composants concernés par les phénomènes de dégradation - Remblais à étanchéité amont 59
Tableau 12 : AMDE processus adaptée aux barrages poids (extrait) ---------- 62
Tableau 13 : Correspondance des appellations de fonctions ---------- 83
Tableau 14 : Erosion interne dans le remblai - Nombre d'indicateurs visuels, d'auscultation et calculés identifiés pour chacun des types de remblai ---------- 85
Tableau 15 : Erosion interne dans le remblai - Nombre d'indicateurs de conception ou réalisation identifiés pour chacun des types de remblai ---------- 86
Tableau 16 : Erosion interne liée aux ouvrages traversants - Nombre et types d'indicateurs identifiés 86
Tableau 17 : Description de l'indicateur visuel « Fontis – cônes d'affaissement » ---------- 87
Tableau 18 : Description de l'indicateur issu de l'auscultation « Evolution du débit -diminution » --- 87
Tableau 19 : Description de l'indicateur de conception ou réalisation « Règles de filtre » ---------- 87
Tableau 20 : Utilisation de l'échelle en fonction des indicateurs – Erosion interne dans le remblai – Barrage à masque amont (BC : Béton Conventionnel – BB : Béton Bitumineux – DEG : Dispositif d'Etanchéité par Géomembrane – MA : Masque en Argile – MM : Masque en Maçonnerie) ---------- 88
Tableau 21 : Etat d'avancement de la formalisation pour les différents modes de rupture et mécanismes de dégradation ---------- 93
Tableau 22 : Résultats de l'ANOVA (Expert x Barrage) F : F de Fisher, p : probabilité associée à F – Risque α = 5 % - ddl B = 7 – ddl E = 4 ---------- 96
Tableau 23 : Résultats de l'ANOVA (Expert) F : F de Fisher, p : probabilité associée à F – ddl E = 4 97
Tableau 24 : Résultats du test de comparaison entre l'évaluation des experts et la note fournie par le modèle – Analyse sur huit barrages ---------- 98
Tableau 25 : Chronologie des désordres relevés sur le barrage de Cublize (tableau construit à partir de Peyras, 2003) ---------- 102
Tableau 26 : Liste des modes de rupture traités dans la méthode Hydro-Québec et dans la méthode Cemagref ---------- 109
Tableau 27 : Analyses menées en fonction des phases du cycle de vie et du sous-système considéré 118
Tableau 28 : AMDE processus pour le sous-système de mesure ---------- 119
Tableau 29 : AMDE processus pour le sous-système de traitement ---------- 120
Tableau 30 : Milieux extérieurs au sous-système de mesure ---------- 120
Tableau 31 : Tableau d'analyse fonctionnelle pour le sous-système de mesure - cas du sous-système de mesure par auscultation ---------- 122
Tableau 32 : Tableau d'analyse fonctionnelle pour le sous-système de mesure – cas du sous-système de mesure visuelle ---------- 122
Tableau 33 : Trame du tableau résultant de l'AMDE produit ---------- 123
Tableau 34 : Grille d'évaluation des caractéristiques de qualité pour les indicateurs d'auscultation - 125
Tableau 35 : Grille d'évaluation des caractéristiques de qualité pour les indicateurs visuels, les indicateurs calculés et les indicateurs de conception et de réalisation ---------- 126
Tableau 36 : Types de distribution utilisés par les experts ---------- 130
Tableau 37 : Largeur minimum et maximum relevées pour le noyau et le support de l'ensemble des distributions de possibilité ---------- 130

Tableau 38 : Surfaces des sous-ensembles flous donnés par les experts (NP : note précise – en grisé, surface maximale entre les 3 experts pour un indicateur donné) ---------- 131
Tableau 39 : Position des notes précises sur la distribution de possibilité---------- 131
Tableau 40 : Degré de compatibilité entre les notes données par deux experts---------- 134
Tableau 41 : Résultat de la comparaison de la notation déterministe (fournie par l'expert et calculée par l'algorithme) avec la notation floue ---------- 137
Tableau 42 : Fusion de la Donnée E1 avec la Donnée E2 ---------- 139
Tableau 43 : Fusion du résultat (Donnée E1 ⊕ Donnée E2) avec la Donnée E3 ---------- 139
Tableau 44 : Fusion de la Donnée E1 avec la Donnée E2 ---------- 141
Tableau 45 : Fusion du résultat (Donnée E1 ⊕ Donnée E2) avec la Donnée E3 ---------- 142
Tableau 46 : Situations étudiées pour l'analyse de sensibilité ---------- 147
Tableau 47 : Résultats de l'analyse de sensibilité en fonction des situations rencontrées---------- 148

Glossaire

AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets) : étude déductive et qualitative avec laquelle les effets (conséquences) des causes défaillances des composants élémentaires sont systématiquement identifiées (Zwingelstein, 1995).

Analyse fonctionnelle : démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système (AFNOR, 1996).

Défaillance : Cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Par extension, on considère parfois qu'il y a une défaillance lorsqu'il y a altération de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise (Villemeur, 1988).

Dégradation : altération de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

Etat limite : les états-limites sont les phénomènes que l'on souhaite éviter. Deux catégories d'états-limites sont distinguées dans les règlements aux états-limites : les ELS et les ELU. Leur distinction est liée aux probabilités admissibles d'occurrence leur correspondant, elles mêmes dépendant en principe de l'importance des conséquences de leur apparition. Les Eurocodes et les documents techniques aux états-limites fixent des niveaux de probabilité d'occurrence des deux catégories d'états-limites. Ainsi pour une période de référence comprise entre 50 et 100 ans (durée de vie escomptée de l'ouvrage), les ELS correspondent à une probabilité d'occurrence comprise entre 0,5 et 10^{-2} et les ELU correspondent à une probabilité d'occurrence comprise entre 10^{-3} et 10^{-6}. Cette probabilité cible d'occurrence d'un état-limite est obtenue en combinant les probabilités individuelles cible de dépassement des actions d'une part, des résistances d'autre part. Une approche plus pragmatique consiste à faire correspondre les ELS à des critères de fonctionnalité de l'ouvrage, et les ELU à des pertes d'équilibre statique ou des modes de ruine de l'ouvrage. En toutes hypothèses, le classement d'un état-limite entre ELS et ELU peut revêtir un caractère arbitraire ou formel, dicté par l'expérience de l'expert (Groupe de travail "Barrages poids", 2005).

Expert : Personne disposant d'un savoir et d'un savoir-faire (Zwingelstein, 1995).

Fiabilité : Aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée (Villemeur, 1988).

Fidélité : Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure (AFNOR, 1994).

Fonction : Actions d'un produit ou de l'un des ses constituants exprimées exclusivement en terme de finalité (AFNOR, 1996).

Imprécision : Enoncé approximatif de la connaissance (Bouchon-Meunier, 1999).

Incertitude : Doute sur la validité d'une connaissance (Bouchon-Meunier, 1999).

Incomplétude : Absence de connaissances ou l'existence de connaissances partielles (Bouchon-Meunier, 1999).

Indicateur : information ou donnée formalisée de manière à rendre son utilisation répétable et reproductible. Les informations peuvent être de différentes natures : observation visuelle, données d'auscultation, données issues d'un modèle, informations ou données de conception ou réalisation. Un indicateur donne des indications sur l'état d'un phénomène ou la performance d'une fonction.

Justesse : Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique (AFNOR, 1994).

Mesurage : Ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur (AFNOR, 1994).

Mesurande : Grandeur particulière soumise à un mesurage (AFNOR, 1994).

Performance d'un barrage : Jugement, à un instant donné, de son aptitude à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu.

Répétabilité : étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure (AFNOR, 1994).

Reproductibilité : étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure (AFNOR, 1994).

Rupture (d'un barrage) : Rupture ou mouvement d'une partie du barrage ou de sa fondation, tel que l'ouvrage ne puisse plus retenir l'eau. En général, le résultat sera une lachûre d'un volume d'eau important entraînant des risques pour les personnes ou les biens à l'aval (CIGB, 1995).

Scénario : Enchaînements de causes et d'effets qui conduisent à la dégradation des caractéristiques et propriétés des barrages et ouvrages annexes (CIGB, 1994).

Sécurité : Aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques (Villemeur, 1988).

Sensibilité : Quotient de l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée (AFNOR, 1994).

Système : Ensemble d'éléments organisés pour remplir une mission déterminée dans un environnement défini (Lair, 2000).

Introduction

La conservation du patrimoine, la vérification que les ouvrages remplissent pleinement leurs fonctions et l'assurance de la sécurité sont des préoccupations majeures des concepteurs, des propriétaires et des exploitants d'ouvrages de génie civil. Les gestionnaires privés et publics ont toujours essayé de maintenir leurs infrastructures, soumises à un vieillissement inexorable, dans une condition d'usage et de service à coût minimum (Flintsch et Chen, 2004). Ceci se justifie pleinement par le fait que les ouvrages de génie civil peuvent subir au cours de leur vie :

- des dégradations structurelles ou fonctionnelles ayant des conséquences techniques comme le vieillissement accéléré, la déqualification ou la nécessité de réhabilitation, ou économiques comme des pertes de production liées à des pertes d'eau excessives dans le cas d'un barrage ou la fermeture de la circulation à certaines classes de véhicules dans le cas d'un pont ;
- des défaillances pouvant donner lieu à des événements dramatiques comme la rupture du barrage de Malpasset en France en 1959, l'effondrement Silver Bridge aux Etats-Unis en 1967, l'accident de la centrale de Tchernobyl en 1986…

Ces préoccupations ont généré, à partir du milieu des années 1960, une forte augmentation de la demande d'outils et de méthode pour gérer les ouvrages de génie civil selon deux angles : d'une part la performance c'est-à-dire « l'aptitude d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage à assurer les fonctions pour lesquels il a été conçu » (Lair, 2000) et d'autre part, la sécurité définie par « l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données des événements critiques ou catastrophiques » (Villemeur, 1988). Les deux éléments sont bien sûr liés : un mauvais état est susceptible d'entraîner une diminution de la sécurité et un bon état est nécessaire à un ouvrage sûr. Toutefois la relation entre ces deux notions n'est ni simple ni linéaire a priori.

Le développement de méthodes et d'outils d'aide à l'évaluation de la performance et de la sécurité des ouvrages de génie civil représente par conséquent un enjeu sociétal important et une thématique de recherche forte. En effet, un des verrous importants de cette thématique est engendré par le fait que plusieurs types de connaissances et de données sont employés pour caractériser performance et sécurité –modèles mécaniques, données d'auscultation, observations visuelles, règles de l'art– et qu'aucun d'eux n'est suffisant à lui seul pour définir la performance ou la sécurité d'un ouvrage, notamment pour des ouvrages complexes comme les barrages. La difficulté est alors d'agréger, dans un seul modèle, cet ensemble d'informations et de connaissances de natures et de caractéristiques différentes (données numériques ou symboliques, globales ou ponctuelles, plus ou moins disponibles, précises, certaines…). Nous nous focalisons, dans ce travail, sur la recherche d'approches pertinentes pour l'évaluation de la performance d'un barrage, prérequis indispensable à la détermination des actions de maintenance adéquates à un pas de temps adéquat.

Notre domaine d'étude est constitué par les barrages relevant du régime de l'autorisation au titre de la loi sur l'eau en service et placés sous le contrôle du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. Parmi cette population, les ouvrages intéressant la sécurité publique constituent un groupe d'environ deux cent cinquante ouvrages : ce sont des barrages dont la rupture aurait des conséquences graves pour les populations installées en aval. Approximativement la moitié de ces ouvrages –en terre, en béton ou en maçonnerie pour la plupart– a plus de trente ans et est donc sujette à des mécanismes de vieillissement (Cathala et al., 1998). Dans ce mémoire, nous illustrerons les approches sur les barrages en remblai.

Ce rapport est organisé en trois parties. La problématique posée par l'évaluation de la performance des barrages avec ses particularités, ses limitations et ses contraintes est traitée dans la Partie 1. Des questions scientifiques sont posées à l'issue de cette première Partie.

La Partie 2 présente les réponses méthodologiques que nous apportons à ces questions : une méthode d'évaluation déterministe de la performance des barrages par recueil, formalisation et agrégation de différentes sources de connaissances est proposée dans le Chapitre 1. Le Chapitre 2 traite de la capitalisation des connaissances du domaine au travers du développement d'une base de connaissances sur les phénomènes de dégradation des barrages. Les différentes sources de connaissances sont imparfaites (incertaines et/ou imprécises et/ou incomplètes) : le Chapitre 3 fait l'objet du développement d'une méthode non déterministe d'évaluation de la performance qui procède par représentation de ces imperfections et par leur propagation dans le modèle. Ce chapitre décrit également une méthode d'analyse de ces imperfections.

La Partie 3 est dédiée à la mise en œuvre de ces méthodes sur des cas concrets.

Une discussion est menée dans la Partie 4 sur les apports scientifiques et opérationnels réalisés dans la thèse. Des perspectives à ce travail y sont également exposées.

Partie 1
Problématique posée par l'évaluation de la performance des barrages en service

Chapitre 1 – Approches développées pour l'évaluation de la performance des barrages en service

Chapitre 2 - Démarche d'évaluation de la performance basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances

Chapitre 3 - Formaliser et agréger les connaissances

Chapitre 4 – Formaliser les connaissances du domaine

Chapitre 5 - Prendre en compte et analyser les imperfections

Chapitre 6 – Conclusion : Définition de la problématique de la thèse

Chapitre 1 – Approches développées pour l'évaluation de la performance des barrages en service

Nous ne nous intéressons dans ce mémoire qu'aux barrages en service : la première mise en eau du barrage, période particulière et souvent délicate dans la vie de l'ouvrage, ne sera pas traitée. Dans la suite du texte, pour alléger la présentation, le terme « barrage » désigne un « barrage en service ».

1. Difficultés posées par l'évaluation de la performance des barrages

Nous définissons la performance d'un barrage comme un jugement, à un instant donné, de son aptitude à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu. Par extension, on parle de « performance d'une fonction » pour indiquer l'état de réalisation de la fonction (Cremona, 2002). Lorsque nous parlons de performance, nous nous référons d'une part, aux différents composants de l'ouvrage et aux fonctions de conception correspondantes, contribuant au fonctionnement global de l'ouvrage (performance de la fonction d'étanchéité, performance de la fonction de drainage…) ; nous sommes alors dans le cadre des ELS (Etats Limites de Service). Nous nous référons d'autre part, à la performance du barrage à résister aux divers modes de rupture (érosion interne, glissement...) et donc aux ELU (Etats Limites Ultimes). Les fonctions concernées sont alors les fonctions de résistance par rapport aux modes de rupture. Dans la suite, pour simplifier les dénominations, la « performance vis-à-vis du mode de rupture x » fera référence à la « performance de la fonction de résistance vis-à-vis du mode de rupture x ».

Il nous paraît essentiel de travailler sur ces deux grandeurs pour les raisons exposées ci-dessous.

La performance des fonctions ne renseigne pas sur l'état global du barrage mais permet :

- de prendre en considération des éléments précurseurs au mode de rupture étudié afin de le détecter le plus précocement possible ;
- de distinguer les fonctions dégradées et de décider des actions de maintenance et de réparation de manière ciblée : pour exemples, la perte de performance de la fonction d'étanchéité va être corrigée par la réparation de fissures dans un masque amont en béton conventionnel, la perte de performance de la fonction de drainage va entraîner une maintenance ou une réparation des drains ou exutoires de drainage.

La performance vis-à-vis des modes de rupture a l'avantage de fournir une évaluation globale de l'ouvrage et permet notamment de prendre des décisions d'urgence (vidange totale ou partielle). Toutefois, un barrage peut être considéré comme globalement performant sans pour autant être dans un état fonctionnel optimal : par exemple, la fonction d'étanchéité peut être dégradée et la fonction de drainage totalement performante, la performance par rapport à l'érosion interne est alors excellente puisque la quantité d'eau anormale qui entre dans le barrage est entièrement évacuée par le composant conçu pour cette fonction.

Dans la suite du mémoire, l'emploi du terme « performance » correspondra à l'ensemble des performances des différentes fonctions et des performances vis-à-vis des différents modes de rupture.

L'évaluation de la performance des barrages est loin d'être triviale et se heurte à différentes difficultés. Elles sont présentées ci-dessous selon les quatre axes proposés par (Talon, 2006) : axe phénoménologique, axe fonctionnel, axe géométrique et axe temporel.

Les difficultés concernant l'axe phénoménologique et l'axe fonctionnel ont deux origines principales. Premièrement, la perte de performance d'un ouvrage est liée à une succession de phénomènes aux origines diverses et complexes et aux conséquences tout aussi diverses et complexes allant de la dégradation d'une ou plusieurs fonctions à l'événement extrême de rupture de l'ouvrage. Des réactions de différentes natures peuvent avoir lieu : chimique dans le cas de la dissolution du gypse par exemple ou mécanique lors de la consolidation de sols. La figure de l'Annexe 1 dresse les enchaînements de phénomènes pouvant se dérouler lors de la vie d'un barrage en remblai.

Les modes de rupture d'un barrage sont multiples : pour les barrages en remblai, on distingue classiquement la surverse, le glissement au travers du remblai, le glissement au travers de la fondation, l'érosion interne dans le remblai et l'érosion interne dans la fondation. Certains événements peuvent avoir lieu selon des schémas itératifs : une déformation de la fondation peut entraîner une érosion interne du fait de tassements différentiels qui provoquent l'ouverture de fissures et une érosion interne peut conduire à une déformation de la fondation à la suite de la disparition d'une partie du matériau.

Deuxièmement, les origines possibles de la détérioration de la performance d'un barrage sont multiples (CIGB, 1994) :

- les erreurs de conception ou de réalisation : mauvaise connaissance du site, utilisation de matériaux hétérogènes ou inappropriés, non respect des règles de filtre, compactage ou scarification insuffisants… ;
- le vieillissement naturel des ouvrages sous l'effet des actions extérieures telles que les cycles de gel-dégel, une température excessive, le batillage mais aussi le développement de la végétation, le niveau de la retenue… ;
- une maintenance inadéquate ou insuffisante : entretien de la végétation sur le parement aval non réalisé, dépôts de boues ferrugineuses non nettoyés… ;
- une utilisation non prévue : augmentation de la hauteur d'eau du réservoir ;
- l'occurrence d'événements extrêmes tels que crues et séismes ;
- on peut rajouter à cette liste des actions humaines : mauvaises manœuvres, guerre, sabotage…

Un barrage est constitué d'un ensemble de composants : talus amont et aval, système de drainage, système d'étanchéité, système de protection de l'étanchéité, fondations, ouvrages traversants, déversoir de crues… Ces composants sont réalisés avec des matériaux différents pouvant être hétérogènes (dans les barrages anciens notamment, les caractéristiques des couches peuvent être variables), ne subissent pas les actions extérieures de la même manière et sont sensibles à des phénomènes différents. Certains de ces composants sont, une fois le barrage achevé, totalement inaccessibles, sauf à réaliser des carottages par exemple. Cet ensemble de points constitue les difficultés d'évaluation de la performance liées à l'axe géométrique.

Ces différents composants remplissent une ou plusieurs fonctions qui peuvent être plus ou moins dégradées. Ceci peut entraîner une détérioration de la performance et de la sécurité de l'ouvrage. Celle-ci se produit à des vitesses différentes en fonction des phénomènes qui en sont à l'origine, avec une cinétique qui ne sera pas forcément constante du démarrage à la fin, comme c'est le cas du renard hydraulique (Degoutte et Royet, 1993). Les effets des dégradations peuvent se faire sentir seulement après des années d'exploitation. Ces points constituent les difficultés d'évaluation de la performance selon l'axe temporel**.**

En résumé, les difficultés d'évaluation de la performance sont apportées par :

- la compréhension incomplète des réactions complexes se déroulant pendant la vie d'un barrage entraînant une inconnaissance ou une méconnaissance phénoménologique ;
- la complexité du système, un nombre très important de variables étant susceptible de provoquer une dégradation de la performance des barrages ;
- le caractère unique de chaque ouvrage : même si les phénomènes pouvant se dérouler dans deux barrages de même type, remblai par exemple, sont les mêmes, en fonction des éléments de conception et de réalisation, du site de l'ouvrage… des chemins de vieillissement différents peuvent être privilégiés. La difficulté est d'identifier quels sont ces chemins de vieillissement préférentiels ;
- les conditions environnementales très différentes dans lesquelles ces ouvrages peuvent être situés, avec des aléas associés différents ;
- les données et des stratégies d'auscultation ne couvrant pas forcément toutes les composantes d'un barrage et entraînant une incomplétude des données et des informations.

2. Approches pour l'évaluation de la performance

Dans le cadre du diagnostic et de l'analyse de risques pour les barrages, différentes approches ont été identifiées et leurs limites décrites dans un état des lieux dressé par (Peyras, 2003) ; nous le présentons et le complétons dans les paragraphes suivants.

La modélisation physique permet d'accéder, dans le domaine des barrages, par exemple au gradient hydraulique ou au coefficient de glissement. Les données issues de modèles physiques sont utilisées lors de trois périodes de la vie de l'ouvrage : pour son dimensionnement lors de sa conception, lors de sa première mise en eau et lors de revues de sécurité qui est le cadre de notre étude. Ce sont des données privilégiées pour l'analyse des ouvrages. Pour le suivi au cours de la vie du barrage, l'absence possible de mesures instrumentales sur lesquelles les modèles physiques reposent, limite cependant leur emploi qui, en outre, renseigne surtout sur l'événement extrême de rupture. Par ailleurs, tous les modes de rupture ne sont pas accessibles par des modèles numériques. La modélisation peut être longue et poser des difficultés en lien avec la compréhension incomplète des mécanismes de dégradation des barrages et le nombre important de facteurs qui peuvent influencer le vieillissement de l'ouvrage. Le caractère unique de chaque barrage et la variété des conditions environnementales dans lesquelles le barrage est placé augmente encore ces difficultés.

L'analyse des données de l'auscultation permet de pouvoir considérer ces mesures en dehors de l'influence de paramètres extérieurs (niveau de la retenue, date ou effet saisonnier, temps, pluie). En se ramenant à des conditions constantes, il est possible d'analyser le comportement du barrage au cours du temps et de détecter la mise en place de phénomènes de dégradation (par exemple, détection d'un colmatage du drain par diminution brutale du débit de drainage). Toutefois, certains barrages sont peu ou pas équipés d'instruments d'auscultation et par ailleurs, certains mécanismes ne sont pas facilement mis en évidence par des données d'auscultation comme par exemple, l'érosion interne liée à un ouvrage traversant. Ces deux points constituent des limites à cette approche.

Les approches fonctionnelles et de la sûreté de fonctionnement ont été appliquées par exemple, aux produits du bâtiment (Lair, 2000 ; Talon, 2006), aux barrages poids (Peyras et al., 2006), aux barrages en remblai (Figeac, 2003) et aux digues de protection contre les inondations (Serre et al., 2006). Pour les ouvrages hydrauliques, elles conduisent notamment à la construction d'un modèle fonctionnel de vieillissement en utilisant une représentation sous forme de graphes orientés en enchaînant des séquences successives de défaillances. Ce modèle générique, reposant sur trois types de variables (fonction, phénomène et symptôme), est donc utilisable pour tous les mécanismes de vieillissement. Il reste toutefois un modèle qualitatif de description des mécanismes de dégradation et ne permet donc pas l'évaluation de la performance.

Les approches basées sur l'analyse des historiques de ruptures, des incidents et des accidents des barrages : plusieurs publications de la CIGB (Commission Internationale des Grands Barrages) ou du CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs) présentent des séries statistiques sur les ruptures et incidents (Kreuzer, 2000). L'Université de New South Wales a développé une telle approche pour évaluer l'influence relative de facteurs particuliers sur la probabilité d'occurrence d'un mécanisme d'érosion interne et d'instabilité par glissement (Foster *et al.*, 2000a ; Foster *et al.*, 2000b). Ces approches sont toutefois difficiles à mettre en œuvre dans le cadre des barrages du fait de l'hétérogénéité du parc en terme de conception, âge, conditions environnementales… ce qui génère des échantillons homogènes de très faible taille.

Les méthodes expertes procèdent selon un recueil et une formalisation des connaissances théoriques et heuristiques d'experts du domaine. Les systèmes experts ont la capacité à reproduire le raisonnement d'un expert et sont capables de raisonner avec des connaissances d'origine et de nature diverses (Zwingelstein, 1995). Les méthodes expertes offrent l'avantage de pouvoir reproduire l'analyse et le diagnostic menés par un ingénieur lors de l'expertise d'un barrage. Elles ont l'intérêt de reposer sur les méthodes d'inspection traditionnelles avec lesquelles les ingénieurs sont à l'aise et dont ils sont coutumiers. Leur inconvénient majeur est le temps de développement important qui peut leur être associé. Un prérequis pour leur mise en œuvre est évidemment l'existence et la disponibilité de sources de connaissances en adéquation avec les objectifs du projet. Un point essentiel de ce type d'approche est de trouver le niveau d'abstraction pertinent. En effet, les modèles développés doivent être génériques pour une classe de barrages donnée ; par exemple, les barrages en remblai à étanchéité amont, quel que soit le type d'étanchéité –perré en maçonnerie, masque en argile, masque en béton bitumineux…– Il ne s'agit pas de déployer un modèle pour chacun des ouvrages individuels rencontrés.

Pour réaliser l'évaluation de la performance des barrages, nous avons choisi, dans ce mémoire, **d'adopter une démarche basée sur une méthode de formalisation et d'agrégation des connaissances manipulées par un groupe d'experts sur les barrages** (approche de type système expert). Nous proposons de nous pencher à présent plus en détail sur les approches à base de recueil et de formalisation des connaissances.

Chapitre 2 - Démarche d'évaluation de la performance basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances

1. Travaux basés sur une modélisation de l'approche experte pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques

Plusieurs travaux reposant sur une modélisation des approches expertes ont été menés pour les ouvrages hydrauliques. Ces systèmes sont plus ou moins « raffinés » :

Des approches simplifiées ont été déployées par plusieurs organismes. La méthode Schémas Directeurs de Maintien du Patrimoine Hydraulique développée par EDF en France est basée sur la détermination d'un indice technique en fonction de l'état du composant, de son importance fonctionnelle et de l'évolution du composant (De Laleu et al., 2000). La méthode VSC (Visites Simplifiées Comparées) a été développée par le CETMEF (Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales) et les services du Réseau Scientifique et Technique pour effectuer une évaluation rigoureuse et homogène de l'état des digues. Elle prend en compte : l'état des ouvrages vis-à-vis du fonctionnement, de la sécurité et de l'environnement et la définition des priorités d'intervention ou stratégie, s'appuyant sur des études indépendantes (potentiel touristique, ressource en eau, transport…) (Daly et al., 2004). Une procédure interne, dite CSO (Conduite et Surveillance des Ouvrages), a été mise en place pour le suivi, l'entretien des digues de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). La surveillance des digues fait appel principalement à des observations visuelles, des mesures instrumentales et des mesures spécifiques pour des tronçons ou secteurs localisés (Tratapel, 2004). Ces approches de premier niveau sont par exemple très pertinentes pour un diagnostic rapide d'ouvrage.

Parmi les approches plus complexes, on peut citer la méthode des indices de conditions issue du programme transversal REMR (Repair, Evaluation, Maintenance and Rehabilitation) déployé par l'US Army Corps of Engineers (USACE) au début des années 1980. Une méthodologie générique a été proposée afin d'allouer les fonds, de manière rationnelle, entre les ouvrages d'un parc important à partir de l'évaluation d'un indice de condition (Andersen et Torrey, 1995 ; Andersen *et al.*, 2001). Ce programme repose sur une méthodologie d'évaluation de l'état des ouvrages établie tout d'abord pour les chaussées puis élargie à vingt-neuf types d'ouvrages de génie civil au sein de l'USACE. La démarche a été reprise et adaptée par d'autres organismes tels qu'Hydro-Québec dans son « Guide d'implantation des indices de condition - barrages en remblai (Hydro-Québec, 2005). Y sont intégrées les caractéristiques de chaque barrage (caractéristiques hydrauliques, géologiques et géotechniques du site, principaux critères de conception, historique du comportement depuis la mise en eau, événements durant l'exploitation). C'est une méthode très complète et puissante. Le DAM Safety Assessment Subsystem (DAMSAS) développé à Taïwan est une autre méthode à base de règles formalisées. Il repose sur des inspections visuelles et des données d'auscultation à partir desquelles sont établis l'état du barrage (normal, anormal, dangereux) et les recommandations associées (Chou et al., 2001). Enfin, une méthode a été mise en œuvre au Cemagref d'Aix-en-Provence pour les digues de protection contre les inondations : des indicateurs de performance ont été construits pour caractériser les différents phénomènes dans le corps de digue et intégrés dans une méthode d'aide à la décision (Serre et al., 2006). Les formalisations doivent être à présent validées sur des cas réels et en simulation.

Les méthodes à base de règles formalisées sont des méthodes robustes qui reposent sur de nombreuses informations de différentes natures. Elles sont destinées à des ingénieurs confirmés dans le cadre d'expertises approfondies d'ouvrages hydrauliques.

2. Proposition de recherche

Nous nous proposons, dans ce travail, de formaliser et agréger les connaissances mises en œuvre par des ingénieurs confirmés dans leurs tâches d'expertise. Les tâches d'expertise regroupent des diagnostics approfondis d'ouvrages, des revues décennales de sécurité, des interventions d'urgence sur des barrages connaissant des incidents graves… Ces tâches d'expertise concernent notamment les barrages français intéressant la sécurité publique et placés sous le contrôle du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables (MEDAD). Ce cahier des charges répond aux critères des méthodes « complexes » que nous venons de présenter. Nous orientons nos travaux dans cette direction.

Les experts chargés de ces tâches sont rattachés à l'équipe Secure du Cemagref d'Aix-en-Provence et sont membres du PATOUH (Pôle d'Appui Technique des Ouvrages Hydrauliques) créé en 2004. Le PATOUH est constitué d'experts du Cemagref, du CETMEF, du CETE Normandie-Centre, du CETE de Lyon et du CETE Méditerranée. Le Cemagref coordonne et réalise les actions du pôle pour ce qui concerne les barrages relevant du MEDAD. Au nombre de cinq, les ingénieurs conduisent plusieurs actions d'expertise depuis au minimum une dizaine d'années.

L'enjeu de notre recherche est le développement d'un système d'évaluation de la performance des barrages. Les applications concernent les barrages placés sous le contrôle du MEDAD. En effet, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode formalisée pour le suivi de ces ouvrages. Par contre, des connaissances sont disponibles dans l'équipe. Nous visons à obtenir une méthode complète d'évaluation de la performance de l'ouvrage et de sa conformité aux règles de l'art pour ce qui concerne les critères de conception et de réalisation.

Cette méthode constitue la première pierre pour le suivi des ouvrages dans le temps, voire la gestion d'un parc de barrages.

3. Description des connaissances à formaliser et à agréger

3.1 Variables d'entrée et de sortie du modèle

La Figure 1 décrit les variables d'entrée qui sont agrégées par les experts du Cemagref d'Aix-en-Provence pour l'évaluation (i) de la performance du barrage et (ii) de la conformité des différents composants par rapport aux règles de l'art en cours (critères de conception et réalisation). Ce dernier élément est très important notamment pour une détermination future de la sécurité du barrage. Considérons un barrage pour lequel toutes les fonctions sont évaluées comme performantes : l'ouvrage est appréhendé comme totalement performant au jour de la visite. Par contre, si dans le dossier l'ingénieur identifie qu'un ouvrage traversant, une conduite par exemple, a été posé sur un lit de sable, sa note de conformité sera mauvaise. Ceci aura une répercussion sur l'évaluation de sa sécurité. L'ouvrage ne peut être considéré comme sûr, une défaillance pouvant se produire à un terme donné en raison de la pose non conforme de la conduite et cela, même si au moment de la visite, aucun signe n'indique de perte de performance de l'ouvrage.

Dans ce mémoire, nous avons comme objectif d'établir les modèles permettant d'obtenir d'un côté, la performance et de l'autre, la conformité aux règles de l'art. Nous n'abordons pas les aspects de prédiction du comportement de l'ouvrage, si ce n'est en perspectives.

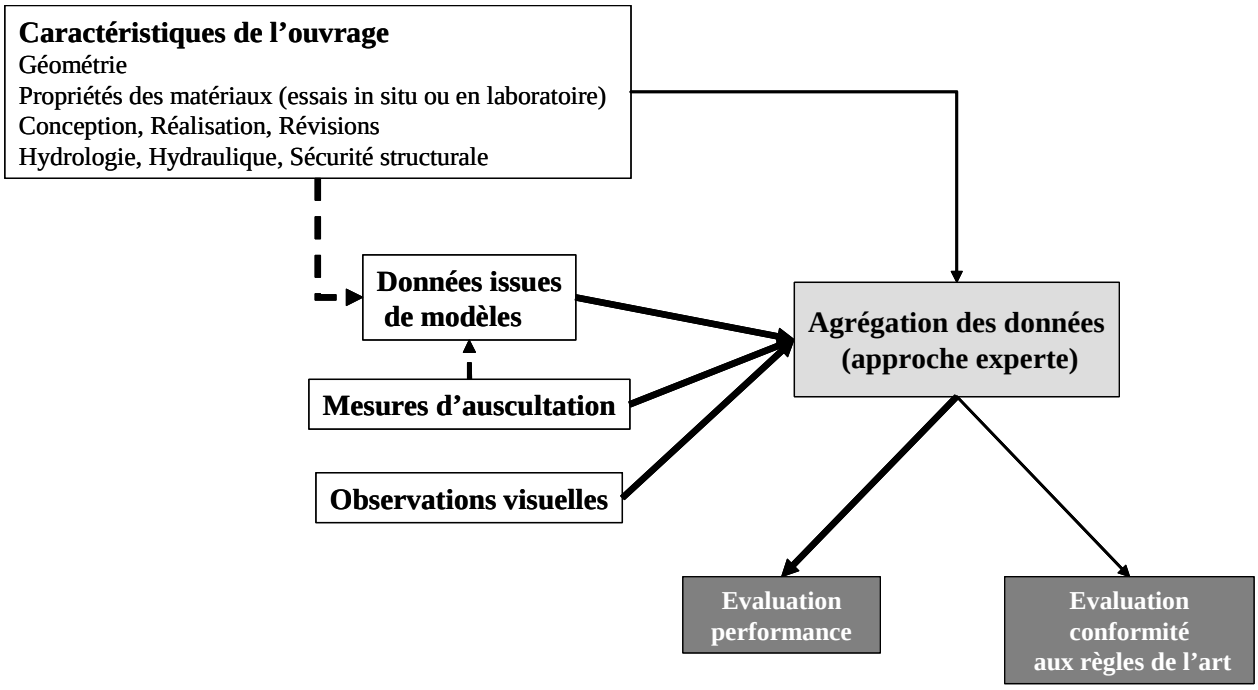


Figure 1 : Variables d'entrée et de sortie pour l'évaluation de la performance et de la conformité aux règles de l'art
En pointillés, calcul des données issues de modèles mécaniques
En traits gras, agrégation pour l'évaluation de la performance
En traits fins, agrégation pour l'évaluation de la conformité aux règles de l'art

3.2 Connaissances explicites et connaissances tacites

De manière générale, les différentes connaissances manipulées se présentent sous une forme soit tacite soit explicite et il est important dans un premier temps de les recenser. Le Tableau 1 donne la définition de ces deux types de connaissances (Grundstein et Barthès, 1996). Les connaissances explicites sont des savoirs qui sont présents sous la forme :

- de documents tels que des manuels de génie civil ou des guides techniques plus spécialisés sur les barrages comme ceux émis par le CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs), la CIGB ou le Cemagref ;
- de méthodes et d'outils (logiciels) de calcul : essais géotechniques, calcul du gradient hydraulique, calcul du coefficient de résistance au glissement… ;

Les connaissances tacites relèvent de connaissances heuristiques exploitées à l'aide des connaissances théoriques explicites. Elles sont liées à l'intellect des ingénieurs chargés de missions d'expertise. Les experts, lorsqu'ils mènent une action d'analyse d'un barrage, manipulent donc connaissances théoriques et connaissances heuristiques. Ces dernières augmentent avec le nombre de cas rencontrés par les experts.

Pour les barrages, nous avons classé les connaissances disponibles sur l'évaluation de ces ouvrages dans ces deux catégories, en faisant un distinguo entre les connaissances disponibles au niveau de la profession (« barragistes ») et le savoir disponible dans l'équipe du Cemagref d'Aix-en-Provence. Des équipes d'autres organismes ont également développé leur propre savoir-faire, comme en témoignent les travaux cités au début de ce chapitre. Nous effectuerons plus loin une comparaison de ces savoir-faire issus d'équipes différentes, pour dégager, le cas échéant, des similitudes.

La frontière entre le savoir de l'équipe et le savoir individuel de ses membres n'est pas nette car il y a transmission notamment par « compagnonnage » entre certains membres de l'équipe. Il reste toutefois probablement des connaissances purement individuelles liées aux cas rencontrés par chacun des experts : il est ainsi important de rassembler et mettre en commun les différents savoirs individuels.

	Description (d'après (Grundstein et Barthès, 1996)	**Cas des barrages**
Connaissances tacites	***Savoir-faire de l'entreprise*** Connaissances explicitables ou non et adaptatives Connaissances concernant des contextes décisionnels, habiletés, tours de main, « secrets de métier », routine, culture d'entreprise Connaissances acquises par la pratique, souvent par apprentissage collectif implicite ou par une logique « maître-apprenti » Connaissances localisées	***Savoir de l'équipe Cemagref*** ***« Savoir-mesurer »*** : mise en place d'indicateurs visuels, connaissance des instruments d'auscultation ***« Savoir-analyser »*** : interprétation des mesures d'auscultation et visuelles dans le temps et l'espace ***« Savoir-agréger »*** : combinaison des différentes données (visuelles, auscultation, modèles physiques, données de conception et réalisation) pour obtenir une évaluation globale du barrage ***« Savoir-diagnostiquer »*** : établir les causes de telle ou telle dégradation ***« Savoir-pronostiquer*** » : prédire les évolutions au sein du barrage et établir leurs conséquences ***« Savoir-décider »*** : proposer les actions nécessaires à la correction d'une dégradation, en affectant un délai de réalisation
Connaissances explicites	***Savoirs de l'entreprise*** Connaissances formalisées et spécialisées Données, procédures, modèles, algorithmes, documents d'analyse, synthèses, plans Hétérogènes, incomplètes ou redondantes, fortement marquées par les discordances de leur création, n'expriment pas le « non-dit » de ceux qui les ont formalisées Réparties	***Savoir des « barragistes »*** Connaissances du domaine relatives aux concepts manipulés au cours de l'activité ***Connaissances des phénomènes*** Mécanique des sols, mécanique des roches Comportement des matériaux Hydraulique… ***Méthodes et outils et de calcul*** Calcul des crues Calcul de résistance aux séismes Calcul de résistance au glissement Calcul du gradient hydraulique ***Règles de l'art*** Guides techniques pour la conception, la réalisation et la surveillance, l'entretien des barrages (CFBR, CIGB, Cemagref)…

Tableau 1 : Connaissances tacites et connaissances explicites pour les barrages

Nos travaux portent plus spécifiquement sur le savoir-mesurer, le savoir-analyser et le savoir-agréger. Leur pérennisation est d'autant plus cruciale que les phénomènes sont nombreux et complexes comme dans le cas du vieillissement des barrages (cf. Figure A1-1). Il s'agit de proposer une formalisation de ces connaissances afin de les pérenniser, en explicitant les connaissances tacites.

Pour le « savoir-mesurer », il s'agit de transformer une observation visuelle en une mesure, en établissant une méthode de mesure et en fixant les conditions de sa réalisation (mode opératoire, échelles et références, caractéristiques de temps et d'espace). L'expert est considéré comme un instrument de mesure. Nous nous inspirons pour cela des travaux que nous avons menés dans le domaine du génie des procédés et qui nous ont conduits à établir le concept d'« indicateur sensoriel » (Curt et al., 2001). Il est également nécessaire de décrire les autres données et mesures dans un format qui permette les combinaisons telles qu'effectuées par les ingénieurs (cf. Figure 1).

Pour le « savoir-analyser », il s'agit d'interpréter des évolutions, dans le temps et dans l'espace, de données, notamment issues de l'auscultation, après leur traitement pour prendre en compte les effets du niveau du plan d'eau, des effets saisonniers, de la pluviométrie et du temps (Bonelli et al., 1998) : ces traitements permettent de répondre à des questions telles que « L'évolution de la piézométrie est-elle significative ? », « Y a-t-il une zone plus faible ? » », « Quels sont les effets réversibles ou irréversibles ? »…

La formalisation du « savoir-agréger » consiste à établir la performance et la conformité aux règles de l'art des composants du barrage à partir d'un modèle et d'un certain nombre de données de types différents. L'explicitation du modèle doit être faite à un niveau d'abstraction suffisant pour que l'approche soit la plus générique possible, rendant ainsi possible son application sur des barrages différents.

Les questions scientifiques soulevées par l'étude de ces différents savoir-faire sont présentées dans le Chapitre 3.

4. Retombées de la démarche de formalisation et agrégation des connaissances

Les retombées potentielles de cette démarche peuvent se situer sur trois plans : le management des connaissances c'est-à-dire leur capitalisation et leur transmission, le regroupement des connaissances et l'homogénéisation des jugements.

Une capitalisation des connaissances sera effectuée : elle peut aider à pallier des départs à la retraite ou mutations mais également faciliter la formation d'ingénieurs débutants. En effet, cette capitalisation doit avoir comme objectif, à terme, la transmission de ces savoirs à des ingénieurs en formation. La transmission du savoir est un thème qui a été traité par plusieurs auteurs : la formalisation n'a en effet de sens que si l'acquis est capitalisé d'une manière qui permette de l'exploiter par la suite. La capitalisation de la connaissance constitue un « aspect statique » et ne suffit pas, et qu'il faut faire vivre cette connaissance en apportant un « aspect dynamique », c'est-à-dire une transmission de cette connaissance (Pomian, 1996). Cette transmission permet une mise en commun du savoir qui est nommé par (Dieng et al., 1998) sous le terme de « socialisation » du savoir. Il s'agit de transformer une connaissance individuelle en une connaissance collective. Le savoir détenu par quelques individus va être mis en commun et ouvert à d'autres individus.

Notre recherche aura également comme conséquence de structurer et regrouper des connaissances de différentes natures (mesures, inspections visuelles, raisonnement…) en un seul outil ; ceci devrait favoriser leur utilisation et leur diffusion.

Outre une pérennisation des connaissances sous une forme accessible, la formalisation et l'agrégation des connaissances devraient permettre d'unifier les notations des ingénieurs sous réserve d'un accord entre :

- les notes données par plusieurs experts (reproductibilité)[2]
- les notes données par le même expert lorsqu'on lui demande de répéter la même mesure (répétabilité)[3]. ;
- les notes données par un expert et un non-expert à l'issue d'une phase de formation sur la base de la formalisation réalisée.

Ces trois points reposent sur la proposition de méthodes et d'outils qui seront explicités tout au long de ce mémoire.

[2] La reproductibilité est définie par « étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure » (AFNOR, 1994)
[3] La répétabilité est définie par « étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure » » (AFNOR, 1994)

Chapitre 3 - Formaliser et agréger les connaissances

1. Savoir-mesurer et savoir-analyser

Ce paragraphe est dédié à la présentation détaillée des quatre grands types de données disponibles qui seront intégrés dans l'approche :

- les données issues de modèles mécaniques : elles sont obtenues à partir d'un calcul faisant intervenir des mesures d'auscultation en prenant en compte les caractéristiques intrinsèques connues ou supposées de l'ouvrage ;
- les observations visuelles ;
- les mesures d'auscultation acquises à partir des instruments qui équipent le barrage, comme par exemple, les piézomètres, les pendules ;
- les caractéristiques intrinsèques de l'ouvrage liées à sa conception et à sa réalisation.

1.1 Analyse de la littérature

En ce qui concerne les catégories de mesure, une analyse bibliographique montre que ces quatre types de données sont communs dans le domaine du génie civil. Le lecteur trouvera en Annexe 2, un tableau présentant différents travaux faisant appel à tout ou partie de ces données et informations, pour différents ouvrages : ponts, chaussées, réseaux d'assainissement, ouvrages hydrauliques.

Il est à noter que quel que soit l'ouvrage de génie civil, les mesures visuelles sont largement en usage, soit seules, soit en complément de mesures instrumentales, voire d'éléments de conception et réalisation ou spécifications techniques. Les barrages ne font pas exception à la règle puisque l'on considère que les observations visuelles sont à l'origine de la détection de la majorité des anomalies des ouvrages (EDF-CEMAGREF, 1998 ; Poupard et Royet, 2001).

1.2 Caractéristiques des différentes données

Les quatre types de données ont des caractéristiques et des formats très différents :

- mesures globales et mesures ponctuelles : l'inspection visuelle d'un talus aval est globale alors que les mesures de piézométrie sont ponctuelles c'est-à-dire qu'elles mobilisent un VER (Volume Elémentaire Représentatif) faible ;
- mesures avec ou sans remaniement : les mesures visuelles et d'auscultation sont effectuées directement in situ sans remaniement du matériau alors que certains prélèvements pour essais géotechniques peuvent entraîner un remaniement de l'échantillon et donc une modification de ses propriétés ;
- données symboliques et données numériques : les observations visuelles sont exprimées par des symboles ou de manière linguistique (« fissures ouvertes », « exutoire partiellement obstrué ») tandis que les données instrumentales et les données calculées sont numériques ;
- mesures directes et mesures indirectes : la dégradation de la performance de la fonction d'étanchéité peut être évaluée directement par la détection d'altérations sur le masque en béton, par exemple, par la présence de fissures ou par une mesure indirecte constituée par l'augmentation du débit de drainage ;

- mesures temps réel et mesure différée : l'acquisition de mesures instrumentales et la réalisation d'essais ne se font pas sur le même pas de temps… ;
- mesures « brutes » ou mesures « traitées » : les mesures d'auscultation sont prétraitées pour intégrer les perturbations ;
- valeurs absolues et tendance : les experts se servent des valeurs absolues et des évolutions au cours du temps des mesures auscultées ;
- mesures plus ou moins disponibles, précises et certaines : les mesures sont entachées d'imprécision (énoncé approximatif de la connaissance), d'incertitude (doute sur la validité d'une connaissance) et/ou d'incomplétude (absences de connaissances ou connaissances partielles) (Bouchon-Meunier, 1999). Par exemple, certains barrages sont très bien équipés en terme de systèmes de mesure alors que d'autres peuvent en être totalement dépourvus, la précision des instruments de mesure diffère, un capteur peut être en panne depuis un temps donné (donnée censurée)…

1.3 Difficultés posées par la formalisation des différentes données

Les paragraphes suivants font un point sur les difficultés qui sont posées par la formalisation de chacun des types de données.

Les observations visuelles sont réalisées par les experts et les exploitants. Elles se réfèrent aux observations directes et aux inspections vidéo pour certaines parties de l'ouvrage –typiquement, les conduites–. Il est important de souligner que certaines caractéristiques sont très difficiles voire impossibles à évaluer de manière instrumentale comme par exemple, le degré de faïençage d'un masque amont en béton bitumineux, l'état de l'exutoire d'un drain… Comme nous l'avons vu, l'inspection visuelle tient une place prioritaire dans le dispositif de surveillance (EDF-CEMAGREF, 1998) et constitue par conséquent un format de mesure très important pour l'évaluation de la performance de l'ouvrage. La difficulté posée par ce type de mesures est qu'elle est liée, tant qu'elle n'a pas été formalisée, à chaque expert : chacun d'eux a pu en définir les qualificatifs, les mesurer sur une échelle variable…

Les mesures d'auscultation sont acquises à partir des instruments qui équipent le barrage. Elles permettent d'accéder à des mesures qui caractérisent le comportement interne du barrage comme les débits de fuite ou la piézométrie. Ces mesures sont influencées par des paramètres tels que la pluviométrie, le niveau de la retenue… Pour pallier ce problème, un traitement a lieu sur les mesures brutes afin de prendre en compte ces effets avant leur exploitation par les ingénieurs (Bonelli et al., 1998). L'examen des données issues de l'auscultation a pour objectif de déceler des écarts dans le comportement du barrage : le comportement de l'ouvrage est analysé par rapport à une référence qui dépend de l'âge de l'ouvrage, des conditions d'exploitation et de la nature des phénomènes mesurés (Carrère et al., 2000) : pour un barrage en service depuis plusieurs années, la référence est déterminée par le comportement de l'ouvrage dans le passé. La difficulté posée par la formalisation de ce type de données est de savoir analyser les valeurs absolues mais aussi les tendances.

Les caractéristiques de l'ouvrage, présentes dans le dossier de l'ouvrage, à savoir :

- sa géométrie (fruits, largeur de crête…), actualisée en fonction d'éventuelles modifications, rehausse, confortement… ;
- les propriétés des matériaux qui le constituent (épaisseur du masque bitumineux, type de drains…), données actualisées en fonction d'éventuelles modifications, rehausse, confortement… Elles peuvent être déterminées à partir d'essais en laboratoire ou in situ comme par exemple des granulométries ou des essais de détermination de perméabilité ;
- les résistances aux sollicitations : données hydrologiques et hydrauliques (capacité de l'évacuateur de crues), résistance aux séismes ;

- son environnement : fondations, appuis…

La difficulté de formalisation provient ici du fait que les règles de l'art ne sont pas forcément toutes formalisées. Peuvent être associés des problèmes de « qualité » des données : disponibilité (présence ou absence de l'information), incertitude et imprécision liées par exemple à la taille de l'échantillon et son remaniement éventuel avant analyse.

Les données issues de modèles mécaniques sont obtenues à partir de modèles plus ou moins complexes prenant en compte les caractéristiques intrinsèques de l'ouvrage (géométrie d'après les plans de l'ouvrage, caractéristiques des matériaux déterminées par des essais…) et les caractéristiques des milieux extérieurs (niveau de la retenue, intensités des actions) et faisant intervenir des données d'auscultation. Par exemple, la stabilité des barrages en terre est étudiée au moyen des méthodes utilisées plus généralement pour l'étude des pentes en mécanique des sols. Les plus courantes sont celles de Fellenius, Bishop, Spencer, Janbu, méthode des coins, méthode des perturbations (Carrère, 1994). En complément de ces méthodes, les méthodes d'analyse aux éléments finis permettent de calculer les déformations des remblais sous différentes sollicitations, en tenant compte de la rhéologie des matériaux, de l'effet des pressions interstitielles, de la saturation partielle… Les données provenant de modèles mécaniques ne posent a priori pas de difficulté par rapport à une formalisation : les coefficients de sécurité sont définis. Il faut en revanche les traduire sur une échelle compatible avec les autres données et tenir compte du type de modèle utilisé pour l'obtention de ces coefficients : la complexité du modèle et l'adéquation entre les hypothèses du modèle et les données utilisées en entrée du modèle vont jouer sur la « qualité » des coefficients.

1.4 Questions scientifiques

A partir de l'analyse précédente, nous posons les questions scientifiques suivantes :

- peut-on recueillir et formaliser la mesure visuelle utilisée par l'expert de manière à la rendre répétable et reproductible ? Peut-on s'appuyer sur le concept d'indicateur sensoriel développé dans le domaine du génie des procédés ?
- comment gérer les différents formats de mesures utilisés en vue de leur agrégation ?

2. Savoir-agréger

Le savoir-agréger consiste à combiner, sous la forme d'un modèle, les différentes données pertinentes afin d'obtenir (cf. Figure 1) :

- l'évaluation de la performance pour chacune des fonctions et la performance par rapport aux modes de rupture ;
- l'évaluation de la conformité des composants du barrage aux règles de l'art actuelles (critères de conception et réalisation).

Cette double approche a déjà été traitée dans des travaux portant sur les ouvrages d'infiltration des eaux pluviales où ont été également définis des indicateurs liés à la conception et d'autres liés au suivi de l'ouvrage en service (Moura et al., 2006).

2.1 Analyse de la littérature

Des approches mathématiques variées ont été mises en œuvre dans le domaine du génie civil en vue d'obtenir une évaluation de la performance ou de l'état de l'ouvrage sur la base de la combinaison de différentes données. La difficulté posée par l'agrégation des connaissances réside principalement dans le choix du type d'approche, chacune d'elles présentant un certain nombre d'avantages et d'inconvénients.

L'approche par modélisation numérique nécessite pour construire et/ou valider le modèle, de disposer d'une base de données importante, ce qui n'est pas notre cas. Il est également difficile d'intégrer dans le modèle des données de natures aussi différentes que des données numériques issues de l'auscultation et des données provenant de l'inspection visuelle ou du dossier de l'ouvrage. Les auteurs suivants ont développé des approches basées sur des réseaux de neurones : (Cattan et Mohammadi, 1997 ; Kushida *et al.*, 1997 ; Algusair et Al-Qudrah, 1998). Des travaux sont en cours par modélisation numérique (Bonelli et al., 2006) et par approche expérimentale (Benahmed et Bonelli, 2007) sur le mécanisme d'érosion interne dans les ouvrages hydrauliques.

L'approche par opérateurs mathématiques simples (produit, somme, somme pondérée) est attractive car simple à mettre en œuvre. Se posent néanmoins au moins trois problèmes : le choix pertinent de cet opérateur, la paramétrisation de la pondération des différentes entrées du modèle et la normalisation des données. Différents travaux ont utilisé ce type d'approches : (Shahin et Kohn, 1979 ; Bailey *et al.*, 1989 ; Andersen et Torrey, 1995 ; Wang et Liu, 1997 ; Andersen *et al.*, 1999 ; McKay *et al.*, 1999 ; Hahn *et al.*, 2002 ; Shah *et al.*, 2004 ; Gattulli et Chiaramonte, 2005).

L'approche par formalisation des connaissances sur la base d'un recueil auprès d'un groupe d'experts, en particulier sous la forme de règles expertes paraît une approche intéressante et qui a déjà fait ses preuves dans de nombreux autres domaines. Deux démarches cohabitent, la première étant prépondérante :

- recueil et formalisation de l'expertise : (Kaetzel *et al.*, 1994 ; Foo et Akhras, 1995 ; De Brito *et al.*, 1997 ; Abraham *et al.*, 1998 ; Furuta et Hirokane, 1998 ; Obaidat *et al.*, 1998 ; Hahn *et al.*, 1999 ; Hawk, 1999 ; Chiang *et al.*, 2000 ; Miyamoto *et al.*, 2001 ; Herabat et Songchitruksa, 2003) ;
- induction de règles : (Zhao et Chen, 2001).

2.2 Questions scientifiques

Les questions scientifiques auxquelles nous cherchons à répondre ici quant à l'agrégation des connaissances pour l'évaluation de la performance du barrage sont :

- est-il possible de combiner observations visuelles, mesures instrumentales, données de conception et de réalisation et données issues des modèles mécaniques ?
- à partir de cette combinaison, peut-on quantifier, de manière pertinente, performance et conformité aux règles de l'art ? Cette quantification permet-elle de préparer la décision ? Permet-elle de mettre en exergue de nouvelles connaissances concernant le génie civil et actuellement non décrites dans la littérature ?
- quelles méthodes mathématiques employer pour combiner les différents formats de mesure ?
- peut-on extraire un modèle conceptuel utilisable pour tous les modes de rupture ? Ce modèle est-il généralisable à d'autres ouvrages de génie civil ?

Les experts se basent sur leur connaissance des phénomènes pour analyser les barrages. Nous pensons qu'il est important de proposer des outils permettant de capitaliser ces connaissances relatives au domaine applicatif. C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4 – Formaliser les connaissances du domaine

Ce volet du mémoire est consacré au développement d'un outil de type base de connaissances sur les phénomènes de dégradation des ouvrages, en complément à l'outil d'évaluation de la performance.

1. Intérêts d'une base de connaissances

La double proposition d'un outil d'aide à l'évaluation et d'un outil de type base de connaissances s'inscrit dans la lignée de ce que l'on attend des systèmes à base de connaissances. En effet d'après (Studer *et al.*, 1998 ; Jones *et al.*, 2002), tout système à base de connaissances devrait comprendre au moins deux composantes fondamentales : la connaissance pour la résolution des problèmes (ici l'évaluation de la performance) et la connaissance du domaine (ici des connaissances sur les phénomènes de dégradation des barrages). Au-delà de la pertinence théorique de cette réponse, l'existence d'une base de connaissances sur ce domaine a plusieurs intérêts (cf. Figure 2).

Premièrement, elle facilite la communication entre les acteurs de ce champ notamment par la définition d'un vocabulaire commun. Cet outil de communication peut être à usage interne d'un panel d'experts dialoguant sur un même problème mais aussi à usage externe entre un animateur non expert et un groupe d'experts.

Deuxièmement, elle autorise la capitalisation des connaissances et permet de les rassembler en un seul outil, dans un objectif double :

- de formation :
  - ⇒ elle permet par exemple à un utilisateur de trouver la définition d'un phénomène ;
  - ⇒ elle aide à la formation d'un jeune ingénieur par auto-apprentissage ;
- de documentation :
  - ⇒ elle permet alors à un utilisateur de se référer à un barrage qui aurait subi un même phénomène de dégradation pour un diagnostic ou une préconisation d'action corrective ;
  - ⇒ elle autorise la réutilisation des données comme base de traitement statistiques ;
  - ⇒ elle contient des matériaux pour la construction d'un support de cours… : définition des concepts clés, photographies et figures…

Une telle base de connaissances est d'autant plus intéressante qu'elle peut être enrichie en fonction des besoins des utilisateurs ou actualisée à la suite de l'acquisition de nouvelles connaissances.

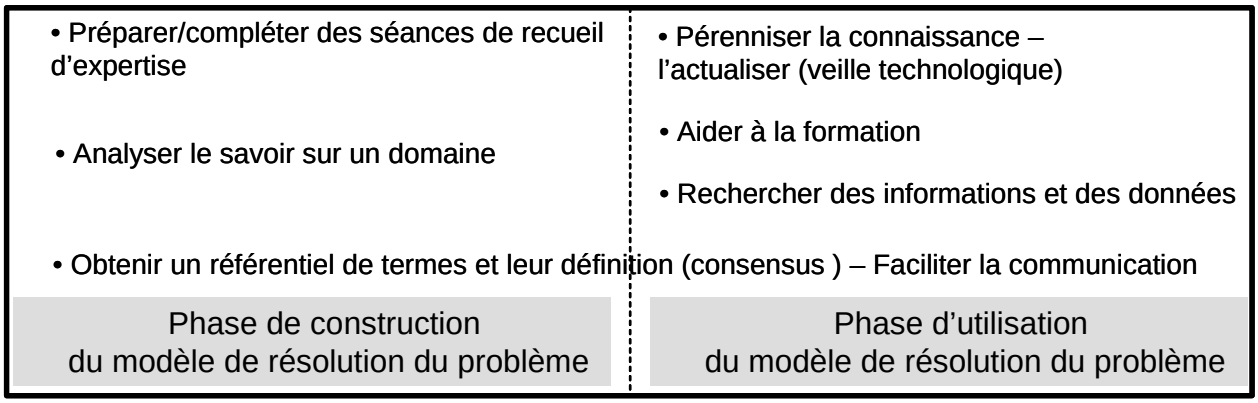


Figure 2 : Intérêt du développement d'une base de connaissances

2. Domaine de la base de connaissances

Dans le domaine du génie civil, des bases de connaissances ou de données ont été élaborées, notamment :

- pour la construction des autoroutes (El-Diraby et Kashif, 2005) ;
- pour le bâtiment (Ekholm, 1996 ; Talon, 2006) ;
- pour les ouvrages hydrauliques : scénarios de vieillissement des barrages (Figeac, 2003 ; Peyras, 2003) et des digues (Serre et al., 2005).

Dans ce mémoire, nous souhaitons développer une base de connaissances qui soit en lien avec l'outil d'évaluation de la performance des barrages. Comme nous l'avons vu plus haut, la perte de performance d'un barrage est fortement liée aux phénomènes de dégradation pouvant se produire durant la période de service de l'ouvrage. Nous orientons par conséquent la base de connaissances autour de ces phénomènes qu'ils concernent la fondation ou les différents composants de l'ouvrage. La base de connaissances porte sur les phénomènes de dégradation de l'ouvrage. Actuellement, les désordres en lien avec les défauts de conception et/ou de réalisation c'est-à-dire le non-respect des règles de l'art ne sont pas traités. Ce champ constitue une perspective à notre travail comme nous le verrons plus loin.

3. Propriétés requises par la base de connaissances

Il est important, dès la construction de la base de connaissances, de penser à son utilisateur futur. C'est ainsi que cinq points nous paraissent essentiels pour la mise en place de cet outil :

- sa structuration : les champs de la base doivent être définis de manière à renseigner l'utilisateur de manière pertinente et sans ambiguïté. Les champs retenus doivent bien décrire le phénomène de vieillissement et réciproquement, les champs essentiels pour décrire le phénomène de vieillissement dans le cadre de l'évaluation de la performance doivent apparaître dans la base (exhaustivité) ;
- sa validité : l'ensemble des champs et de leurs instances doit être consensuel c'est-à-dire avoir reçu l'approbation d'un groupe d'experts ;
- son apport pédagogique : nous pensons que l'utilisation de différents types de formalismes en fonction du champ est intéressante. Ainsi, des descriptions linguistiques seront pertinentes pour fournir des connaissances sur le phénomène tandis que figures et photographies l'illustreront ;

- sa convivialité : l'interface utilisateur doit être prévue afin de rendre conviviale l'utilisation de la base de connaissances. L'introduction de figures et de photographies participe à cet effort. Les textes de présentation sont volontairement courts, avec un renvoi possible à une documentation plus complète accessible par un clic sur l'outil informatique, si l'utilisateur éprouve le besoin d'obtenir des renseignements plus détaillés ;
- son évolutivité : de nouveaux champs doivent pouvoir être intégrés à la base de manière souple.

4. Questions scientifiques

Les éléments présentés ci-dessus amènent les questions scientifiques suivantes à propos du développement d'une base de connaissances :

- quelles méthodes peut-on utiliser pour construire la base de connaissances ?
- quels sont les champs à définir, à quelle granularité faut-il travailler ?
- quels sont les champs génériques pour les familles de barrages ?
- comment valider la base de connaissances ?

Chapitre 5 - Prendre en compte et analyser les imperfections

Les termes de « qualité des informations », « incertitude », « précision »… et plus généralement, d'imperfections des données et des modèles ont été utilisés plusieurs fois pour décrire les connaissances. La prise en compte des imperfections est ainsi un élément essentiel à intégrer dans l'approche développée. Soulignons dès à présent, que cette prise en compte des imperfections des informations est réalisée dans le cadre de l'utilisation du système d'évaluation de la performance du barrage en service et non pas lors de sa conception.

1. Différents types d'imperfections et cahier des charges de leur prise en compte

Les connaissances dont nous disposons sur une situation donnée sont généralement imparfaites. Ces imperfections relèvent de trois grands types (Bouchon-Meunier, 1999 ; Ben Armor et Martel, 2004).

L'imprécision est associée à un énoncé approximatif de la connaissance, une difficulté à l'exprimer clairement soit parce que les données numériques sont mal connues, soit parce que des termes du langage sont utilisés pour qualifier, de façon vague, une caractéristique du système.

L'incertitude exprime un doute sur la validité d'une connaissance. Dans notre cas, nous nous plaçons dans le cadre d'une incertitude épistémique : elle provient d'un manque de connaissances, de données ou d'informations et non d'une variabilité naturelle résultant de phénomènes stochastiques (pluviométrie, température…). Elle se réfère principalement, pour notre étude, au choix de type de modèle ainsi qu'au paramétrage de ce dernier. La nature d'un phénomène considéré peut ne jamais être connue ni comprise parfaitement d'où une incapacité du modèle à représenter le comportement physique véritable du système étudié. Les incertitudes de paramètres reflètent une incapacité d'évaluation précise des valeurs paramétriques des données d'essai ou de calibrage en raison d'un nombre limité d'observations et d'approximations statistiques ou de mesures indirectes.

L'incomplétude qui est l'absence de connaissances ou l'existence de connaissances partielles. Elle peut être due à l'impossibilité d'obtenir certains renseignements (aucune information sur la conception du réseau de drainage dans le dossier du barrage) ou à un problème au moment de la prise de données.

Le Tableau 2 donne quelques exemples de phrases extraites de rapports d'expertise et qui révèlent la présence de différents types d'imperfection lors de l'inspection d'un barrage. Il faut également rajouter des imperfections liées au remaniement des échantillons avant analyse, à la variabilité géométrique des géomatériaux…

Type d'imperfections	Exemples tirés de rapports d'expertise
Imprécision	« cette marche est assez importante et atteint quelques décimètres » « léger tassement des dalles au contact avec la plinthe »
Incertitude	« un ouvrage ancien dont l'historique est mal connu » « digue fondée a priori sur la roche granitique » « la présence de ce trou et l'importante surface du masque recouverte de branchages laissent craindre la présence d'autres trous dans le masque »
Incomplétude	« le barrage n'est équipé d'aucun dispositif d'auscultation » « le système de drainage n'est pas connu » « talus aval partiellement recouvert de végétation empêchant son inspection » « piézomètre défaillant »

Tableau 2 : Exemples d'imperfections sur les informations

La prise en compte des imperfections des entrées du modèle est importante : imposer une notation des indicateurs sous la forme d'une note précise, alors même que des imperfections sont présentes, peut conduire à une note très sévère pour ne pas remettre en question le principe de précaution. Cette notation très sévère a pour conséquence directe la proposition de mise en œuvre d'actions pouvant être plus drastiques qu'elles ne devraient être. Nos travaux actuels visent à intégrer dans le système de notation des indicateurs une prise en compte de ces imperfections. Ceci conduit à avoir une évaluation des indicateurs qui représente mieux la réalité qu'une notation précise. Celle-ci reste bien sûr possible dans la mesure où l'expert dispose de tous les éléments d'information nécessaires à son analyse.

Les différentes formes d'imperfections ne sont pas indépendantes : par exemple, les incomplétudes entraînent des incertitudes et par ailleurs, plus on demande de précision dans un énoncé, moins il est certain. Ainsi, (Boissier, 2000) met en évidence deux arguments souvent conflictuels : la fiabilité de l'information et son « informativité » qui est la quantité d'information contenue dans un signal. Dans cet article, est donné un exemple très illustratif que nous citons ici :

- « la cohésion du sol dans cette couche est de 20 kPa. Cette information est très informative et l'on peut faire des calculs ou prendre des décisions sur cette base, par contre elle est très peu fiable ; en effet en pratique on ne peut pas assurer que le sol a une cohésion de 20 kPa. Tout au plus peut-on dire que la mesure dans telle condition sur tel appareil de tel échantillon provenant de tel prélèvement a donné une valeur que l'on arrondit à 20 kPa ;
- la cohésion du sol dans cette couche est comprise entre 10 kPa et 100 kPa. Cette information est très fiable ; il y a très peu de chance que dans cette même couche de sol, une autre mesure donne une valeur inférieure à 10 kPa mais par contre elle n'est que très peu informative et il est difficile de faire des calculs ou de prendre des décisions sur cette base ».

Le cahier des charges de la prise en compte des imperfections doit répondre à trois contraintes.

La première contrainte est qu'un compromis doit donc être établi entre la fiabilité et l'informativité de l'information afin d'obtenir une donnée la plus fiable et la plus informative possible, alors même que ces deux concepts sont souvent antagonistes.

La deuxième contrainte est qu'un autre compromis doit être trouvé. Il s'agit de préserver les imperfections pour ne pas perdre une information intéressante tout en parvenant à obtenir une représentation facilement manipulable de façon automatique (Bouchon-Meunier, 1999).

Nous rajoutons une troisième contrainte liée au fait que les données manipulées (données issues de l'inspection visuelle, de l'auscultation…) seront fournies par l'utilisateur. Nous visons donc un mode de représentation pertinent et pratique d'usage pour cet utilisateur.

Nous souhaitons donc proposer une approche de prise en compte des imperfections qui réponde au mieux à ces différentes contraintes. Il est alors nécessaire d'identifier une méthode adaptée à notre problème.

2. Méthodes de prise en compte des imperfections

Par prise en compte des imperfections, nous entendons la représentation des imperfections et leur propagation dans les modèles d'évaluation du barrage et l'obtention des scores de performance (données de sortie des modèles).

En fonction du type d'imperfection, imprécision ou incertitude, et de la nature des données disponibles, on se réfère à des méthodes particulières (Ben Armor et Martel, 2004). Dans les paragraphes suivants, nous présentons rapidement les sous-ensembles flous, la théorie des possibilités et la théorie de l'évidence qui nous paraissent être des méthodes a priori pertinentes pour notre application. Les approches probabilistes ne sont pas traitées ici car nous estimons que les variables manipulées par les experts du domaine ne sont que très rarement exprimées sous la forme de variables aléatoires.

2.1 Logique floue et théorie des possibilités

Ces méthodologies ont été initiées en 1965 (Zadeh, 1965) pour la logique floue, puis en 1978 pour la théorie des possibilités (Zadeh, 1978). Elles ont donné lieu à de nombreuses recherches (Dubois et Prade, 1980 ; Bouchon-Meunier, 1999 ; Bouchon-Meunier et Marsala, 2003). Elles sont très pertinentes pour traiter des données symboliques fournies par l'homme et permettent de combiner différents types de mesures, notamment numériques issues de capteurs et symboliques exprimées par un expert (Mauris *et al.*, 1994 ; Curt *et al.*, 2004). La théorie des possibilités permet de traiter les incertitudes et les imprécisions dans un cadre unique (Bouchon-Meunier, 1999).

2.1.1 Expression des imperfections des données d'entrée

Soit X un ensemble de référence. Contrairement à la théorie conventionnelle des ensembles pour laquelle un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble, un sous-ensemble flou est caractérisé par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x de X le degré $\mu_A(x)$ avec lequel x appartient à A ; $\mu_A(x)$ est compris entre 0 et 1 :

$$\mu_A : \begin{array}{l} R \rightarrow [0,1] \\ x \rightarrow \mu_A(x) \end{array} \qquad \text{(Equation 1)}$$

La Figure 3 donne un exemple de sous-ensemble flou normalisé trapézoïdal. Sur cet exemple :

- $\mu_A(3) = 0,5$ ce qui signifie que la valeur 3 appartient au sous-ensemble flou A avec un degré de 0,5 ;
- $\mu_A(4) = 1$ ce qui signifie que la valeur 4 appartient au sous-ensemble flou A avec un degré de 1.

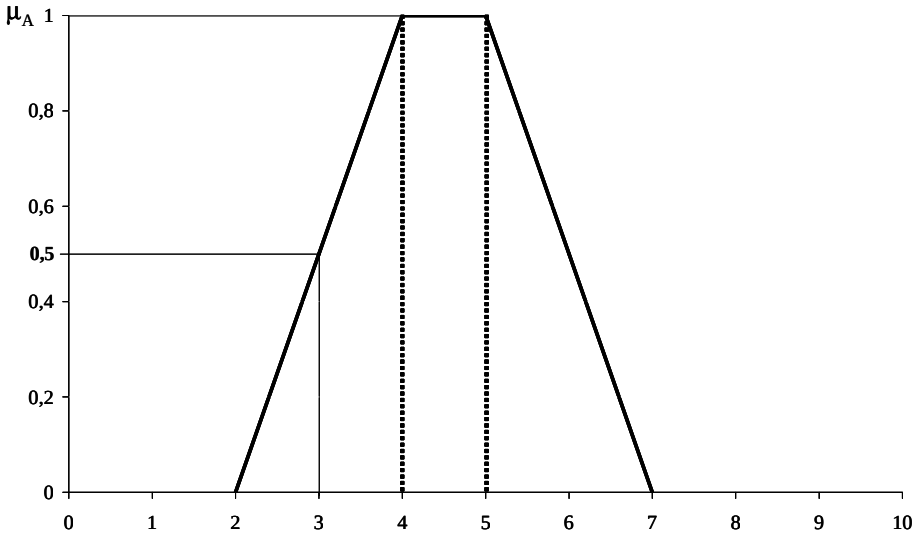


Figure 3 : Exemple de sous-ensemble flou

La théorie des possibilités est liée à la théorie des sous-ensembles flous. Dans cette théorie, chaque variable a une distribution de possibilité associée qui prend la forme d'un sous-ensemble flou normalisé, c'est-à-dire que $\mu(x) = 1$ pour au moins un élément x (cf. Figure 3).

2.1.2 Propagation des imperfections dans le modèle

Afin de réaliser la propagation des imperfections dans le modèle, nous pouvons faire appel :

- à l'arithmétique floue : (Zadeh, 1975) a proposé le principe d'extension pour étendre les opérations entre nombres réels aux opérations correspondantes entre nombres flous (addition, soustraction, produit, quotient, minimum, maximum) ;
- au raisonnement flou permettant d'inférer une réponse à partir de relations R qui lient prémisses et conclusions. Soient E et F deux ensembles flous, l'image de E x F à partir de la relation floue R est un sous-ensemble flou G, obtenu à partir de la règle de composition de Zadeh :

$$R : E \times F \rightarrow G \,. \qquad \text{(Equation 2)}$$

Nous reviendrons plus en détail sur le principe d'extension et la règle de composition de Zadeh dans la Partie 3.

2.1.3 Expression des valeurs de sortie

Lorsque les entrées du modèle sont formulées de manière floue, la sortie est en général un sous-ensemble flou. Or, la décision ne peut se prendre que sur des valeurs précises. Dans ce cadre, il est alors pertinent de mettre en œuvre un processus de défuzzification qui permet de passer d'un sous-ensemble flou à une note précise. Différentes méthodes de défuzzification existent : méthode du centre de gravité, méthodes du maximum (premier maximum, moyenne des maximums)…

2.1.4 Intérêt pour notre application

La théorie des possibilités reflète naturellement le format des informations données par un expert quand il propose (i) un intervalle de valeurs dans lequel il est sûr que la valeur se trouve et (ii) à l'intérieur de cet intervalle des préférences d'intervalles qui lui semblent plus vraisemblables.

Sur la Figure 3, l'utilisateur exprime le fait que les valeurs de la variable peuvent être comprises entre 2 et 7. Sur la même figure, les valeurs les plus vraisemblables appartiennent à l'intervalle [4, 5].

Nous retenons cette démarche bien adaptée dans notre recherche.

La théorie des possibilités et la logique floue ont déjà été utilisées avec succès pour la prise en compte des imperfections, dans le secteur du génie civil (cf. Tableau 3).

Auteurs	**Type d'ouvrages**	**Type d'application**
(Essa et al., 2006)	Bâtiments	Qualité environnementale
(Tesfamariam et al., 2006)	Réseau de distribution d'eau	Capacité structurale
(Sasmal et al., 2006)	Ponts	Performance
(El-Baroudy et Simonovic, 2006)	Système d'alimentation en eau	Performance
(Najjaran et al., 2006)	Système de distribution d'eau	Performance
(Cheng et Ko, 2003)	Analyse instabilité pentes	Performance
(Karnib et al., 2002)	Réseau de collecte pluviale	Evaluation sensibilité des zones urbaines à la défaillance du réseau de collecte
(Revelli et Ridolfi, 2002)	Réseau de distribution d'eau	Analyse du réseau
(Murlidharan et al., 1999)	Bâtiments	Evaluation des dommages après le passage d'un cyclone
(Semaan *et al.*, 1999)	Sol	Reconnaissances des sols
(Boissier et Zatar, 1998)	Bâtiment	Etablissement du plan masse
(Boissier *et al.*, 1998)	Sol	Reconnaissances des sols
(Boissier et Alhajjar, 1997)	Fondations	Fiabilité
(El-Shayeb et Verdel, 1998)	Instabilité de pentes	Détermination de l'aléa de rupture

Tableau 3 : Travaux sur la prise en compte des imperfections dans le domaine du génie civil avec utilisation de la théorie des possibilités ou de la logique floue (liste non exhaustive)

2.2 Théorie de l'évidence

La théorie des croyances ou théorie de l'évidence a été introduite par Dempster en 1967 (Dempster, 1967) puis formalisée par Shafer en 1976 (Shafer, 1976). Elle permet de manipuler des informations entachées d'incertitudes et d'imprécisions et combine, via la règle de fusion définie par Dempster, différentes sources d'information en vue d'une prise de décision.

2.2.1 Expression des imperfections des données d'entrée

Le cadre de discernement Ω est l'ensemble exhaustif et exclusif des états connus du système. Les données d'entrée sont appelées des preuves (A) : il peut s'agir de données exprimées par un expert, d'un résultat de test en laboratoire, de données de retour d'expériences... Elles peuvent se présenter sous différentes formes : valeur précise, intervalle précis ou flou, distributions de probabilité…

A chacune des preuves est attribuée une masse de croyance élémentaire m(A) qui est un nombre compris entre 0 et 1 et qui représente la « crédibilité » de cette preuve. Un point sensible est la détermination des masses de croyance. Des méthodologies d'analyse ont été développées et appliquées aux produits du bâtiment (Lair, 2000 ; Talon, 2006). Elles définissent un ensemble de critères d'évaluation et de méthodes d'agrégation permettant l'obtention de la masse de croyance. Les données d'entrée se présentent donc sous la forme d'un couple (preuve, masse de croyance).

2.2.2 Propagation dans le modèle

La fusion de Dempster-Shafer permet la combinaison de plusieurs preuves issues de sources d'informations distinctes dans un même cadre de discernement. Le raisonnement porte sur l'ensemble des sous-ensembles de Ω.

Afin de simplifier la présentation, présentons un exemple. Nous considérons la variable « Végétation sur le remblai aval » évaluée visuellement par deux experts E1 et E2. Nous avons ainsi deux preuves P_{E1} et P_{E2} pointant vers deux ensembles A1 et A2 de masse de croyance m_{A1} et m_{A2}.

Deux situations se présentent : $A1 \cap A2 \neq \varnothing$ et $A1 \cap A2 = \varnothing$.

Si $A1 \cap A2 \neq \varnothing$, les preuves sont concordantes : les experts sont en accord sur au moins une partie de leur évaluation. Le Tableau 4 présente l'affectation des masses en fonction des ensembles et le résultat de la fusion.

	m(A1)	**m(** $A1 \cap A2$ **)**	**m(A2)**	**Ignorance ([0, 10])**
P_{E1}	m_{A1}	m_{A1}	$1 - m_{A1}$	$1 - m_{A1}$
P_{E2}	$1 – m_{A2}$	m_{A2}	m_{A2}	$1 – m_{A2}$
Consensus	$m_{A1} \times (1 – m_{A2})$	$m_{A1} \times m_{A2}$	$m_{A2} \times (1 – m_{A1})$	$(1 - m_{A1}) \times (1 – m_{A2})$

Tableau 4 : Fusion de deux preuves dans le cas où les preuves sont concordantes

A titre d'exemple illustratif, supposons :

- que les experts ont par exemple fourni pour E1, l'intervalle A1 = [5, 7] et pour E2, l'intervalle A2 = [6, 8] sur une échelle [0, 10] ;
- que nous affectons les masses de croyance suivantes : $m_{A1} = 0,9$ à E1 et $m_{A2} = 0,7$ à E2. Ceci signifie que E1 est plus « crédible » que E2 : E1 est plus expérimenté ou plus compétent dans le domaine.

La fusion des preuves donne :

- m([5, 7]) = 0,27
- m([6, 7]) = 0,63
- m([6, 8]) = 0,07
- m([0, 10]) = 0,03

La somme des quatre masses du consensus est égale à 1.

Si $A1 \cap A2 = \varnothing$, les preuves sont conflictuelles. Le Tableau précédent devient (cf. Tableau 5) :

	m(A1)	**m(A2)**	**Ignorance ([0, 10])**
P_{E1}	m_{A1}	$1 - m_{A1}$	$1 - m_{A1}$
P_{E2}	$1 – m_{A2}$	m_{A2}	$1 – m_{A2}$
Consensus	$m_{A1} \times (1 – m_{A2})$	$m_{A2} \times (1 – m_{A1})$	$(1 - m_{A1}) \times (1 – m_{A2})$

Tableau 5 : Fusion de deux preuves dans le cas où les preuves sont conflictuelles

Dans ce cas, la somme des masses du consensus n'est pas égale à 1 mais à (1 - m_{A1} x m_{A2}). La règle de Dempster répartit la masse conflictuelle proportionnellement sur les trois autres masses. Les masses deviennent alors :

$$m(A1) = \frac{1}{1 - m_{A1} m_{A2}} m_{A1}(1 - m_{A2}) \qquad \text{(Equation 3)}$$

$$m(A2) = \frac{1}{1 - m_{A1} m_{A2}} m_{A2}(1 - m_{A1}) \qquad \text{(Equation 4)}$$

$$m(\text{Ignorance}) = \frac{1}{1 - m_{A1} m_{A2}} (1 - m_{A1})(1 - m_{A2}) \qquad \text{(Equation 5)}$$

Traitons un exemple et supposons que E1 a évalué la végétation sur le parement aval par l'intervalle [4, 5] et E2 par l'intervalle [6, 9]. Les masses résultats sont alors :

- m([4, 5]) = 0,73
- m([6, 9)] = 0,19
- m([0, 10]) = 0,08

L'application de la règle de fusion reste très simple même si les sources d'informations sont nombreuses. C'est là l'un des avantages de cette théorie qui autorise un nombre théorique illimité de sources d'informations à condition qu'elles soient indépendantes. L'augmentation de la cardinalité du cadre de discernement introduit toutefois une forte augmentation du nombre de calculs.

2.2.3 Expression des valeurs de sortie

Les valeurs de sortie font généralement appel à deux quantités :

- la croyance d'un événement qui est la « somme » des preuves en faveur de l'occurrence d'un événement A [Bel(A)] :

  $$Bel(A) = \sum_{B_i \subseteq A} m(B_i) \qquad \text{(Equation 6)}$$

  Pour calculer la croyance de l'hypothèse A, il faut donc effectuer la somme de toutes les propositions B qui sont strictement incluses dans A ;

- la plausibilité d'un événement [Pl(A)] peut être définie de 2 manières différentes :

  $\Rightarrow$ soit par la fonction de croyance de l'événement contraire à A, noté A^c :

  $\Rightarrow Pl = 1 - Cr(A^c)$ (Equation 7)

  $\Rightarrow$ soit par rapport à la fonction de masse qui correspond à la définition originale de Dempster :

  $$\Rightarrow Pl(A) = \sum_{A \cap B_i \neq \varnothing} m(B_i) \qquad \text{(Equation 8)}$$

Une courbe de consensus des masses de croyance qui résulte de la fusion peut être tracée (Lair, 2000). Elle est définie par :

$$C_f(A) = \sum_{A \in B_i} m(B_i) \qquad \text{(Equation 9)}$$

La théorie de l'évidence considère donc ce qui est connu et ce qui reste inconnu. La prise de décision est une étape difficile qui a fait et fait toujours l'objet de nombreux débats. Parmi les règles les plus souvent retenues, on peut citer :

- le maximum de crédibilité : la prise de décision est totalement non risquée mais sous-estime de fait l'appartenance à une classe donnée dans la mesure où elle ne retient que les cas pour lesquels il n'y a pas d'incertitude ;
- le maximum de plausibilité : la prise de décision est très risquée car elle retient la limite supérieure de l'intervalle de vraisemblance incluant tous les cas incertains ;
- la probabilité pignistique : c'est une mesure de probabilité subjective qui se trouverait entre la mesure de crédibilité et de plausibilité. Elle s'exprime par :

  $$\forall A \in \Omega, P\{A\} = \sum_{B_i \subseteq \Omega | A \in B_i} \frac{1}{|B_i|} m(B_i) \qquad \text{(Equation 10)}$$

  où $|B_i|$ représente la cardinalité de B_i. Elle offre un compromis intéressant entre la croyance et la plausibilité ;
- la données consensuelle : cette donnée est obtenue à partir de la courbe consensus $C_f(A)$: il s'agit de la donnée regroupant le maximum de consensus.

2.2.4 Intérêt pour notre application

La théorie de l'évidence est particulièrement intéressante dans la mesure où une même variable peut être obtenue par différentes sources, donc pour réaliser de l'unification de données. Nous nous trouvons dans cette situation si plusieurs experts donnent une note à un même indicateur. Ceci se produit en phase de conception de l'outil où nous faisons noter le même dossier par plusieurs experts afin de vérifier l'homogénéité du groupe. Nous emploierons ainsi, à titre de recherche, la théorie de l'évidence afin de combiner les notes données par plusieurs experts.

Très généralement, chaque barrage est expertisé par un seul expert (un deuxième expert relit le rapport mais ne réalise pas en pratique la notation). Donc, en phase d'utilisation, nous n'avons à notre disposition qu'une seule source d'informations. Toutefois dans le cadre d'expertises collectives, la combinaison des notes par la théorie de l'évidence pourra être mise en œuvre.

3. Analyse des imperfections des données d'entrée

Au-delà de cette démarche de représentation et de propagation des imperfections des données d'entrée du modèle, nous souhaitons dégager les raisons qui font que l'expert fournira une représentation imprécise plutôt que précise pour un certain nombre d'indicateurs. Il est en effet pertinent d'analyser les sources des imperfections c'est-à-dire d'identifier et d'expliciter leurs origines (localisation non optimale d'un piézomètre, impossibilité d'inspecter tout le parement aval de manière détaillée…). Cette phase d'identification permet de dégager des caractéristiques de qualité des données pouvant être alors quantifiées par la définition d'une échelle de notation.

Cette analyse des imperfections nous paraît intéressante à deux points de vue.

D'une part, elle est une voie pour comprendre le format de représentation des imperfections adopté par les experts. Ceci est très important si l'on souhaite pouvoir transmettre ce savoir à de nouveaux ingénieurs qui seraient amenés à conduire des expertises. En effet, la détermination du type de la distribution de possibilité (par exemple un trapèze) et le paramétrage de cette forme (valeurs possibles = [2, 7] et valeurs vraisemblables = [4, 5]) sont faits par l'expert sur la base des imperfections qui entachent les données.

D'autre part, elle constitue une aide pour déterminer à terme pour un barrage donné des actions de correction de ces facteurs d'imperfections : par exemple, déplacer un capteur mal positionné ou réaliser des essais géotechniques car ces données sont absentes dans le dossier du barrage.

Concernant la qualité des données, des travaux sont menés depuis quelques années sur l'évaluation de la qualité des données pour les produits du bâtiment. Initiés dans la thèse de Jérôme Lair (Lair, 2000), ils ont été complétés dans la thèse d'Aurélie Talon (Talon, 2006). Ils s'inspirent de la méthode NUSAP (Numerical Unit Spread Assessment Pedigree) développée par Funtowicz et Ravetz (1990). Ils consistent à :

- identifier des critères d'évaluation de la qualité des données. Les critères sont par exemple (Talon, 2006) :

  ⇒ « modélisation » : fonction de la technique de recueil d'information (théorie corroborée, modèle hypothétique, étude statistique, étude expérimentale) utilisée pour obtenir la donnée ;

  ⇒ « source » : confiance que la communauté scientifique accorde à la donnée ;

  ⇒ « censure des données » : une donnée est considérée plus fiable si elle n'est pas censurée et une donnée censurée est plus fiable qu'une donnée dont la notion de censure n'a pas été prise en compte (ou dont on ignore si elle a été étudiée) ;

- fournir une grille d'estimation de chacun de ces critères :

  ⇒ pour le critère « modélisation », la grille comporte les valeurs « théorie corroborée », « théorie non corroborée », « étude statistique », « non modélisée » ;

  ⇒ pour le critère « source », les valeurs sont « référencée », « interne », « conférence », « isolée » ;

- agréger les évaluations de chacun des critères afin d'obtenir une masse de croyance.

Dans le cas qui nous intéresse, la qualité des données va fortement dépendre, en particulier pour les mesures instrumentales (auscultation, essais), de dégradations ou de défaillances du système de mesure (instruments) puis du système de traitement des mesures (logiciels). Cet aspect là n'est pas pris en compte dans les recherches que nous venons de citer. Par contre, des travaux ont été menés sur l'analyse des dégradations et des défaillances d'ouvrages du génie civil en utilisant les méthodes d'analyse du risque du type analyse structurelle, analyse fonctionnelle et AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) (Lair, 2000 ; Peyras, 2003 ; Serre, 2005 ; Talon, 2006). Ces méthodologies offrent un cadre intéressant pour réaliser l'analyse des sources d'imperfections dues à des défaillances ou des dégradations du système de mesure ou de traitement des données.

4. Questions scientifiques

Les questions scientifiques que nous proposons sur la thématique de prise en compte des imperfections sont :

- peut-on identifier les sources d'imperfections ?
- peut-on affecter une note de « qualité » aux données ? Cette note peut-elle permettre de mettre en œuvre des actions de correction des imperfections ?
- comment prendre en compte et propager les imperfections dans le modèle ?
- sous quelle forme doit-on fournir le résultat ?

Chapitre 6 – Conclusion : définition de la problématique de la thèse

La problématique de la thèse est donc de proposer une méthode d'évaluation de la performance d'un ouvrage par formalisation et agrégation de connaissances, à partir d'une approche guidée par l'expertise. Il faut extraire, structurer, formaliser, obtenir un consensus et rendre opérationnelle la connaissance issue de multiples sources : littérature, savoir-faire, retour d'expériences, données d'auscultation, informations de conception et réalisation, données issues de modèles... Cette démarche nécessite un travail de recueil et d'analyse impliquant fortement des experts, ici ceux de l'équipe Secure du Cemagref d'Aix-en-Provence.

La Figure 4 reprend les questions qui sous-tendent la recherche et qui sont traitées dans la Partie suivante. Nous visons à proposer des méthodologies pour :

- la formalisation des connaissances et leur agrégation ;
- l'analyse des imperfections qui entachent les données d'entrée des modèles ;
- la prise en compte et la propagation de ces imperfections ;
- le développement d'une base de connaissances

Ces méthodologies sont accompagnées d'outils à visée industrielle :

- un outil d'aide à l'évaluation de la performance et de la conformité des barrages, avec une prise en compte des imperfections ;
- un système de traçabilité des données permettant de constituer une base de données de suivi des ouvrages ;
- une base de connaissances sur les phénomènes de dégradation des barrages.

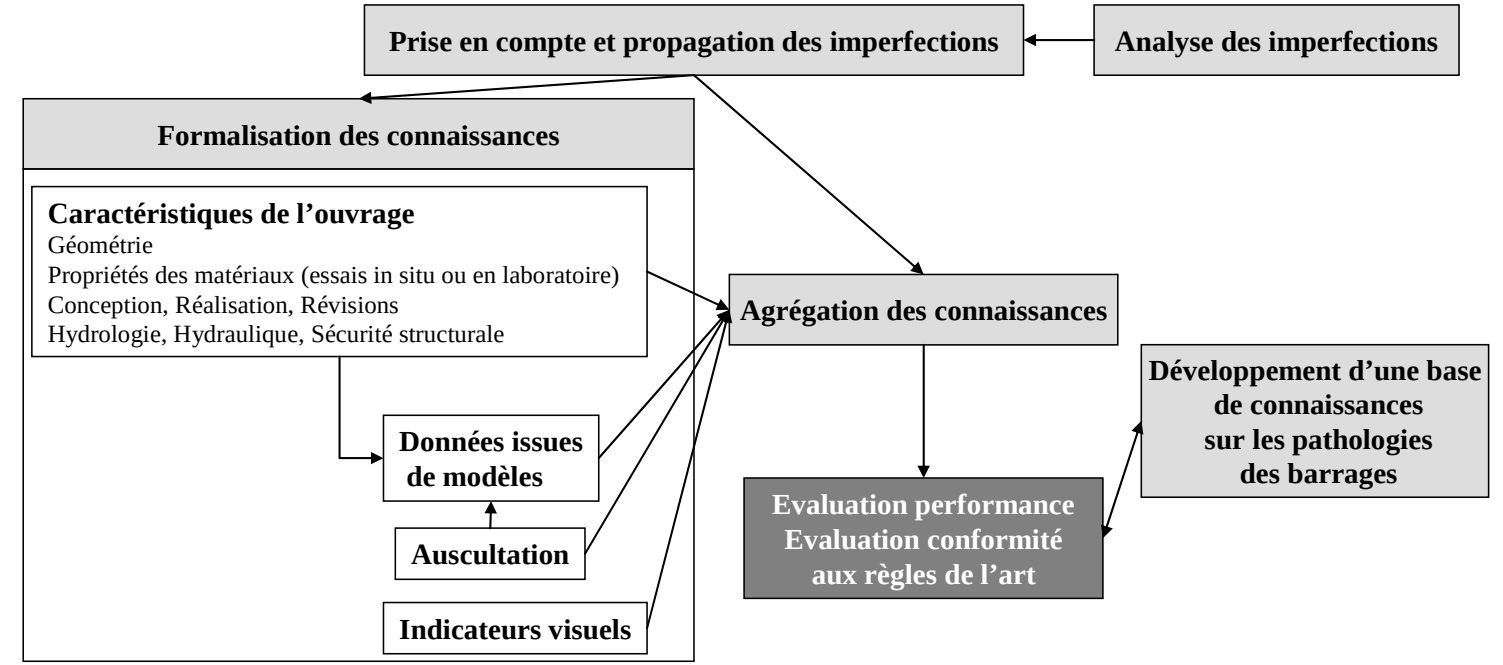


Figure 4 : Problématique de la thèse

Partie 2
Méthodologies d'évaluation de la performance des barrages et de capitalisation des connaissances du domaine

Chapitre 1 - Evaluation déterministe de la performance des barrages

Chapitre 2 – Formalisation des connaissances du domaine

Chapitre 3 – Analyse et prise en compte des imperfections dans l'évaluation de la performance

L'évaluation de la performance d'un barrage passe par l'utilisation raisonnée de plusieurs types de connaissances et de données. Nous proposons dans ce chapitre un ensemble de méthodologies. Nous présentons tout d'abord une méthodologie d'évaluation déterministe de la performance du barrage basée sur la formalisation et l'agrégation de connaissances. Le Chapitre 2 est dédié à la méthodologie de développement d'une base de connaissances sur les phénomènes de dégradation des barrages. Le Chapitre 3, quant à lui, porte sur l'analyse et la prise en compte des imperfections dans l'évaluation de la performance.

Chapitre 1 - Evaluation déterministe de la performance des barrages

1. Problème posé et domaine d'application

1.1 Problème posé

Le problème posé est de fournir, à un instant t, une évaluation de la performance du barrage. Il s'agit, à partir de données recueillies sur l'ouvrage, de formaliser ces données puis de les agréger afin de déterminer la performance et la conformité aux règles de l'art (cf. Figure 5).

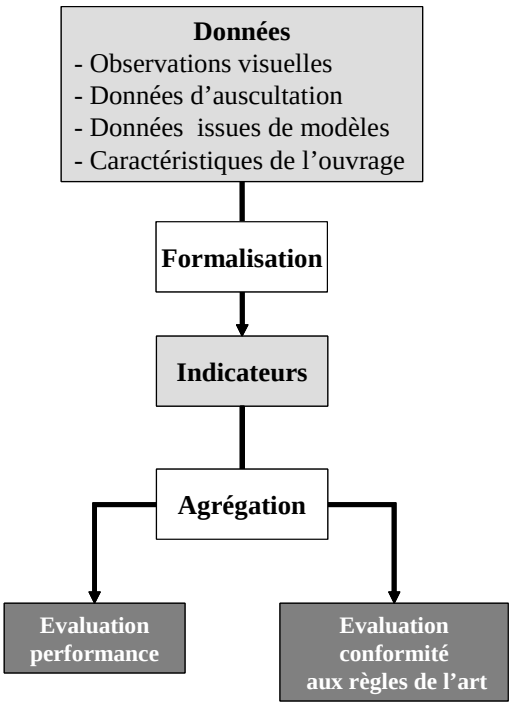


Figure 5 : Formalisation et agrégation pour la détermination de la performance et de la conformité aux règles de l'art

Pour ce faire, nous proposons une approche en trois grandes phases (cf. Figure 6) :

- le recueil et la formalisation des connaissances ;
- leur agrégation ;
- la validation du modèle obtenu.

La démarche est conduite successivement pour chacun des modes de rupture concernant la catégorie de barrages étudiée.

Deux types de résultats opérationnels sont prévus dans le cadre de notre étude (cf. Figure 6) :

- un outil d'aide à l'évaluation de la performance des barrages qui correspond, au-delà des aspects d'aide à la décision, à une capitalisation des connaissances que possèdent, utilisent et agencent les experts ;
- une base de données de suivi des barrages qui, quant à elle, répond à un besoin de traçabilité et de capitalisation des données.

Actuellement, pour ce qui concerne les barrages sous le contrôle du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, aucun de ces outils n'est disponible.

Ces outils demeurent destinés aux ingénieurs experts du domaine. Dans un premier temps, l'exploitation sera interne c'est-à-dire destinée aux ingénieurs du Cemagref. Dans un second temps, après avoir testé la robustesse du système sur différents cas réels, l'exploitation pourrait devenir externe et être partagée avec des ingénieurs de bureaux d'études.

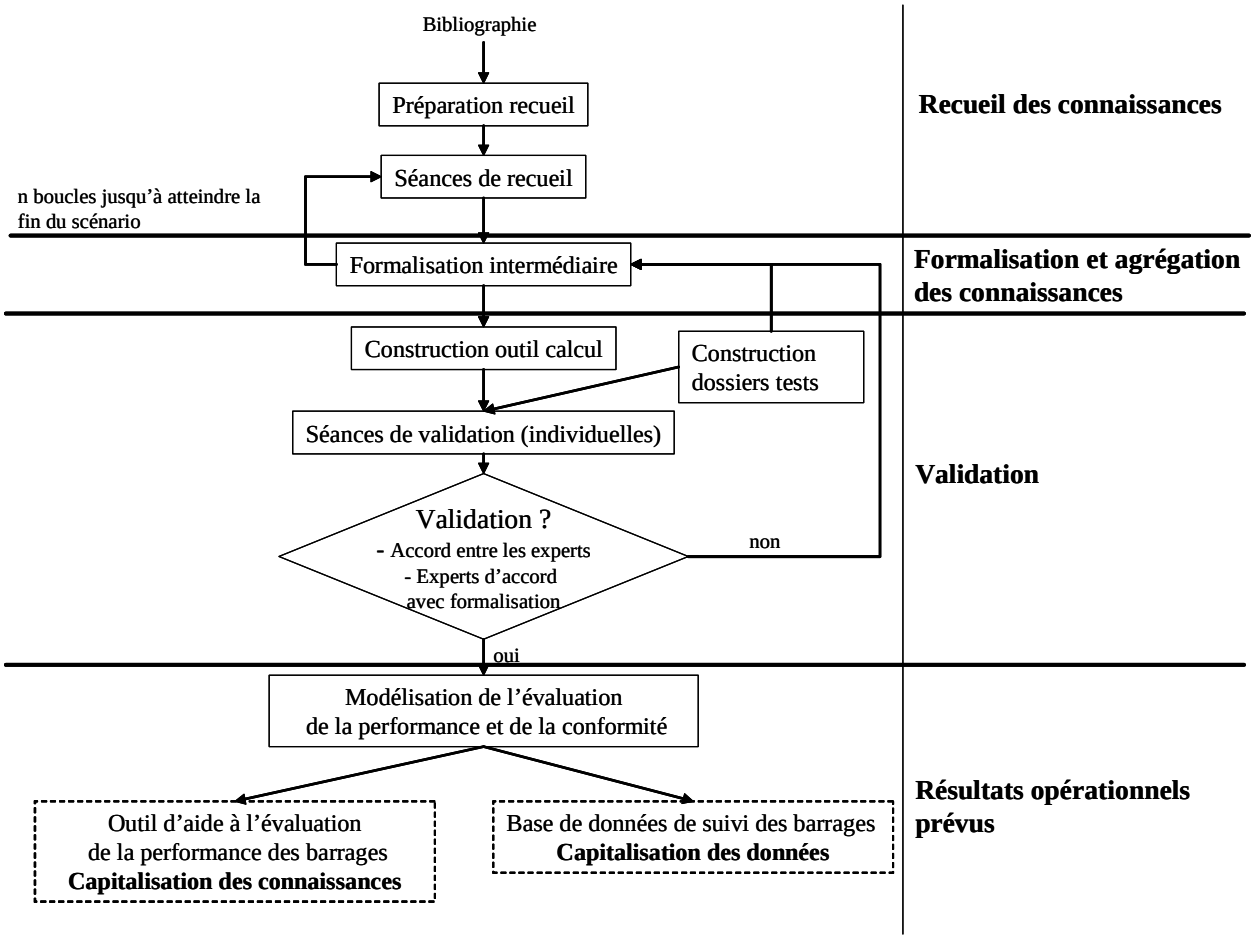


Figure 6 : Organigramme de la méthode pour chaque scénario

1.2 Domaine d'application

La démarche est ici appliquée sur les barrages en remblai. Nous distinguons :

- les barrages à étanchéité interne

  ⇒ soit d'un massif de terre homogène (barrage homogène) ;

⇒ soit de deux remblais perméables appelés recharges qui encadrent un élément d'étanchéité (noyau imperméable, paroi moulée…) et qui assurent par leur masse la stabilité de l'ensemble (barrage à zones) ;

- les barrages à étanchéité amont qui présentent un masque amont (masque réalisé en ciment, en béton bitumineux, constitué d'une géomembrane…).

Ces barrages peuvent être construits sur des fondations meubles ou sur des fondations rocheuses.

Les barrages sont équipés de plusieurs systèmes qui agissent directement sur le fonctionnement de l'ouvrage en permettant de réguler les flux hydrauliques au droit de ce dernier. On distinguera ainsi :

- les ouvrages de prise d'eau et de vidange ;
- les évacuateurs de crues conçus pour évacuer un surplus d'eau provenant d'une crue et éviter ainsi une surverse, pouvant être très préjudiciable pour les barrages en remblai ;
- le système de drainage permettant d'évacuer les eaux d'infiltrations provenant d'une percolation naturelle ou au contraire accidentelle de l'eau dans l'ouvrage. Des filtres constitués de couches successives de matériaux de granulométrie donnée, doivent être disposés autour des drains afin d'éviter le colmatage de ces derniers.

Pour chacun de ces systèmes, différents types existent :

- pour les évacuateurs de crues : évacuateur frontal, évacuateur latéral, évacuateur tulipe, évacuateur vanné ou non vanné ;
- pour le système de drainage : drain cheminée, drain tapis…

La Figure 7 présente différents types de barrages en remblai.

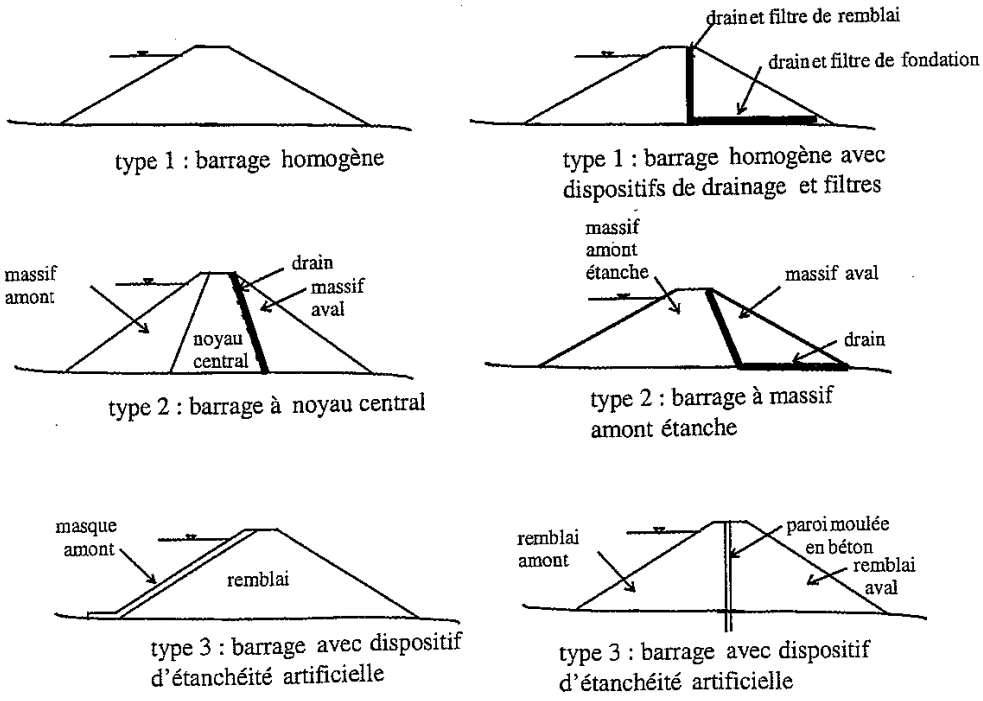


Figure 7: Différents types de barrages en remblai (extrait de Peyras (2003))

Les barrages auxquels nous nous intéressons ont divers usages : l'irrigation, la consommation d'eau, le tourisme (plan d'eau à usage touristique, bassins d'altitude pour la production de neige de culture), l'écrêtage de crues, le soutien des étiages.

Les paragraphes suivants vont présenter plus en détail chacune des phases de la méthodologie.

2. Construction du modèle d'évaluation déterministe de la performance

2.1 Recueil des connaissances

Le cœur de la méthode est constitué par des séances de recueil et formalisation des connaissances auprès d'un groupe d'experts. Ce sont des connaissances théoriques et des connaissances heuristiques développées par les ingénieurs lors de leurs expertises sur le terrain. Ceci renvoie aux savoirs et savoir-faire présentés dans la Partie 1.

2.1.1 Préparation du recueil

La phase de préparation des séances de recueil est importante : elle permet à l'animateur[4] des séances de recueil de se familiariser avec la terminologie du domaine des barrages et de comprendre les différents phénomènes se déroulant pendant la vie d'un ouvrage ainsi que leur enchaînement. Cet apprentissage facilite l'instauration du dialogue avec les experts tout comme la préparation des documents supports qui seront employés pendant les séances et des questions qui y seront posées. En outre, une préparation poussée de la séance permet de gagner en efficacité et donc en temps, ressource souvent très précieuse, d'autant plus pour des experts.

La préparation des séances est guidée par l'objectif à atteindre en fin de formalisation : la modélisation de l'évaluation de la performance des barrages par rapport aux différents modes de rupture. Il s'agit donc d'établir un modèle qui, à partir d'un certain nombre de variables d'entrée, va fournir une ou plusieurs variables de sortie. En préalable, il est essentiel de définir les éléments visant à cadrer le modèle et à le placer au niveau d'abstraction le plus pertinent c'est-à-dire correspondant au mode d'analyse des experts, ce qui facilite le travail pendant les séances :

- la granularité : nous considérons séparément le remblai proprement dit et les fondations. Pour chacune de ces structures, nous traitons les différents systèmes (étanchéité, drainage…) et sous-systèmes (drain vertical, drain horizontal…) ;
- le type de remblai ou de fondation : sont analysés séparément les barrages à étanchéité amont et les barrages à étanchéité interne, les fondations rocheuses et les fondations meubles ;
- les modes de rupture à traiter ;

Une fois ces éléments déterminés, il est possible de débuter la construction du modèle. Des travaux antérieurs menés dans l'équipe SECURE ont permis d'établir des modèles fonctionnels génériques des mécanismes de vieillissement des barrages, à partir de trois variables : symptômes, phénomènes et fonctions (Peyras et al., 2006). La Figure 8 donne un exemple de graphe orienté appliqué aux barrages poids. Ces modèles, de nature qualitative, vont servir de structure de départ pour l'agrégation des connaissances. Le modèle est ensuite affiné et adapté au cours des séances de recueil avec le groupe d'experts. Nous nous proposons, dans ce travail, de mettre en place une approche permettant une évaluation de la performance en partant de ce modèle fonctionnel.

[4] L'animateur des séances est le rédacteur de cette thèse

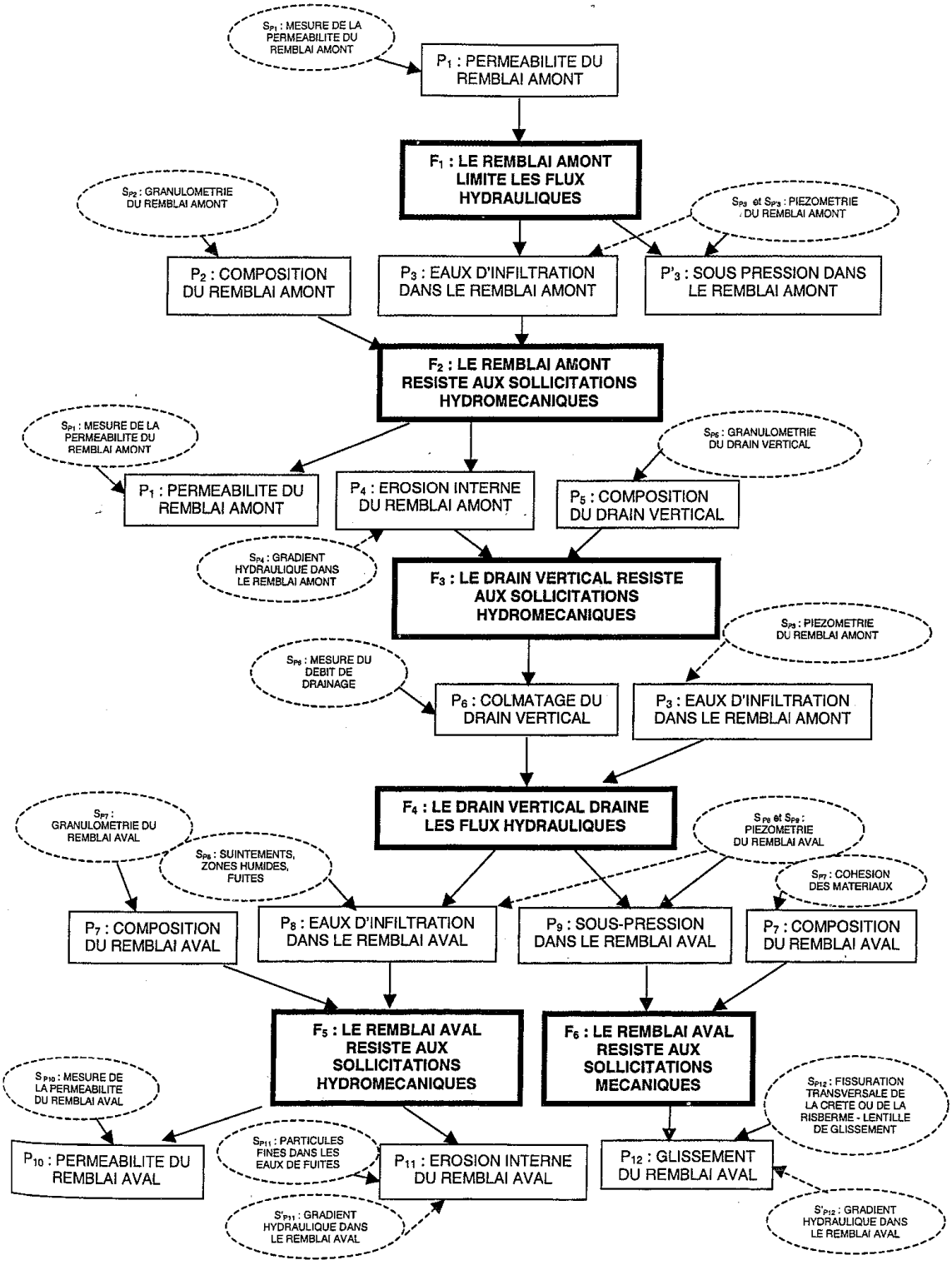


Figure 8 : Exemple de graphe orienté du scénario de suffusion dans un barrage en remblai avec drain vertical (extrait de Peyras (2003))

2.1.2 Diagramme support du recueil

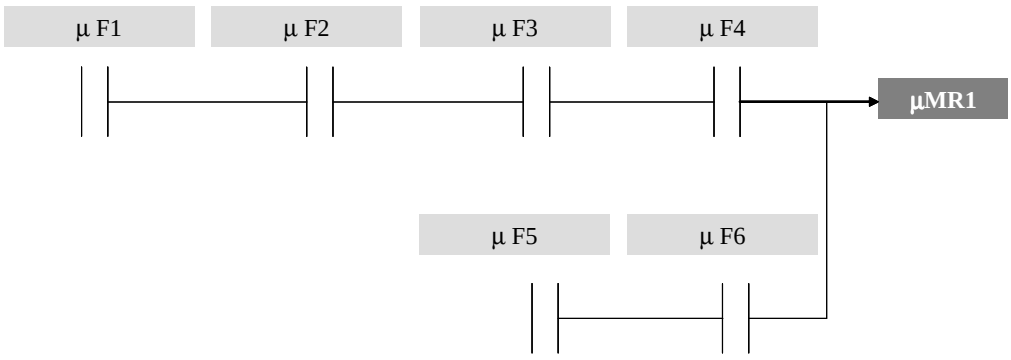
Nous avons repris sous un autre format et avec une structuration différente, les graphes orientés qui décrivent les principaux scénarios de vieillissement des barrages en remblai (Figeac, 2003), en intégrant des informations issues de (Royet, 1994 ; Foster *et al.*, 2000a). Deux raisons principales justifient ces modifications.

Premièrement, les graphes orientés décrivent des scénarios de vieillissement tandis que nous nous concentrons dans notre approche sur la performance du barrage vis-à-vis de différents modes de rupture. Il est donc nécessaire de procéder à des regroupements : par exemple, le vieillissement du masque amont décrit comme un graphe orienté à part entière est directement intégré dans le schéma décrivant les mécanismes d'érosion interne et de glissement qu'il influence.

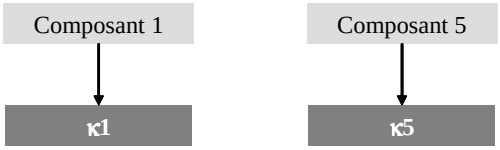
Deuxièmement, afin de simplifier la représentation, sur les documents supports aux interviews ne sont conservées des graphes orientés que les fonctions et leur combinaison : nous avons choisi de faire cette représentation sous la forme de diagrammes série et parallèle comme support d'interview lors des séances. Les enchaînements en série constituent des « ET » logiques et les enchaînements en parallèle des « OU » logiques. Nous notons :

- μ_{Fi}, la performance de la fonction i ;
- μ_{MRj} la performance vis-à-vis du mode de rupture MRj ;
- κ_k la conformité aux règles de l'art du composant k.

Sur la Figure 9, la performance vis-à-vis du mode de rupture 1 est directement liée à la performance de la fonction 1 et de la fonction 2 et de la fonction 3 et de la fonction 4 ou à la performance de la fonction 5 et de la fonction 6. Sur la Figure 9 ne sont représentées que deux branches parallèles, mais d'autres branches peuvent bien en entendu être greffées si nécessaire. Au cours des séances sont également déterminées les conformités des différents composants du système impliqués dans un mode de rupture donné.



(a)



(b)

Figure 9 : Diagramme équivalent électrique support des séances de recueil et formalisation / Performance - Conformité aux règles de l'art

Nous avons représenté notre problème sous la forme d'enchaînement logique (ET / OU) car ce format se prête bien à notre problème : un mode de rupture est, en général, lié à la défaillance de plusieurs fonctions ce qui est traduit par un ET logique. Pour des systèmes plus complexes, ce type de représentation n'est pas forcément adapté.

Une fois les diagrammes établis, il s'agit de valider ces enchaînements avec les experts : ceci constitue concrètement le début du recueil et de la formalisation des connaissances.

2.1.3 Séances de recueil

Nous avons adopté un mode de recueil sous la forme d'interviews guidées c'est-à-dire d'échanges entre les experts et la personne chargée du recueil, sur la base d'une liste de schémas et de questions qu'elle aura préparés au préalable, notamment les diagrammes série et parallèle.

La technique d'interviews guidées est l'une des plus utilisées pour l'élicitation de la connaissance (Wagner et al., 2001) ; elle privilégie les points d'entrée naturels, le contact humain, s'adapte aux profils (en retrait, bavard…)…

Ces séances sont suivies de formalisations menées par la personne chargée du recueil puis vérifiées par le groupe d'experts, lors de la séance suivante. C'est ainsi que pour modéliser la performance vis-à-vis d'un mode de rupture donné, plusieurs séances de recueil et de formalisations intermédiaires s'enchaînent (cf. Figure 6).

Les deux paragraphes suivants traitent pour le premier, de la formalisation des entrées du modèle appelées « indicateurs » et pour le second, de leur agrégation. Ces paragraphes renvoient à la phase de formalisation et d'agrégation des connaissances annoncée sur la Figure 6.

2.2 Formalisation des indicateurs

2.2.1 Identification des indicateurs

Les variables d'entrée du modèle sont toutes les données que l'expert utilise pour évaluer la performance : observations visuelles, mesures issues de l'auscultation, données issues de modèles mécaniques et données et informations provenant du dossier du barrage (éléments de conception, réalisation, confortement…).

Dans un premier temps, il s'agit d'identifier ces différentes données et de les nommer. En général, les experts leur ont affecté un nom : il est intéressant de conserver ces appellations afin de rendre l'utilisation future du système plus facile. Par exemple, on peut citer « Présence de fuites d'eau chargée », « Evolution du débit », « Présence de végétation sur le remblai aval », « Règles de filtre »…

Dans notre étude, nous ne nous sommes pas heurtés à des problèmes d'homogénéité de vocabulaire, les experts du groupe étant « de la même école », certains d'entre eux ayant formé les autres. Dans l'hypothèse où des problèmes de vocabulaire se présenteraient, une discussion devrait bien sûr avoir lieu afin de parvenir à un glossaire qui soit un compromis qui satisfasse l'ensemble du groupe.

2.2.2 Structuration des indicateurs

Une fois l'identification menée à bien, l'étape suivante consiste à proposer un format de description pour chacune des variables, à partir du concept d'indicateur sensoriel développé dans le cadre du génie des procédés (Curt et al., 2001). Nous appelons « indicateur » toute variable formalisée selon la grille définie ci-après (cf. Tableau 6).

L'objectif de la formalisation est d'obtenir une description non ambiguë des mesures et évaluations.

Nous proposons de conserver l'ensemble des champs définis dans le cadre du génie des procédés : nom, définition, échelle avec références (photos, schémas, descriptions linguistiques, valeurs numériques), caractéristiques d'espace (échantillonnage, lieu de la mesure), caractéristique de temps (fréquence de la mesure, fréquence de l'analyse de la tendance des mesures). Une différence réside cependant entre les deux domaines : dans les applications que nous avons menées en génie des procédés, la caractéristique temporelle était uniquement liée au moment de la mesure (fréquence de la mesure pour le génie civil). Dans le cas du génie civil, la caractéristique temporelle comporte également des informations sur la fréquence de l'analyse des données : ceci est principalement lié aux différences de pas de temps entre les deux domaines.

Dans l'exemple des barrages, nous avons affaire à différentes natures de variables, comme précisé au début de ce chapitre. La grille de formalisation présentée au Tableau 6 est valide pour l'ensemble de ces variables.

Nom	Définition	Echelle et références	Caractéristique temporelle	Caractéristique spatiale

Tableau 6 : Grille de formalisation des indicateurs

Penchons-nous à présent plus en détail sur quatre de ces champs : échelles, références, caractéristique temporelle et caractéristique spatiale.

2.2.2.1 Echelles

a) Echelles possibles

Les échelles de mesure permettent de décrire les différents états possibles de l'indicateur au cours de la vie du barrage.

Divers choix d'échelles d'évaluation sont possibles (Hossenlopp, 1995) :

- **l'échelle nominale**, binaire, marque la présence ou l'absence d'une caractéristique. Par exemple, l'indicateur « Fuites » pourrait être évalué avec les termes « présence » ou « absence ». Elle est intéressante lorsqu'on cherche à détecter une caractéristique exceptionnelle mais pas à mesurer son intensité ;
- **l'échelle ordinale** se caractérise par l'ordonnancement des catégories en fonction d'un critère d'intensité. Par exemple, l'indicateur « Fuites » pourrait être évalué par les termes « absence », « faible », « moyenne », « forte » ;
- **l'échelle d'intervalle** permet de travailler sur des grandeurs numériques continues. Par exemple, l'indicateur « Fuites » pourrait être évalué sur une échelle continue de 0 à 10 ;
- **l'échelle de rapport** compare l'évaluation à une note de référence notée arbitrairement à 1. Il s'agit d'énoncer de combien de fois l'évaluation diffère « en rapport » (ou en proportion) avec la note de référence. Cette échelle est relativement simple d'emploi pour des rapports double ou triple mais devient difficile à utiliser pour des évaluations représentant une fraction de la note de référence. Par exemple, l'évaluation de l'indicateur « Fuites » pourrait être trois fois plus forte qu'une référence définie au préalable.

Concernant l'échelle, un autre choix se pose : faut-il utiliser une échelle unique pour évaluer tous les indicateurs ou plusieurs échelles ?

Dans le cas d'une échelle unique, tous les indicateurs visuels, calculés ou auscultés sont évalués sur la même échelle, par exemple, une échelle d'intensité de 1 à 5. Ceci suppose, pour les indicateurs auscultés, les indicateurs calculés et certains indicateurs de conception ou réalisation qu'un transfert est fait d'un espace numérique à un espace symbolique (cf. Tableau 7). Il est important de signaler que les données d'auscultation par exemple, seront a priori rarement exprimées sous forme de valeurs absolues mais le seront sous forme de pourcentage ou de tendance : il est impossible de donner une valeur absolue qui conviendrait à un ensemble de barrages de taille et caractéristiques différentes.

	Valeurs numériques	**Echelle d'intervalles**
Débit par rapport à la capacité du système de drainage (cas où le débit n'évolue pas dans le temps)	< 5%	1
	5-20 %	3
	20-50 %	4
	> 50 %	5

Tableau 7 : Passage numérique – symbolique – Exemple du débit de drainage

L'utilisation d'une échelle unique impose une rigueur toute particulière lors de la qualification des jalons ou références : il faut s'assurer qu'une même note donnée à deux indicateurs différents évaluant une même fonction coïncide avec un niveau de dégradation similaire. Par exemple, pour la fonction d'étanchéité d'un barrage avec masque en maçonnerie, une note de 3 sera donnée en cas :

- de « présence de pierres présentant des altérations en surface (desquamation) » pour l'indicateur Etat des pierres ;
- ou de « joints dégradés localement et sur une faible épaisseur (dégradations peu profondes) » pour l'indicateur Dégradation des joints de maçonnerie.

L'intérêt de l'échelle unique est double : le risque d'erreur de notation par confusion d'échelles n'existe pas et son utilisation simplifie les combinaisons ultérieures car elle autorise, dans certains cas de figure, la combinaison par une arithmétique simple de type « minimum », « maximum », somme...

Dans le cas de l'utilisation de plusieurs échelles, si une souplesse très importante est introduite en terme de définition des indicateurs, la difficulté se situe par contre au niveau de la définition de règles de combinaison (SI indicateur 1 = a Et SI Indicateur 2 = b … Alors Performance = x). Le nombre de règles peut augmenter rapidement avec le nombre d'indicateurs. Une solution est d'identifier d'éventuelles hiérarchies dans les indicateurs pour réduire ce problème : la hiérarchisation des indicateurs ne se fait plus au niveau de la mesure comme dans le cas d'une échelle unique mais sera réalisée au niveau de leur combinaison. Considérons un système simplifié dans lequel la performance de la fonction de drainage est évaluée par deux indicateurs : « Fuites » et « Présence de végétation sur le pied aval ». Supposons que l'indicateur « Fuite » soit évalué sur une échelle de 0 à 10, l'indicateur « Présence de végétation sur le pied aval » sur une échelle de 0 à 5 et la performance de la fonction de drainage sur une échelle de 0 à 7. On peut concevoir un système de règles qui comporterait notamment les deux règles suivantes :

- SI Fuite > 7 ALORS Performance Fonction Drainage = 7 ;
- SI Fuite = 0 ET Présence Végétation = 4 ALORS Performance Fonction Drainage = 3.

Une hiérarchisation est introduite : la première règle traduit le fait que seule la notation de l'indicateur « Fuite » intervient dans l'évaluation de la Performance de la Fonction de Drainage. Quelles que soient les valeurs de l'indicateur « Présence Végétation », si les « Fuites » sont évaluées à 7 ou plus, la Performance de la Fonction de Drainage est évaluée à 7. Cette approche permet de réduire le nombre de règles.

b) Echelles retenues

Les échelles de catégories ordonnées avec une référence pour chacune des catégories ou les échelles d'intervalles structurées avec une référence pour chaque barreau de l'échelle semblent être des choix pertinents pour caractériser les indicateurs manipulés. Les échelles d'intensité sont les plus fréquemment rencontrées dans la littérature. Leurs bornes varient en fonction des travaux : de 1 à 3, de 1 à 5, de 0 à 10, de 0 à 100…

Dans notre étude deux échelles ont été retenues suite à des propositions faites au groupe qui les a discutées (cf. Figure 10) :

- une échelle de 0 (excellent) à 10 (inacceptable) avec 6 jalons (excellent, bon, passable, médiocre, mauvais, inacceptable) pour tous les indicateurs issus de l'auscultation, de modèles et de l'inspection visuelle. Cette échelle provient d'un travail mené sur les digues avec le même groupe d'experts (Serre, 2005). Nous avons choisi de la conserver afin, d'une part, de rendre cohérents les systèmes d'évaluation développés dans l'équipe du Cemagref sur ces deux types d'ouvrages hydrauliques et d'autre part, de faciliter l'explicitation du savoir par les experts en évitant d'avoir à jongler entre 2 échelles. L'échelle est inversée : la note 0 correspond à une situation idéale c'est-à-dire sans défaillance et la note 10 à une défaillance totale. Ce type d'échelle inversée se retrouve dans la littérature. (Fell, 1996) l'emploie par exemple pour quantifier différents facteurs principalement de conception ou de réalisation. Dans la méthode des indices de condition développée par Hydro-Québec, les ouvrages sont classés par ordre de priorité sur une échelle de 0 (meilleur score – pas de maintenance à prévoir) à 100 (pire score) (Hydro-Québec, 2005) ;
- une échelle de 0 (conforme) à 10 (non conforme) avec 4 jalons (conforme, déviation faible, déviation forte, non conforme) pour les indicateurs de conception et réalisation. Le mot déviation s'entend par comparaison aux règles de l'art actuelles.

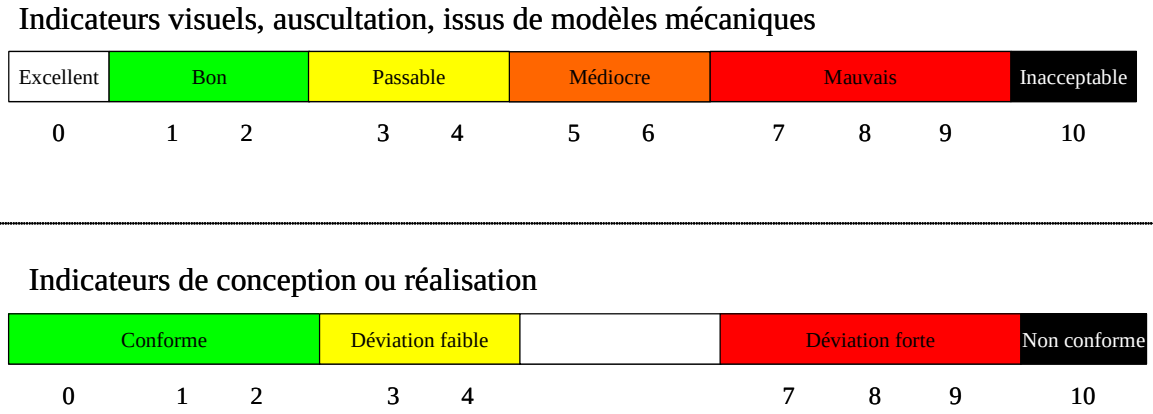


Figure 10 : Echelles retenues par le groupe

Le choix d'une échelle unique entraîne une vigilance particulière quant à la cohérence entre les différents indicateurs. Ceci conduit à un effet de hiérarchisation des indicateurs par rapport à la fonction : cette hiérarchisation apparaît sur la longueur de l'échelle qui est potentiellement parcourue par l'indicateur. Nous pouvons ainsi distinguer trois types d'indicateurs (en faisant l'hypothèse que tous sont évalués sur une échelle de 0/excellent à 10/inacceptable) :

- les indicateurs qui renseignent uniquement sur une dégradation de la fonction mais pas sur sa défaillance verront leurs notes possibles évoluer de 0 à 6 ou 7 maximum. C'est le cas de l'indicateur « Faïençage du masque en béton bitumineux » pour la fonction d'étanchéité : la seule présence de faïençage ne peut conduire à une défaillance complète du système d'étanchéité et la note maximale qui devrait être donnée est de 6. Ils permettent de juger d'une sensibilité à l'occurrence d'un phénomène ;
- les indicateurs qui informent uniquement sur une défaillance : leur échelle de notation est définie par les valeurs extrêmes 0, 7, 8, 9 ou 10. La fonction est soit totalement performante soit défaillante. C'est le cas de l'indicateur « Fuite d'eau claire sur le remblai aval » : cet indicateur exprime une défaillance de la fonction de drainage. Ce sont des indicateurs que nous qualifierons de directs : spécifiques du phénomène ou du mode de rupture, ils le mesurent directement ;
- les indicateurs qui témoignent d'une dégradation ou d'une défaillance de la fonction. Leur échelle de mesure couvre une large gamme entre 0 et 10. Par exemple, l'indicateur « Etat de la couche anti-batillage» peut indiquer une défaillance ou une dégradation de la fonction de protection d'étanchéité et les valeurs possibles sont 0 et de 3 à 10.

Nous souhaitons signaler qu'un même type de mesure peut être utilisé pour caractériser plusieurs fonctions. Par exemple, la piézométrie est impliquée dans l'évaluation de la performance de la fonction de drainage et dans la performance de la fonction de résistance au glissement. Cette situation, même si elle n'est pas très répandue, mérite une attention particulière : des jalons différents doivent être définis en lien avec la fonction caractérisée. Sur le Tableau 8, la grille de formalisation de l'indicateur piézométrie est différente selon qu'il renseigne la fonction de drainage ou la fonction de résistance au glissement du talus aval. Nous considérons ces deux indicateurs comme deux indicateurs distincts. L'indicateur de piézométrie rend compte d'une augmentation du niveau piézométrique au dessus du drain horizontal ou vertical ou dans le remblai aval : ceci constitue un comportement anormal.

Description de l'indicateur de piézométrie pour la fonction de drainage	**Description de l'indicateur de piézométrie pour la fonction de résistance au glissement du talus aval**
0 : absence de piézométrie **5-10*** : présence de piézométrie au dessus du drain horizontal ou en aval du drain vertical *: la notation se fait en appréciant (classement par ordre d'importance) : 1. la position amont-aval de l'instrument (plus la piézométrie est détectée en aval, plus la note est élevée) 2. la hauteur relative 3. l'évolution de la piézométrie	**0** : absence de piézométrie **5-8*** : présence de piézométrie dans le remblai aval * : notation en fonction de la hauteur relative de la ligne d'eau par rapport à un profil. Pour la piézométrie, connaissant la géométrie du barrage, on extrapolera la valeur disponible H1 en fonction de la position de l'instrument jusqu'au talus aval et on se basera sur la valeur H2 pour faire la notation de la saturation du remblai **5** : présence d'eau dans le premier quart inférieur **6** : présence d'eau dans la moitié inférieure **7** : présence d'eau dans les trois-quarts inférieurs **8** : présence d'eau dans la totalité du talus

Tableau 8 : Description des indicateurs de piézométrie selon la fonction qu'ils caractérisent

2.2.2.2 Références

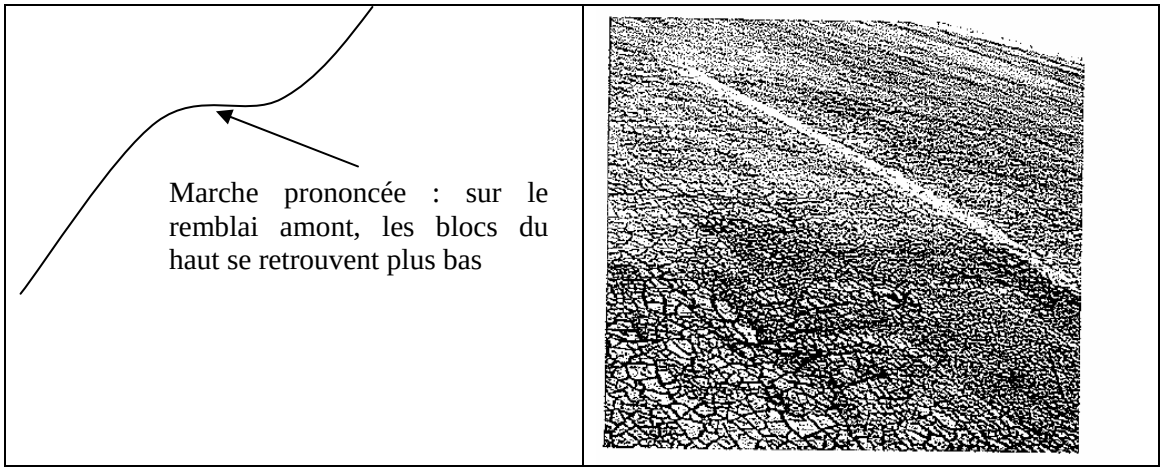
Les références sont des points d'ancrage sur l'échelle ; elles aident l'expert en lui permettant d'identifier catégories ou intensités.

a) Nombre de références et nature

Un premier point important concernant les références est le nombre de points d'ancrage nécessaire pour définir de manière précise l'échelle de mesure. L'évolution d'une fissure par exemple peut passer de « fissure non ouverte » à « fissure ouverte » avec ensuite une gradation dans le niveau d'ouverture de la fissure : plusieurs références sont nécessaires. Le nombre de références peut varier d'un indicateur à l'autre, l'important étant de définir un nombre qui soit un compromis entre la précision de la mesure et la qualité de la mesure obtenue : par exemple, sur le Tableau 8, pour la piézométrie étudiée en lien avec la fonction de résistance au glissement du talus, les experts ont défini quatre jalons importants qui couvrent la gamme totale allant de 5 à 8. Ce nombre est fixé par les experts au cours des discussions menées durant les séances de recueil.

Pour certains indicateurs, il peut être pertinent de fournir une gamme de notes plutôt qu'une seule note. C'est le cas pour l'indicateur de piézométrie pour la fonction de drainage présenté dans le Tableau 8. En effet, il peut être très difficile de définir plus précisément les références compte tenu des différents paramètres qui l'influencent : la position amont-aval de l'instrument, la hauteur relative et l'évolution de la mesure dans le temps. Ces différents paramètres génèrent un nombre de situations très important qu'il n'est pas possible de définir in extenso. L'introduction (i) d'une gamme de variation et (ii) d'un guide à la notation décrivant les paramètres influents et les classant selon leur degré de gravité, permet d'apporter de la souplesse au système d'évaluation.

Pour des mesures visuelles, il est intéressant de fournir des références physiques sous la forme de photos, de schémas ou encore de descriptions linguistiques. Ces références doivent être précises afin de guider l'évaluation et pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté dans la notation, soit entre plusieurs experts, soit par le même expert pour plusieurs évaluations. La Figure 11 reproduit deux exemples d'illustrations d'indicateurs visuels.



(a) (b)

Figure 11 : Exemple de références pour des mesures visuelles – (a) : schéma montrant la formation d'une marche sur le rip-rap pour l'indicateur « Qualité de la couche anti-batillage (enrochements) – (b) : photographie illustrant le faïençage pour l'indicateur « Qualité du béton bitumineux »

b) Caractéristiques des références

Les références peuvent être décrites selon trois axes : un axe quantitatif que nous venons de décrire, un axe spatial et un axe cinétique.

Certaines références intègrent un axe cinétique. En effet, pour les ouvrages existant depuis longtemps, on considère généralement que la répétitivité et la stabilité du comportement dans le temps sont gages de normalité (Bourdarot et al., 2000). Ainsi, l'évolution de la piézométrie dans le temps est prise en compte quand cet indicateur sert à évaluer la fonction de drainage (cf. Tableau 8).

De même, un axe spatial est défini pour certaines références (cf. Tableau 8). Deux questions sont soulevées :

- comment prendre en compte la proportion de surface ou de linéaire concernée par le problème ?
- comment prendre en compte sa localisation sur le composant ?

c) Stratégie retenue et exemples

La stratégie consiste à intégrer des éléments dans la définition de l'échelle des indicateurs (cf. Tableau 9) : la surface concernée par les fuites d'eau claire, leur hauteur ou encore la position amont-aval de l'appareil.

Fuite eau claire sur le remblai aval	**Piézométrie (évaluée par piézomètres ou cellules de pression interstitielle)**
0 : pas de fuites d'eau claire sur le remblai aval **7-10*** : présence de fuites *: la notation se fait en appréciant (classement par ordre d'importance) : 1. la surface concernée par les fuites à partir de l'état d'humidité du remblai et de la présence d'une végétation hydrophile 2. la position de la fuite sur la hauteur du remblai 3. le débit si on peut l'apprécier	**0** : absence de piézométrie au dessus du drain horizontal ou en aval du drain vertical **5-10*** : présence de piézométrie au dessus du drain horizontal ou en aval du drain vertical *: la notation se fait en appréciant (classement par ordre d'importance) : 1. la position amont-aval de l'instrument (Plus piézométrie détectée en aval, plus note élevée) 2. la hauteur relative 3. l'évolution de la piézométrie

Tableau 9 : Intégration des informations spatiales et temporelles dans les références

En fonction de l'indicateur étudié, un à trois de ces axes sont concernés :

- si l'indicateur n'est décrit que par un axe, il s'agit de l'axe quantitatif. On peut citer l'exemple de l'indicateur « Qualité du béton bitumineux » (cf. Figure 11) ;
- deux axes permettent de décrire l'indicateur « Fuite d'eau claire » (cf. Tableau 9) : l'axe quantitatif (surface et débit) et l'axe spatial (position amont-aval) ;
- comme nous pouvons le constater sur le Tableau 9, pour la piézométrie, les ingénieurs utilisent les trois axes ; l'axe quantitatif est basé sur la présence ou l'absence de piézométrie, l'axe cinétique apparaît sous le terme « Evolution de la piézométrie » et l'axe spatial décrit l'influence de la position amont-aval et la hauteur relative.

Dans les exemples cités, nous pouvons remarquer que l'axe spatial se décompose en trois sous-axes dus à sa nature tridimensionnelle : position rives-axe transversal de l'ouvrage, position amont-aval, hauteur.

d) Evolution des références

Pour conclure sur les références de l'échelle de mesure, nous souhaitons souligner que les références devraient, dans la mesure du possible, être figées avant l'utilisation de l'outil en routine. En effet, des modifications dans les références peuvent provoquer l'affectation de notes différentes d'une inspection à l'autre ce qui peut perturber le suivi de l'ouvrage dans le temps. Si un changement de référence était obligatoire, deux alternatives semblent possibles :

- indiquer aux utilisateurs que des modifications ont été réalisées dans les références et que des notes différentes ne signifient pas pour autant un changement de l'état du barrage. A la charge de l'ingénieur de réaliser une analyse plus approfondie avant de conclure ;
- utiliser les données de base, par exemple les données d'auscultation traitées, de l'analyse précédente pour recalculer la note précédente selon le nouveau système d'évaluation. Ceci rend le suivi dans le temps tout à fait cohérent.

2.2.2.3 Caractéristique spatiale des indicateurs

La caractéristique de lieu présente dans la grille de formalisation est très importante. Cette information répond à la question « quel est le composant du barrage à analyser ? » (crête, masque amont, remblai amont, remblai aval, fondations…). Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, la caractéristique spatiale peut ensuite être précisée dans la définition des références par la surface concernée et par la localisation sur le composant (amont-aval, rives-axe du barrage).

Il faut noter que certains indicateurs sont caractéristiques de tel ou tel composant : c'est ainsi que le faïençage ne va toucher que le masque amont (en béton bitumineux).

Enfin, au moment de la notation cette fois-ci, il est précisé que l'évaluation doit se faire par profils si on relève des indicateurs variant sensiblement sur la longueur du barrage. Cette démarche est classique : on la trouve dans l'approche de suivi des barrages développée pour le suivi des barrages britanniques (Brown and Roots et Building Research Establishment, 2002) et par Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2005) pour lequel un aménagement donné peut présenter des sections très différentes.

Il faut garder en tête que certains indicateurs vont fournir une information de type global sur l'ouvrage (pendules par exemple) tandis que d'autres donneront une information locale (piézomètres par exemple).

2.2.2.4 Caractéristique temporelle des indicateurs

Le moment d'utilisation des indicateurs est, comme nous l'avons vu plus haut, implicite car lié à la date de l'inspection. Il nous paraît néanmoins très important de signaler que le recueil des différentes données permettant d'aboutir à cet indicateur n'est pas mené sur le même pas de temps et qu'il est possible de distinguer les échelles suivantes (Peyras, 2003) :

- pas de temps de la journée :

  $\Rightarrow$ observation visuelle si problème décelé sur barrage ;

  $\Rightarrow$ mesures d'auscultation : niveau d'eau, température, pluviométrie ;

- pas de temps de la semaine :

  $\Rightarrow$ inspection visuelle de routine ;

  $\Rightarrow$ mesures d'auscultation : piézométrie, pression interstitielle, débit ;

- pas de temps du mois :

  ⇒ mesures d'auscultation : déplacement des pendules, variation de pentes des inclinomètres, mesures des contraintes aux extensomètres ;

- pas de temps de l'année :

  ⇒ mesures d'auscultation complexes : topographie, déplacements, tassements ;

  ⇒ analyse des tendances des données d'auscultation ;

  ⇒ visite du service de contrôle ;

- pas de temps de la décennie :

  ⇒ visite décennale approfondie avec vidange de la retenue ou inspection subaquatique.

Nous conseillons que figurent dans la grille de formalisation, les pas de temps conseillés pour la mesure de l'indicateur et l'analyse de la tendance de cette mesure.

2.3 Agrégation des indicateurs

L'objectif de ce paragraphe est de proposer des modèles d'agrégation de données fournissant une information globale. Lors du processus d'agrégation sont manipulées à la fois les données à fusionner mais également les informations supplémentaires qui servent à guider ou aider l'agrégation.

2.3.1 Détermination de la performance

2.3.1.1 Structure du modèle

Rappelons que nous avons pris une démarche descendante pour construire notre modèle : nous sommes partis du modèle fonctionnel décrit dans (Figeac, 2003 ; Peyras, 2003). Ce modèle établit les liens qualitatifs entre les trois types de variables que sont les indicateurs, les phénomènes et les fonctions, pour aller vers le modèle structuré de la Figure 12. Le modèle est de type MIMO (Multiple Inputs – Multiple Outputs) :

- les entrées sont les indicateurs évalués par l'expert (In) ;
- les sorties sont les performances des différentes fonctions (μFi) impliquées dans le mode de rupture considéré et l'évaluation de la performance vis-à-vis du mode de rupture (μMRj).

Des variables intermédiaires, appelées phénomènes et notées φm, peuvent être générées afin de faciliter les combinaisons permettant d'obtenir la note de performance vis-à-vis du mode de rupture. De cette manière, les agrégations concernent ainsi toujours deux variables : soit deux performances (μF1 et μF2), soit une performance et un phénomène (μF1 et φ1). Les règles sont beaucoup plus simples à énoncer pour les experts que si l'on combinait les trois performances μF1, μF2 et μF3.

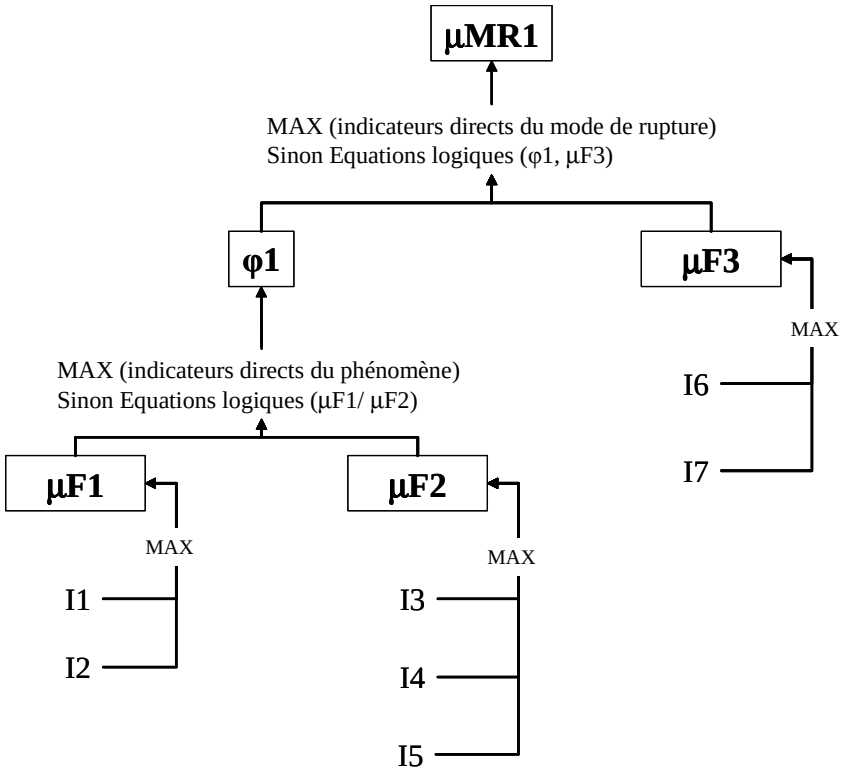


Figure 12 : Modélisation de l'évaluation de la performance vis-à-vis d'un mode de rupture

L'agrégation des indicateurs d'auscultation, visuels et calculés, est menée à l'aide d'opérateurs mathématiques adaptés à la nature des données à agréger.

2.3.1.2 Choix des opérateurs d'agrégation

Les opérateurs mathématiques d'agrégation établis par les experts lors des séances sont :

- pour le calcul de la performance des fonctions : le maximum. Cet indicateur a été proposé par les experts lors des séances car il représente bien leur mode d'agrégation des indicateurs en vue d'obtenir la performance d'une fonction. L'utilisation systématique de cet opérateur pour le calcul de la performance de chaque fonction se justifie au point de vue mathématique dans la définition d'une échelle de mesure unique pour tous les indicateurs. On considère que l'unité de mesure est la même quelque soit l'indicateur et on se place dans le cas le plus défavorable en utilisant le maximum (système en série). L'échelle de mesure de la performance des fonctions est donc la même que celle des indicateurs : de 0 (excellent) à 10 (inacceptable). Ce type d'opérateur est par ailleurs utilisé dans des systèmes mis en place par d'autres organismes : c'est cas pour le système développé par Hydro-Québec qui utilise l'opérateur Minimum (les échelles utilisées par le Cemagref et par Hydro-Québec sont inversées). La validité de l'opérateur Maximum sera étudiée lors des séances de validation.
- pour l'agrégation des performances de deux fonctions ou d'une fonction avec un phénomène, les calculs se font :

  ⇒ soit par calcul du maximum des indicateurs directs si au moins l'un d'entre eux est « activé » c'est-à-dire que sa note est strictement positive. Rappelons que les indicateurs directs sont évalués soit à 0 soit en partie haute de l'échelle (6 à 10) ;

⇒ soit par le moyen d'équations logiques qui combinent les performances des deux fonctions impliquées dans le phénomène ou la performance d'une fonction avec l'évaluation du phénomène (système en parallèle). Par exemple, une performance de la fonction d'étanchéité évaluée à 10 (correspondant à la présence de trous dans une dalle de béton assurant l'étanchéité) et une performance de la fonction de drainage évaluée à 0 (c'est-à-dire totalement performante) entraîne une notation du phénomène des infiltrations d'eau contournant le drain à 0 (« excellent »). La performance vis-à-vis du mode de rupture est également évaluée sur une échelle de 0 (excellent) à 10 (inacceptable).

Ces opérateurs ont été utilisés dans le travail de thèse de Damien Serre (Serre, 2005).

La combinaison des indicateurs par l'opérateur Maximum conduit à une possibilité d'évolutivité du système très rapide, lors de la phase d'exploitation du système :

- par ajout de nouvelles connaissances si de nouveaux indicateurs sont générés. Par exemple, les mesures par fibre optique permettent de localiser avec précision des zones de percolation dans les barrages en remblai (Aufleger et al., 2000) : actuellement, ce type d'indicateur n'a pas été introduit dans le système développé mais il pourrait l'être facilement sous réserve de réaliser en préalable, une définition de l'échelle de mesure. La structure du modèle est donc robuste face à l'introduction de nouvelles connaissances ;
- inversement, par modification voire retrait d'indicateurs suite par exemple à des évolutions des règles de l'art.

Par contre, cet opérateur introduit un aspect très sécuritaire, particulièrement lorsqu'il est utilisé avec des notations déterministes puisque l'évaluation de la performance de la fonction provient généralement de l'information portée par un seul indicateur. Ainsi, le système perd de sa richesse. Nous verrons dans le chapitre suivant que l'introduction de méthodologies telles que la théorie des possibilités permet de combiner des informations issues de plusieurs indicateurs. Ceci a pour conséquence d'affiner l'évaluation de la performance en prenant en compte plus d'informations.

Les équations logiques interviennent dans notre agrégation, uniquement au niveau des fonctions : elles ne devraient donc pas, après validation, être modifiées car il paraît très improbable qu'une nouvelle fonction soit introduite. Le cadre que nous proposons pourrait être étendu à d'autres types d'ouvrages avec l'introduction de nouvelles fonctions caractéristiques de l'ouvrage étudié.

2.3.2 Détermination de la conformité aux règles de l'art

Une démarche similaire, avec utilisation de l'opérateur maximum, est mise en œuvre pour caractériser la conformité des différents dispositifs (étanchéité, drainage…) aux règles de l'art actuelles κ_m, par combinaison des indicateurs de conception et réalisation I_n (cf. Figure 13).

Un élément important mérite d'être souligné ici : l'évolution au cours du temps de la note de conformité aux règles de l'art est liée à la modification de ces règles ou à la modification du barrage par confortement par exemple.

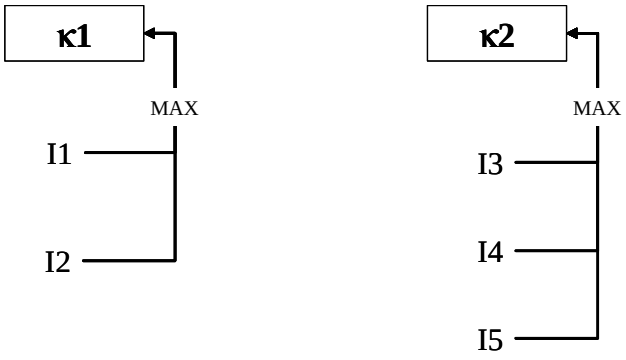


Figure 13 : Agrégation des indicateurs pour l'évaluation de la conformité aux règles de l'art

Une fois les modèles établis, des algorithmes sont implémentés afin d'en permettre une utilisation conviviale.

3. Validation interne

La dernière phase de la démarche est une phase de validation (cf. Figure 6). Nous la qualifions de validation interne ; dans cette Partie, nous cherchons à vérifier que les indicateurs formalisés et leur description conviennent au groupe d'experts et que les résultats fournis par l'algorithme sont comparables à ceux donnés par les experts. Il s'agit de contrôler que les méthodes et outils proposés sont aptes à reproduire l'évaluation d'un expert qui a fourni les données nécessaires à leur construction et qui en est un futur utilisateur. Ici, le raisonnement du groupe d'experts est la référence.

Nous aborderons en Partie 3, les aspects de généricité en établissant une comparaison de la méthode par rapport à d'autres travaux de la littérature internationale sur un plan qualitatif (comparaison des entrées du modèle) et sur un plan quantitatif (comparaison des évaluations obtenues avec deux approches différentes). Là, le raisonnement du groupe d'experts, support à la construction du modèle, ne sera plus la seule référence.

3.1 Objectifs

Les objectifs de l'étape de validation sont au nombre de trois. Il s'agit :

- de valider la grille de description des indicateurs formalisés ;
- de comparer les évaluations données par plusieurs experts pour tester la cohérence du groupe ou la non ambiguïté des références ;
- de comparer l'évaluation de la performance vis-à-vis du mode de rupture considéré qui a été donnée par les experts et celle fournie par le modèle.

Nous préconisons que le processus de validation interne commence à intervenir assez tôt dans le processus de recueil et formalisation des connaissances : il nous paraît plus pertinent de réaliser une validation lorsqu'un premier scénario a été décrit entièrement plutôt que de stocker les connaissances correspondantes à l'ensemble des scénarios et de conduire seulement ensuite une validation. En effet :

- la démarche de validation permet de tester auprès des futurs utilisateurs la pertinence de la formalisation et de la structuration des connaissances et leur acceptabilité. Les utilisateurs sont invités à donner leur avis sur ces points par des commentaires libres lors de la séance de validation ;

- des incorrections dans la description et/ou dans la structuration ont pu être générées dans le système. Leur mise en évidence et leur correction peuvent être rendues difficiles si la validation est menée quand les connaissances concernant tous les scénarios ont été recueillies et formalisées. Ces erreurs ont pu être introduites :

  ⇒ du fait d'un raisonnement des experts « dans l'absolu » pendant les séances ; ces erreurs font alors surface lorsqu'on confronte le modèle à des cas réels ;

  ⇒ mais également par l'animateur du groupe du fait par exemple, d'une mauvaise compréhension ou d'un contresens ;

- un autre intérêt d'une validation précoce est la construction d'un outil informatique qui, même s'il reste au stade prototype largement améliorable, concrétise les résultats et les traduit sous une forme opérationnelle.

3.2 Méthode

L'étape de validation pose des problèmes particuliers pour des ouvrages de génie civil tels que les barrages : il est en effet difficile de faire des validations en réel impliquant de déplacer plusieurs experts, en même temps, sur différents sites géographiques pouvant être très éloignés les uns des autres, pour des durées allant d'une demi-journée à une journée. C'est pourquoi dans un premier temps, une démarche particulière doit être élaborée. Elle fait l'objet du paragraphe suivant. Ultérieurement, des validations sur site devront bien entendu être réalisées.

3.2.1 Développement de cas tests

Pour palier la difficulté de la validation in situ, nous avons choisi de construire des dossiers tests à partir de la base de cas disponible au Cemagref et de faire noter ces cas-tests par les experts. Cette base est constituée notamment des rapports de visites décennales. Nous avons présenté les cas tests de la manière suivante :

- description du barrage : hauteur, date de mise en eau, volume de la retenue, nature de l'étanchéité… ;
- données issues de l'inspection visuelle illustrées le plus possible avec des photographies ;
- données issues de l'auscultation lorsqu'elles existent.

Chaque cas test comporte quelques pages. L'Annexe 3 présente un exemple de dossier.

Ces dossiers simplifiés sont intéressants en première approche. En effet, ils permettent :

- de tester différents cas de défaillance ou de dégradation et différents indicateurs car les barrages peuvent être de type différent : par exemple, pour les barrages à étanchéité amont, barrage à masque amont en béton conventionnel, en béton bitumineux, en argile… ;
- de tester la faisabilité et l'applicabilité de la méthode avec un investissement en temps limité de la part des experts.

Des tests doivent ensuite être réalisés en vraie grandeur, à partir de l'examen complet du barrage complété par une visite sur le terrain. Ces tests représenteront alors la pratique courante de l'expert.

3.2.2 Développement d'un outil d'aide à l'évaluation et de traçabilité

Un outil informatique a été implémenté sous Visual Basic avec une interface Excel pour réaliser les calculs et enregistrer les données fournies par l'expert. Nous avons essayé de répondre aux critères importants d'une interface c'est-à-dire la simplicité et la clarté.

Un système de traçabilité des données est associé à l'outil d'évaluation de la performance afin d'assurer l'enregistrement des notes et informations fournies par les experts.

3.2.3 Notation par les experts

Les experts sont invités à faire la notation des cas tests en utilisant les indicateurs formalisés durant les séances. Chacun des dossiers est noté individuellement par chacun des experts. Une séance de mise en commun des résultats est organisée à l'issue des séances de notations individuelles.

Pour s'assurer de la représentativité des résultats, un nombre minimal de dossiers doit être traité.

3.2.4 Traitement des résultats

Le traitement des résultats consiste en :

- une validation de la grille de formalisation : si les experts estiment que la grille est correcte alors on considère que la formalisation est validée, sinon, les experts peuvent exprimer leurs remarques au travers de la fenêtre « Commentaires ». Ces remarques sont prises en compte au cours de la séance de recueil suivante et se traduisent par une description plus précise de l'indicateur, l'ajout d'un nouvel indicateur… : ceci est mené au travers de la boucle en retour vers le début de la démarche (cf. Figure 6) ;
- une détermination de la cohérence du groupe : les données sont traitées, fonction par fonction, en utilisant une ANOVA (Analyse de la Variance) à deux facteurs (Expert x Barrage). Le modèle est mixte : l'effet Expert est considéré comme fixe[5] et l'effet Barrage comme aléatoire[6]. L'analyse indique si les experts discriminent les barrages et si les mesures des différents experts peuvent être considérées comme les mêmes (reproductibilité). Le risque est fixé à 5 %. Des comparaisons d'échantillons appariés permettent de mettre en évidence des différences de notation entre deux experts pour un même barrage ;
- une vérification de l'accord du modèle aux notes données par les experts : la note de performance donnée par les experts est comparée à celle donnée par le modèle en utilisant une comparaison d'échantillons appariés.

[5] Un facteur à effet fixe est un facteur dont les modalités ne changent pas quand l'expérience considérée est réalisée à plusieurs reprises : les experts seront les mêmes d'un test à l'autre.

[6] Un facteur à effet aléatoire est un facteur pour lequel les modalités sont considérées comme un échantillon représentatif d'une population beaucoup plus large : on considère que les dix barrages sont un échantillon représentatif d'une population beaucoup plus large de barrages.

4. Synthèse sur la méthode d'évaluation déterministe de la performance

Nous avons proposé une méthodologie de recueil et de formalisation des connaissances nécessaires à l'évaluation de la performance et de la conformité aux règles de l'art d'un barrage. Les exemples cités s'adressent aux barrages en remblai mais la méthodologie proposée est généralisable aux autres types de barrages. Trois apports ont été réalisés :

- un format de description des différentes données sous la forme d'indicateurs ;
- un modèle d'agrégation des différents indicateurs ;
- une procédure de validation de la démarche et des résultats.

Les retombées de cette démarche sont une capitalisation et un regroupement des connaissances en terme de « savoir-mesurer », de « savoir-analyser » et de « savoir-agréger ». Cette pérennisation facilitera les actions de transmission de savoirs qui pourront être menées ultérieurement.

Dans le Chapitre 1 de la Partie 3, nous présenterons des exemples d'application de cette méthodologie pour le mécanisme d'érosion interne dans le remblai

Chapitre 2 – Formalisation des connaissances du domaine

La base de connaissances a pour objet de regrouper, de caractériser et de relier entre elles les connaissances descriptives techniques du domaine d'application, ici, les phénomènes de dégradation que peuvent connaître les barrages. La finalité de la base de connaissances est de fournir un outil qui puisse fonctionner de manière liée ou au contraire déconnectée du système d'évaluation de la performance.

1. Démarche de construction de la base de connaissances

Une base de connaissances est un ensemble structuré permettant le stockage et l'exploitation des connaissances. Sa structuration est essentielle car elle doit refléter les attendus des futurs utilisateurs et mettre en exergue les concepts majeurs du domaine traité. Notre démarche de construction repose sur trois étapes (cf. Figure 14) :

- la structuration des éléments de connaissances sous la forme de champs et la définition des relations qui lient ces champs ;
- l'instanciation des champs ;
- la validation faite auprès d'experts du domaine au cours de séances collectives. L'intérêt d'une relecture collective est l'obtention d'un consensus dans le groupe.

L'acquisition des connaissances est faite à partir de la littérature scientifique et technique et est complétée par des interviews avec des experts.

Un outil informatique est ensuite élaboré sur la base des informations validées. Celui-ci sera présenté dans la Partie 3.

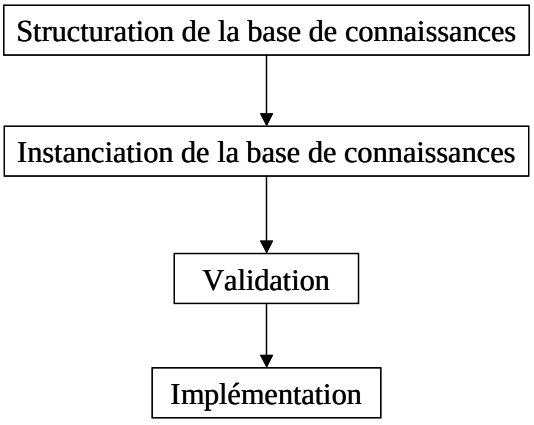


Figure 14 : Démarche de construction de la base de connaissances

Les différentes étapes de la construction de la base de connaissances sont présentées plus en détail dans l'Annexe 4.

2. Présentation de la base de connaissances sur les phénomènes de dégradation des barrages

Ce paragraphe présente l'application de la méthodologie de construction de la base de connaissances aux phénomènes de dégradation des barrages. Nous reprenons les différentes étapes de la méthodologie sur cette application.

2.1 Structuration

Les champs que nous avons définis pour chacun des phénomènes sont les suivants (cf. Figure 15) :

- nom du phénomène ;
- composant concerné par le phénomène. Trois niveaux de granularité peuvent être pris en compte pour l'analyse d'un barrage (Peyras, 2003) :

  ⇒ une granularité de rang inférieur qui se situe à l'échelle des matériaux entrant dans la structure géométrique du composant ;

  ⇒ une granularité de rang supérieur qui correspond au système dans sa totalité : le barrage, sa fondation les différents ouvrages annexes… ;

  ⇒ une granularité de rang intermédiaire qui correspond au découpage du système en sous-systèmes (système de drainage, d'étanchéité) puis en différents composants (pour le sous-système de drainage : drain vertical, drain horizontal)...

  Les objets de notre étude sont les phénomènes de vieillissement qui affectent le barrage au niveau de ses différents sous-systèmes et composants. Nous travaillons ainsi principalement à une granularité de rang intermédiaire et à une granularité de rang inférieur : par exemple, pour la description de l'érosion interne du remblai (rang intermédiaire), il sera précisé que ce mécanisme dépend notamment du transport des grains de matériau (rang inférieur) du remblai ;
- définition et origines du phénomène : un texte de quelques lignes présente la définition et les origines du phénomène. Pour certains phénomènes plus complexes – érosion interne par exemple – l'utilisateur peut obtenir des renseignements plus complets grâce à un champ « description détaillée » ;
- illustration du phénomène (figures, schémas, photographies) ;
- indicateurs permettant de détecter le phénomène : ce sont les indicateurs visuels, d'auscultation et calculés ;
- actions correctives ayant pour objectif de traiter le phénomène et de replacer le système ou le composant dans un état structurel et/ou fonctionnel normal ;
- illustrations des actions correctives (figures, schémas, photographies) ;
- cas de barrages ayant connu ce type de phénomène : en renseignant ce champ de manière exhaustive, il devient possible de réaliser des traitements statistiques et d'établir par exemple la fréquence d'apparition d'un phénomène donné pour un composant donné. Le critère d'exhaustivité est ici essentiel pour la qualité des données ;
- fonctions concernées.

Les relations sémantiques que nous avons établies entre ces champs sont (cf. Figure 15) :

- phénomène « est évalué par » indicateurs ;

- phénomène « est corrigé » par actions correctives ;
- action corrective « est illustrée » par « illustration action »…

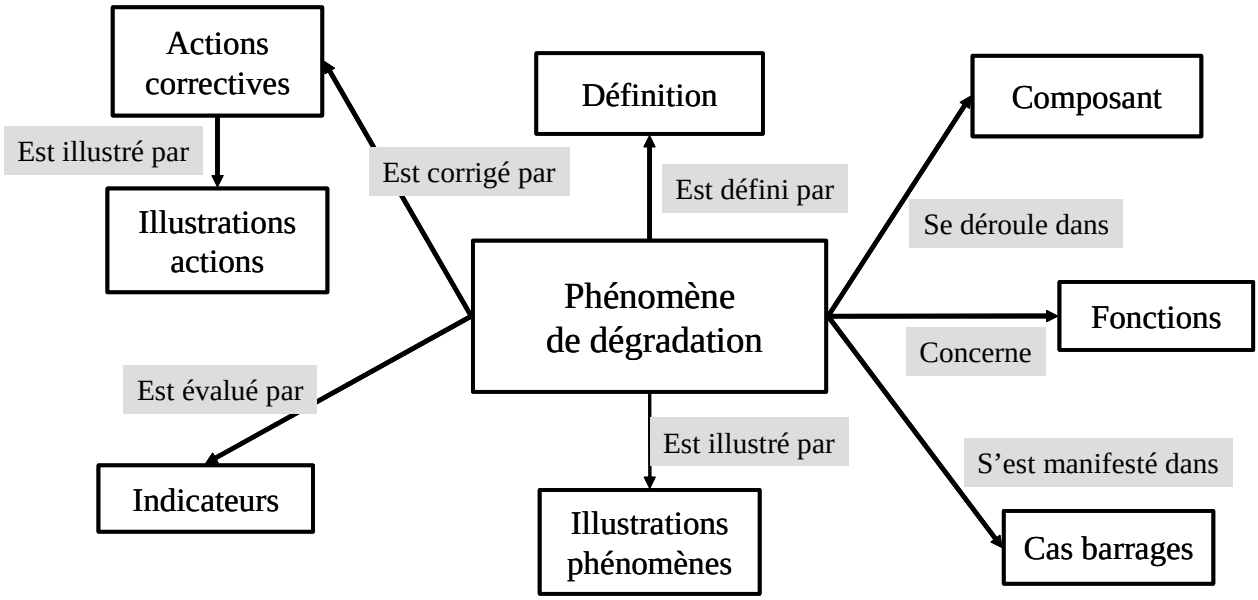


Figure 15 : Les différents champs de la base de connaissances et leurs relations sémantiques

2.2 Instanciation et validation

Nous allons présenter les fonctions, composants et phénomènes identifiés pour renseigner les trois tables correspondantes pour le cas des barrages en remblai qui est le seul cas actuellement traité. Ces données ont été présentées à quatre experts au cours d'une séance qui a permis de valider :

- la liste des différents phénomènes de dégradation ainsi que leur définition et leurs origines ;
- les composants touchés par ces phénomènes ;
- une partie des actions correctives à mettre en œuvre. La validation de cette base doit être poursuivie, au niveau notamment des actions correctives dont la liste n'est pas exhaustive pour l'heure.

Les champs ont été renseignés pour les ouvrages en remblai à étanchéité interne et à masque amont.

2.2.1 Table des fonctions

Huit fonctions apparaissent dans la table « Fonctions ». Elles correspondent aux fonctions définies lors des recueils d'expertise pour l'évaluation de la performance :

- fonction de protection du dispositif d'étanchéité ;
- fonction d'étanchéité ;
- fonction de drainage ;
- fonction de résistance à l'érosion interne ;
- fonction de résistance à l'érosion interne liée aux ouvrages traversants ;

- fonction de résistance au glissement ;
- fonction d'évacuation des crues ;
- fonction de résistance à la surverse.

2.2.2 Table des composants

Onze composants ont été retenus pour un barrage à étanchéité interne :

- protection amont ;
- remblai amont ;
- remblai aval ;
- système d'étanchéité du remblai (noyau, paroi mince, barrage homogène) ;
- crête ;
- dispositif de drainage vertical ;
- dispositif de drainage horizontal ;
- fondation amont ;
- système d'étanchéité des fondations (étanchéité naturelle, paroi moulée, tapis imperméable, clé d'étanchéité, injections/voile d'étanchéité) ;
- fondation aval (fondation située au-delà du système d'étanchéité des fondations) ;
- ouvrage traversant (conduite, galerie, évacuateur de crues).

Huit composants ont été retenus pour les barrages à étanchéité amont :

- masque amont et sa protection ;
- remblai ;
- système d'étanchéité des fondations (étanchéité naturelle, paroi moulée, tapis imperméable, clé d'étanchéité, injections/voile d'étanchéité) ;
- fondation ;
- crête ;
- dispositif de drainage en élévation (vertical ou incliné) ;
- dispositif de drainage horizontal ;
- ouvrage traversant (conduite, galerie, évacuateur de crues).

Chaque composant remplit une ou plusieurs fonctions.

2.2.3 Table des phénomènes de dégradation

Neuf phénomènes de dégradation ont été identifiés puis validés par le groupe de quatre experts :

- déformation ;
- insuffisance de la capacité de drainage ;
- dissolution ;

- infiltrations d'eau excessives ;
- érosion externe ;
- érosion interne ;
- fissuration ;
- sous pression excessives ;
- glissement.

Certains phénomènes, tels que le colmatage, avaient, dans un premier temps, été considérés comme indépendants. Dans un souci de simplification de la base de connaissances, ces derniers ont été intégrés à une famille de phénomène d'une granularité supérieure : le phénomène « colmatage » a été intégré à la famille « insuffisance de la capacité de drainage ». Ceci permet de limiter le nombre de phénomènes de dégradations des fonctions. Ces renseignements de granularité inférieure sont fournis dans la rubrique « description et origines des phénomènes ».

Il faut noter que tous les composants ne sont pas affectés par tous les phénomènes : par exemple, l'insuffisance de la capacité de drainage ne concerne que le système de drainage. Par contre, certains phénomènes, telle que la déformation, touchent tous les composants du barrage. Les Tableaux suivants présentent les composants affectés par chacun des phénomènes pour l'exemple des remblais à étanchéité interne (Tableau 10) et celui des remblais à étanchéité amont (Tableau 11).

Par ailleurs certains phénomènes peuvent être observés sur un composant, mais ne vont pas nuire à la stabilité de l'ouvrage : par exemple, la fissuration de la protection amont n'est pas référencée ici car pour un barrage en remblai à étanchéité interne elle n'entraînera pas de conséquences vis-à-vis de la stabilité de l'ouvrage. Par contre, pour un barrage en remblai à masque amont, la fissuration de la protection du masque est prise en compte.

Deux champs sont communs à la base de connaissance et à l'outil de quantification de la performance des barrages : les indicateurs et les fonctions (cf. Figure 15). Les mêmes termes sont employés au niveau des instances afin de faciliter le passage d'un outil à l'autre lors des utilisations et lors des implémentations informatiques futures

Composants/ Phénomènes	Fondation amont	Fondation aval	Drain horizontal	Drain vertical	Galerie Conduite	Voile d'étanchéité	Noyau étanche	Protection amont	Crête	Remblai amont	Remblai aval
Déformation	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Insuffisance de la capacité de drainage			X	X							
Dissolution	X	X				X					
Infiltration d'eau excessive			X	X			X		X	X	X
Erosion externe								X	X	X	X
Erosion interne	X	X			X		X			X	X
Fissuration	X	X			X	X	X		X	X	X
Sous pression excessive		X					X			X	X
Glissement	X	X								X	X

Tableau 10 : Composants concernés par les phénomènes de dégradation - Remblais à étanchéité interne

Composants/ Phénomènes	Fondation	Drain horizontal	Drain vertical	Galerie Conduite	Voile d'étanchéité	Masque amont et sa protection	Crête	Remblai
Déformation	X	X	X	X	X	X	X	X
Insuffisance de la capacité de drainage		X	X					
Dissolution	X				X	X		
Infiltration d'eau excessive	X	X	X				X	X
Erosion externe						X	X	X
Erosion interne	X			X				X
Fissuration	X			X	X	X	X	X
Sous pression excessive	X							X
Glissement	X							X

Tableau 11 : Composants concernés par les phénomènes de dégradation - Remblais à étanchéité amont

Chapitre 3 – Analyse et prise en compte des imperfections dans l'évaluation de la performance

1. Analyse des imperfections

Des imperfections entachent les données d'entrée du modèle d'évaluation de la performance. Ces imperfections ont différentes origines qu'il est intéressant d'identifier puis de quantifier pour deux raisons principales. Premièrement, cette analyse constitue une aide pour déterminer à terme des actions de correction des facteurs d'imperfections (remplacement d'un instrument en panne ou installation de nouveaux instruments d'auscultation par exemple). Deuxièmement, elle donne des clés pour comprendre le format de représentation des imperfections adopté par l'expert (par exemple le choix de l'intervalle [3,5] plutôt que la note précise 4 ou l'intervalle [3,4]).

1.1 Types de données

Les indicateurs sont de différentes natures : visuels, d'auscultation, calculés et de conception ou réalisation. Pour affecter des notes aux indicateurs, les experts traitent un certain nombre de données et d'informations initiales : inspection visuelle, données d'auscultation, informations et données présentes dans le dossier du barrage… Nous nous proposons d'organiser les différentes données manipulées selon la classification proposée par (Talon, 2006). Dans ce travail, trois types de données sont étudiées : les données de base qui permettent d'obtenir une donnée brute qui permettra d'obtenir une donnée élaborée décrite sur une échelle normalisée ce qui assure ensuite la possibilité de réaliser unification et combinaison (cf. Figure 16). Citons un exemple donné par cet auteur : une étude statistique (données de base) a permis d'établir que la durée de durcissement du joint en silicone était compris entre 15 et 20 ans (donnée brute). La donnée élaborée se présente sous la forme d'une fonction d'appartenance qui prend la forme d'un intervalle qui vaut 1 pour les valeurs comprises entre 15 et 20 et 0 ailleurs.

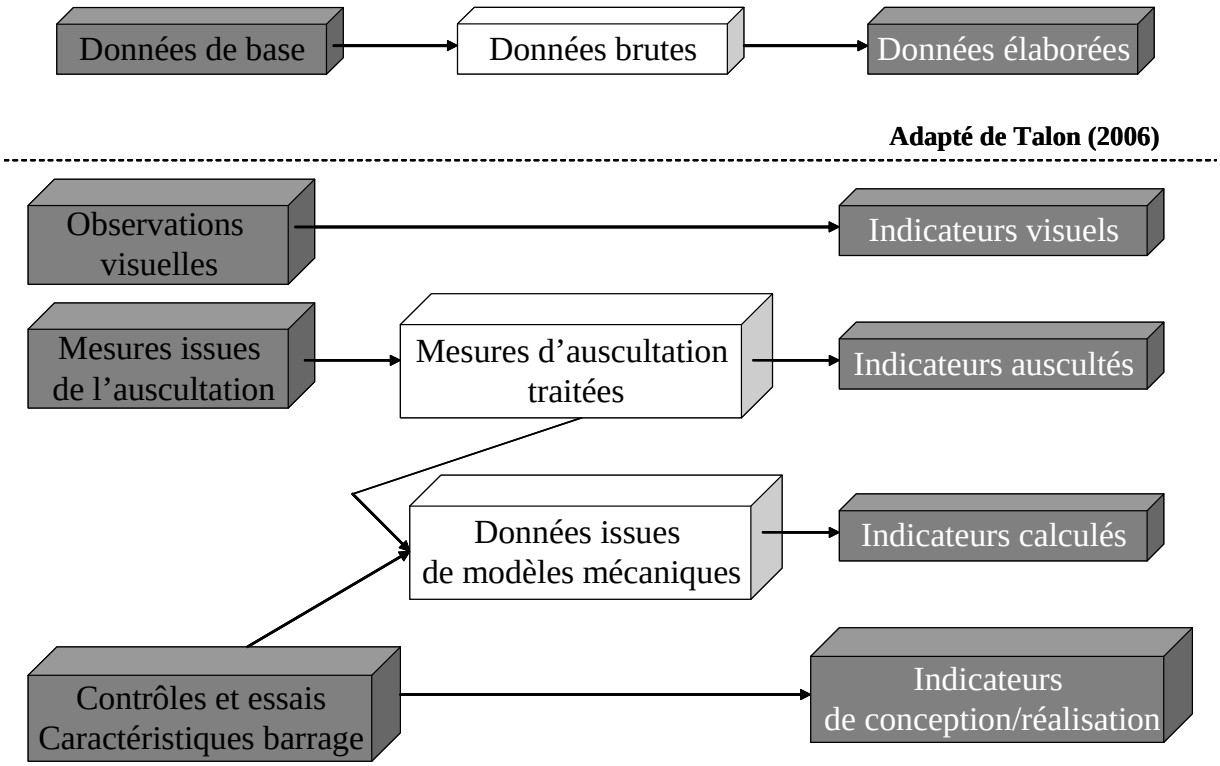


Figure 16 : Données de base, données brutes et données élaborées

Dans notre application, nous retrouvons également ces trois types de données et nous considérons :

- les mesures issues des capteurs d'auscultation, les mesures visuelles et les données issues du dossier du barrage (contrôles, essais, caractéristiques géométriques…) comme étant des données de base ;
- les mesures d'auscultation traitées et les données issues de modèles mécaniques comme étant des données brutes ;
- l'ensemble des indicateurs comme étant des données élaborées.

Chacun de ces types est associé à des caractéristiques qui influencent sa fiabilité et son informativité. L'objectif est ici de déterminer les sources d'imperfections qui peuvent être associées :

- aux données de base ;
- au traitement permettant de transformer les données de base en données brutes.

Pour tous les types d'indicateurs, la fiabilité des données élaborées ne dépend que de la « qualité » de l'expert puisqu'il s'agit d'une « traduction » réalisée par l'expert des imperfections des données de base ou de données brutes en données élaborées c'est-à-dire les indicateurs (cf. Figure 16). L'informativité des données élaborées est quant à elle liée à la qualité des données de base et des données brutes ainsi qu'à la « qualité » de l'expert. Nous faisons l'hypothèse que la masse de qualité associée à la notation de l'expert est constante d'un expert à l'autre. Nous ne nous intéressons donc pas à cette étape de la transformation des données.

Le paragraphe suivant présente la démarche que nous avons adoptée ainsi que les méthodes associées à chacune des étapes.

1.2 Démarche

Notre démarche comporte quatre phases principales (cf. Figure 17).

Une analyse du système et de ses défaillances pour identifier les sources d'imperfections par type d'indicateurs (visuels, auscultés, calculés et de conception/réalisation), et ceci pour les différents types de données concernées (de base et brutes). Dans notre travail, cette identification est établie à partir d'une analyse du système et de ses défaillances. Pour développer cette approche, nous nous inspirons de démarches de l'analyse de risque qui ont été mises en œuvre dans le cadre du génie civil : pour les bâtiments (Lair, 2000 ; Talon, 2006) et pour les ouvrages hydrauliques (Peyras *et al.*, 2006 ; Serre *et al.*, 2006) : analyse structurelle, analyse fonctionnelle, AMDE. Ces travaux ont été menés sur les ouvrages proprement dits. La méthode est ici étendue au cas du système de mesure et de traitement des données.

Pour mener l'analyse du système et de ses défaillances, les trois méthodes citées ci-dessus ont des apports spécifiques et complémentaires. L'analyse structurelle assure une décomposition du système en composants élémentaires. L'analyse fonctionnelle permet ensuite de connaître les fonctions qui doivent être remplies par les composants. Enfin, les modes de défaillances des composants et leurs effets (conséquences) sont systématiquement identifiés grâce à l'AMDE. Il s'agit dans cette dernière phase de rechercher les modes de dysfonctionnements du système, avec une méthode rigoureuse, exhaustive et éprouvée depuis plus de quarante ans. Le Tableau 12 donne un extrait d'une AMDE appliquée aux barrages poids. Ce Tableau provient de la thèse de L. Peyras (Peyras, 2003).

n°	Composant	Opération du processus	Mode de défaillance	Effets possibles de la défaillance du processus
1	Fondations amont injectées	CONCEPTION * Reconnaissances géologiques et géotechniques * Etudes géologiques et géotechniques * Etudes de renforcement des fondations	* Reconnaissances insuffisantes * Etudes géologiques insuffisantes * Etude du renforcement des fondations insuffisante	* Erreurs possibles du projet : - Fondations amont diaclasées ou fissurées - Capacité portante faible - Présence de poches d'argile - Présence de plans de glissement horizontaux
		REALISATION * Réalisation des excavations	* Excavations non conformes aux études * Contrôle géotechnique insuffisant après excavations	* Résistance mécanique superficielle faible * Partie superficielle des fondations fissurées
		* Réalisation des forages	* Forages non conformes aux études	* Mauvais traitement des fondations amont * Résistance au cisaillement faible * Capacité portante faible * Fenêtre dans le voile d'injection
		* Réalisation des injections	* Injections non conformes aux études	

Tableau 12 : AMDE processus adaptée aux barrages poids (extrait)

Pour plus de précision sur ces méthodes de la sûreté de fonctionnement, nous renvoyons le lecteur vers (Villemeur, 1988).

L'analyse des modes de défaillance va nous permettre de déduire des caractéristiques de qualité associées à chacun des types d'indicateurs. Par exemple, pour un indicateur ausculté, on peut citer comme modes de défaillance, « localisation des instruments mal adaptée » et « nombre insuffisant de données traitées » qui mènent aux caractéristiques « localisation de l'instrument » et « nombre de données traitées ».

La définition de l'échelle de notation de chacune de ces caractéristiques. Par exemple, sur une échelle de 0 à 5, on donnera une note de 3 si la localisation du capteur est optimale, une note de 2 si elle est en légère déviation, une note de 1 si elle est en forte déviation… Des échelles de caractérisation de la qualité de données ont été développées pour les données caractérisant la durabilité de produits du bâtiment (Lair, 2000 ; Talon, 2006). Ces deux auteurs ont proposé des adaptations de l'outil NUSAP (Numerical Unit Spread Assessment Pedigree) décrit par Funtowicz et Ravetz (1990).

La quantification de la masse de qualité d'un indicateur donné obtenue par une formule de combinaison de la note obtenue par les différentes caractéristiques de cet indicateur.

La grille obtenue est validée au cours d'une séance de confrontation de la grille aux experts. Si la grille est validée par le groupe, on considère que les origines des imperfections sont identifiées et leur quantification est possible. Sinon, des modifications sont introduites dans la définition des critères de qualité et/ou l'échelle de notation et/ou la combinaison des caractéristiques.

Le résultat opérationnel prévu est le développement d'une grille d'analyse des imperfections permettant d'associer à chaque indicateur une masse de qualité.

En parallèle, des données sur les causes d'imperfections sont directement recueillies auprès d'experts lors de séances de notation d'indicateurs sous une forme floue. Ces informations permettent de faire une première validation de la grille d'analyse des causes des imperfections.

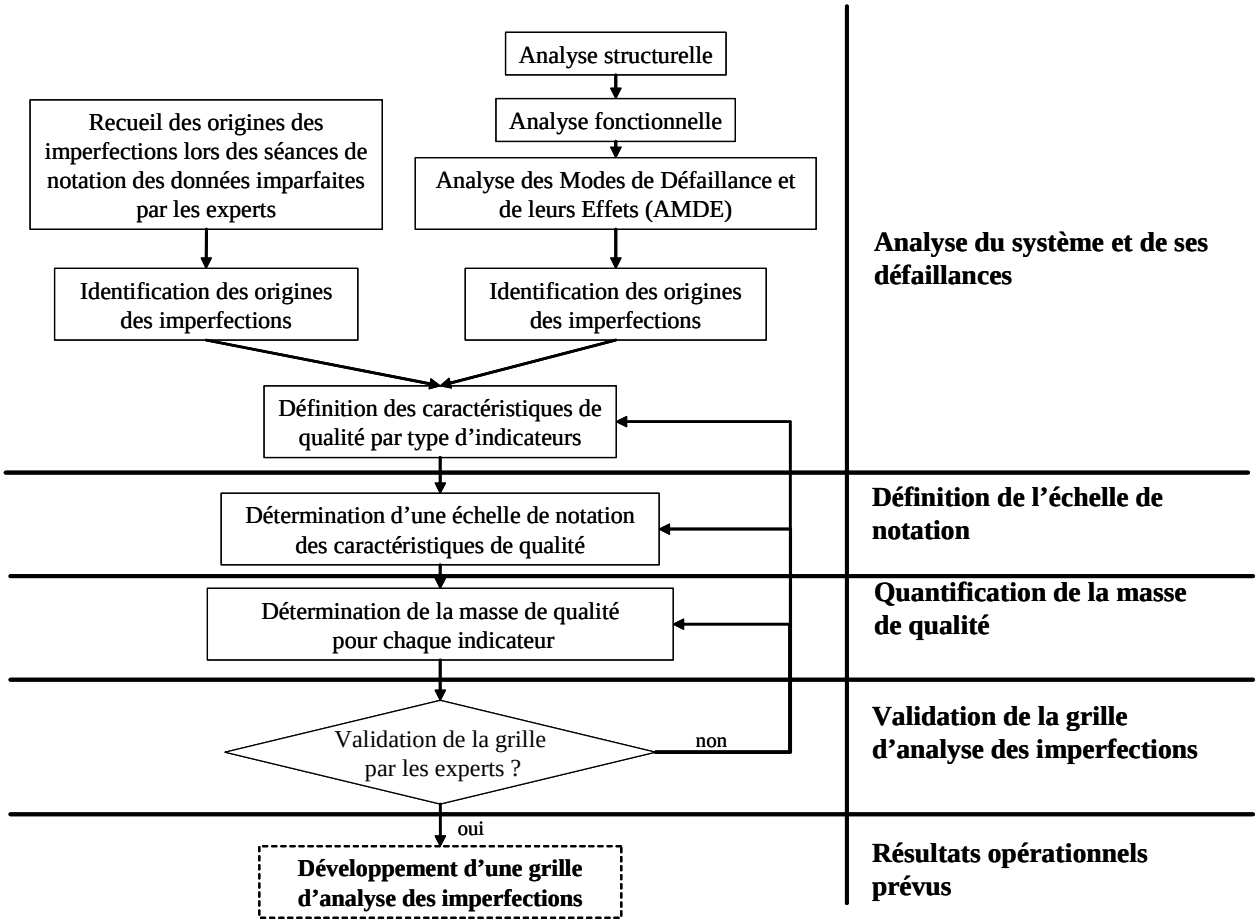


Figure 17 : Démarche d'identification et de quantification des origines des imperfections des données

La démarche d'analyse des imperfections sera appliquée dans la Partie 3 pour les différentes données brutes et données de base listées sur la Figure 16.

2. Prise en compte des imperfections

2.1 Présentation de la méthodologie

Comme nous l'avons précisé ci-dessus, les indicateurs sont considérés comme des « données élaborées ». Ils sont obtenus à la suite d'une chaîne de traitement partant de « données de base » et passant éventuellement par un stade de « données brutes » (cf. Figure 16). Dans ce chapitre, nous nous intéressons uniquement aux données élaborées c'est-à-dire aux indicateurs.

Notre méthodologie se déroule selon trois étapes qui consistent :

- à représenter les données entachées d'imperfections : il est demandé à l'expert de déclarer la distribution de possibilité correspondant à l'évaluation de chacun des indicateurs (§ 3) ;
- à propager les distributions de possibilité dans le modèle en tenant compte des opérateurs et règles définis par les experts pour agréger les informations (§ 4) ;
- à fournir l'évaluation finale qui peut être exprimée sous la forme d'une distribution de possibilité ou sous la forme d'une note précise obtenue par un procédé de défuzzification (§ 5).

Cette démarche est testée sur des exemples dans le but :

- de vérifier la faisabilité et l'intérêt d'une telle approche auprès des futurs utilisateurs ;
- de comparer les réponses des différents experts : nous cherchons à vérifier l'homogénéité du groupe, comme nous l'avions fait pour la notation sous forme précise ;
- de comparer les réponses données par l'algorithme à la réponse donnée par les experts.

2.2 Représentation des données entachées d'imperfections

2.2.1 Etapes de la démarche

La Figure 18 représente les quatre étapes proposées pour obtenir la représentation des distributions de possibilité :

- préparation des séances par l'animateur ;
- séance individuelle au cours desquelles l'expert déclare les distributions de possibilité pour chacun des indicateurs testés. L'expert a à sa disposition la grille des indicateurs formalisés (cf. Chapitre 1 de la même Partie) ;
- traitement, par l'animateur, des résultats obtenus pendant les séances individuelles ;
- séance collective de présentation des résultats à laquelle participent l'animateur et l'ensemble des experts.

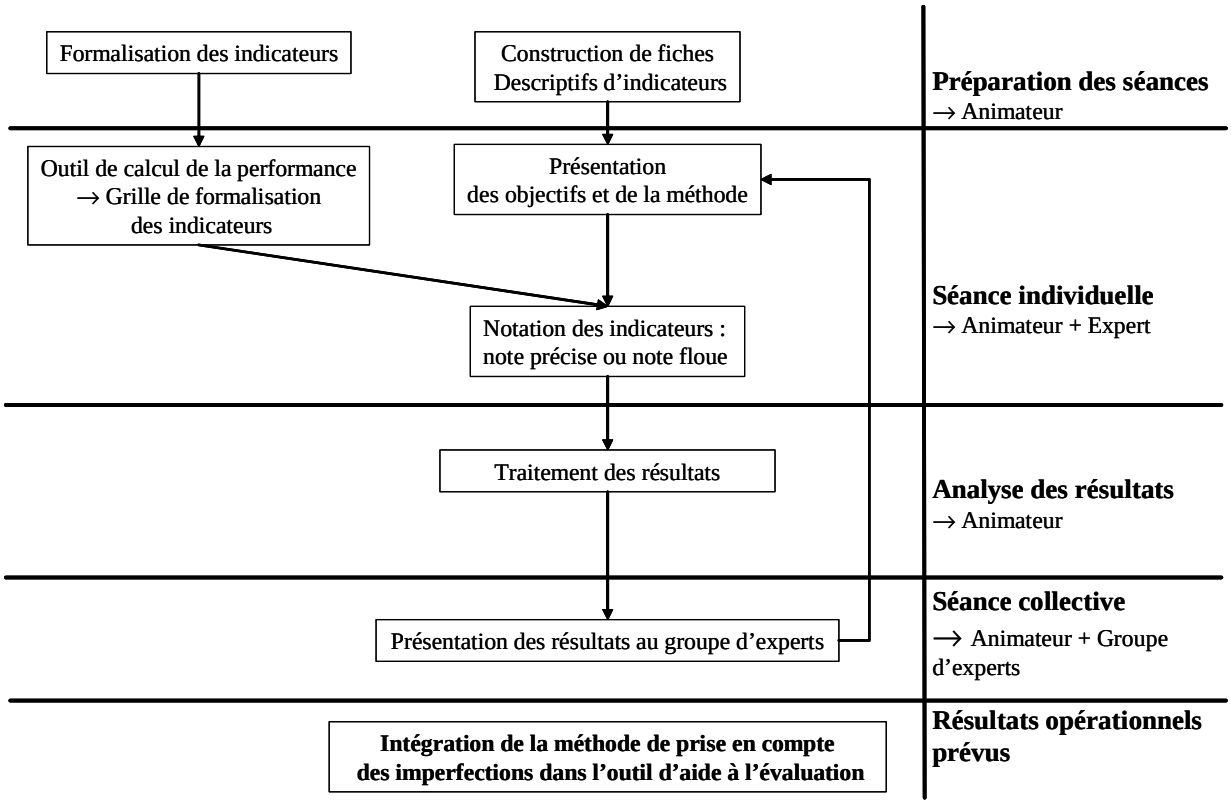


Figure 18 : Etapes de la démarche de déclaration des imperfections des mesures

Un résultat pratique attendu est l'intégration de la méthode de prise en compte des imperfections dans l'outil d'aide à l'évaluation de la performance. Il faut noter qu'un nombre important de dossiers devra être traité par cette voie avant de pouvoir considérer la méthode comme totalement opérationnelle.

Les étapes de la démarche sont détaillées dans les paragraphes suivants.

2.2.2 Préparation des séances

Nous avons élaboré des fiches descriptives d'indicateurs, qui sont présentées aux experts lors de la séance individuelle. Elles sont rédigées selon le plan type (cf. Figure 19) :

- description du barrage en quelques lignes : type de barrage, date de première mise en eau, type de matériaux du barrage, type de fondation, volume de la retenue, hauteur de la crête, fruits des talus… ;
- description de l'indicateur en quelques paragraphes ;
- quelques photographies pour les indicateurs visuels.

Indicateur n° 1

1) Description du barrage

Le barrage V1-BAR1 est un petit ouvrage dont la première mise en eau date de 1979. Il est fondé sur des matériaux alluvionnaires. Il est constitué d'un remblai de 8 mètres de hauteur étanché par un masque amont réalisé par géomembrane confinée. Les fruits amont et aval sont respectivement de 2,5 et 2. Le volume retenu est de 350 000 m3.

L'étanchéité amont du remblai est obtenue par membrane Colétanche, confinée sous une couche de 2 m de graves type tout-venant et rip-rap en enrochements jusqu'à la cote RN.

2) Description de l'indicateur à noter

Le Rip Rap est formé de petits enrochements, qui se sont déplacés vers le bas par rapport à leur position originelle, sous l'effet du batillage. Cette couche de Rip Rap est maintenant fortement dégradée. Nous remarquons ainsi une marche d'érosion externe dans la zone de marnage (autour de la cote RN). Cette marche est assez importante et atteint quelques décimètres.





Figure 19 : Exemple de fiche descriptive d'indicateur

2.2.3 Séance individuelle

Pour ces séances individuelles sont présents un expert et l'animateur : ce dernier retranscrit, sous la forme d'une distribution de possibilité, les informations données par l'expert, et ce pour chacun des indicateurs identifiés.

Les séances individuelles se déroulent en deux temps : un court exposé est fait par l'animateur de la séance en préalable à la notation proprement dite. Cette présentation d'une quinzaine de minutes vise à expliciter l'objectif de la séance, la signification des distributions de possibilité, les formes de distribution autorisées et les attendus de la séance. Elle permet aussi à l'expert de poser des questions afin d'éclaircir des points qui seraient obscurs.

2.2.3.1 Présentation de la séance

a) Objectif de la séance

L'objectif de la méthode est donné en début de séance de la manière suivante : « jusqu'à présent, une notation précise était imposée par le système. Par exemple l'indicateur « Fuite » est égal à 8, l'indicateur « Piézométrie » est égal à 0… Mais du fait de sources d'imperfection telles qu'un parement aval mal entretenu (arbustes, arbres) qui gêne l'observation, il peut être difficile d'affecter une note précise. L'objectif de la séance est de vérifier s'il est possible et pertinent de représenter dans un formalisme pré-établi (distributions de possibilité) les imperfections attachées aux indicateurs ».

b) Explication sur la signification des distributions de possibilité

Une distribution de possibilité décrit la possibilité qu'une variable prenne la valeur x. Elle est numériquement égale à la fonction d'appartenance d'un sous-ensemble flou normalisé. Sur la Figure 20, a été représentée en exemple la distribution de possibilité d'un indicateur I évalué par un expert :

- les notes de 4 à 5 représentent les valeurs les plus vraisemblables de l'indicateur. Cette représentation est téméraire mais informative. Cet intervalle correspond au sous-ensemble dans lequel l'expert pense que la valeur réelle a le plus de chance de se trouver. Il correspond au noyau du sous-ensemble flou défini par :

$$\mathrm{Noy(I)} = \left\{ x \in X \middle| \mu_I(x) = 1 \right\} \qquad \text{(Equation 11)}$$

- les notes de 2 à 7 représentent l'ensemble des valeurs possibles de l'indicateur. Cette représentation est prudente mais peu informative. Cet intervalle correspond au sous-ensemble dans lequel l'expert est certain que la valeur réelle se trouve. Il correspond au support défini par :

$$\mathrm{Supp(I)} = \left\{ x \in X \middle| \mu_I(x) > 0 \right\} \qquad \text{(Equation 12)}$$

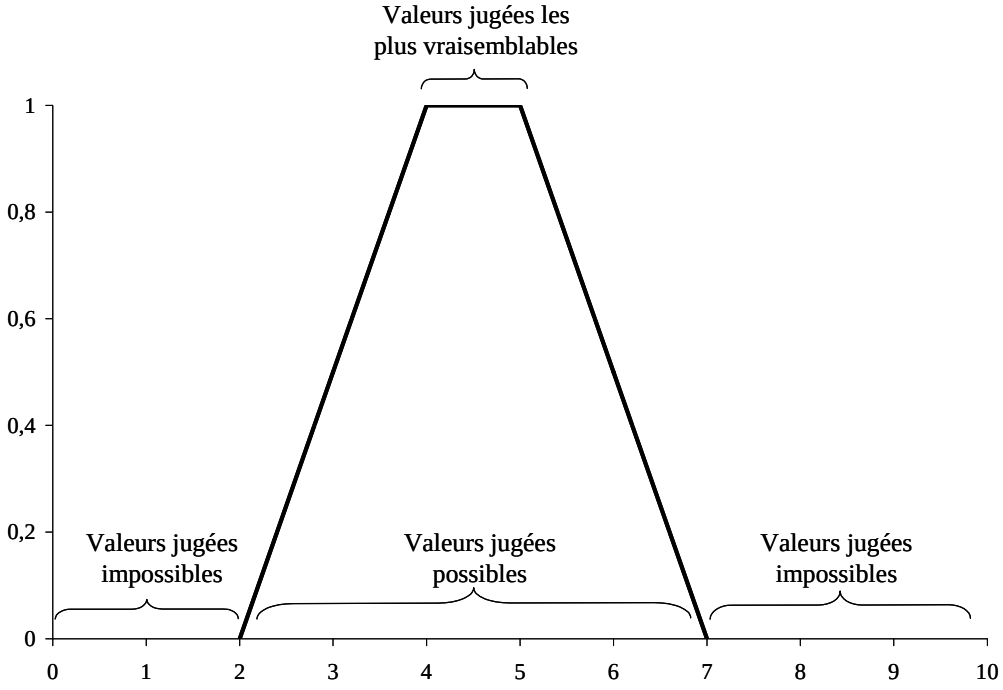


Figure 20 : Exemple de distribution de possibilité trapézoïdale

Le noyau d'une distribution triangulaire ne contient qu'une seule valeur qui est la valeur la plus vraisemblable sur l'échelle de notation.

c) Formes de distribution autorisées

La quantification des imperfections requiert, dans un premier temps, une connaissance de leur format de représentation. Nous proposons de travailler avec un nombre limité de formats qui seront proposés aux experts : intervalles précis ou flous (distribution trapézoïdale), valeurs précises ou floues (distribution triangulaire). Ces formats sont schématisés sur la Figure 21.

Dans un deuxième temps, il s'agit d'affecter les valeurs caractéristiques pour paramétrer la distribution pour chaque donnée : valeur de la note précise, bornes de l'intervalle précis, noyau et support dans le cas d'une note ou d'un intervalle flous. Ainsi :

- l'indicateur I1 a été évalué par le nombre précis 4 ;
- l'indicateur I2 par un intervalle précis [6, 9] ;
- l'indicateur I3 par un nombre flou de support [7, 10] et de noyau 7…

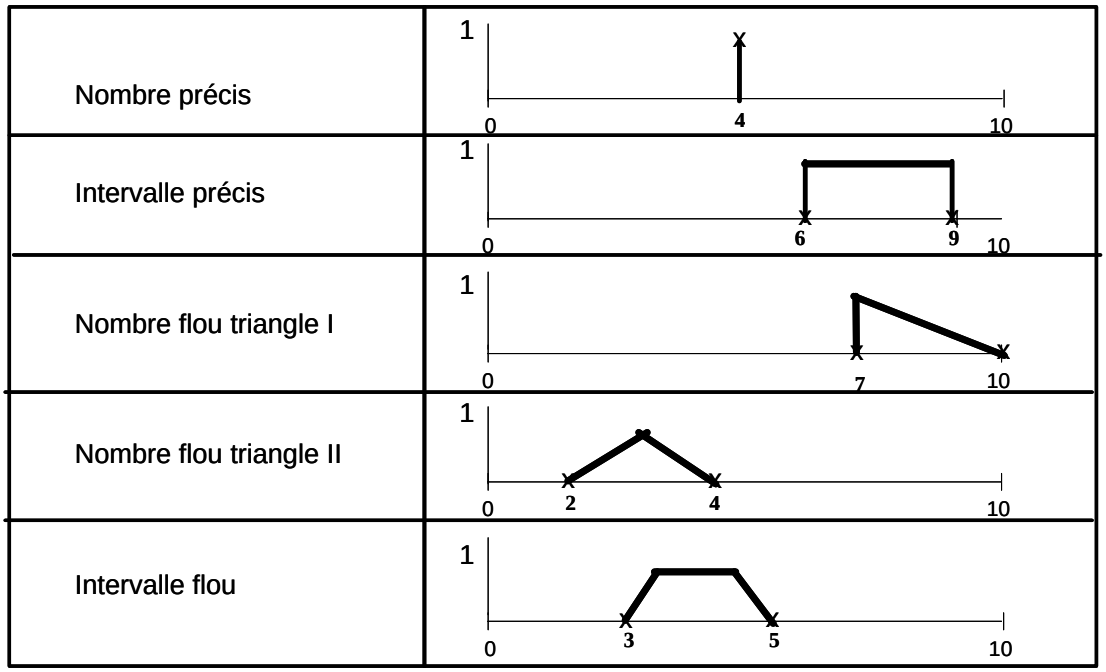


Figure 21 : Différents formats retenus pour la représentation des imperfections

d) Attendus de la séance

Les attendus de la séance de notation des imperfections sont exposés à l'expert. Il s'agit :

- de noter les indicateurs sous une forme précise lorsque c'est possible sinon, sous une forme imparfaite ;
- de formuler des critiques et commentaires généraux sur la méthode.

2.2.3.2 Recueil des résultats

Le procédé décrit ci-après est répété pour tous les indicateurs.

La séance d'évaluation commence à la suite de la présentation des objectifs de l'exercice. Les fiches décrivant les indicateurs sont distribuées à l'expert qui énonce à voix haute son analyse selon deux angles :

- une forme littérale de la notation : « la note de l'indicateur Fuite doit être comprise entre 7 et 10 et le plus vraisemblable est qu'elle soit comprise entre 7 et 8 » ce qui correspond à un trapèze de noyau [7, 8] et de support [7, 10]. Au cours de la séance, les experts finissent en général par formuler directement leur note sous forme floue « la note est un trapèze de base [7, 10] et de noyau [7,8] ») ;
- les causes d'imperfections qui justifient son impossibilité à affecter une note précise à l'indicateur. Ces informations sont comme nous l'avons vu plus haut utilisées dans le cadre de l'analyse des origines des imperfections.

Ces éléments sont retranscrits par l'animateur : la distribution de possibilité est tracée sur un diagramme et les informations sur les origines des imperfections sont notées sous la forme de phrases. En voici quelques exemples : « on ne sait pas si le fontis est récent ou ancien », « on a une information incomplète car certains profils n'ont pas pu être inspectés », « on ne connaît pas la position de la fente de fluage par rapport à la cote normale des eaux, ni le nombre de couches de béton bitumineux concernées ».

2.2.4 Procédure de validation des résultats de la représentation des imperfections

La méthode de prise en compte des imperfections doit être validée. Nous présentons ci-dessous la procédure que nous avons développée à cet effet. Deux résultats principaux sont extraits à partir des notes fournies par les experts au cours des sessions individuelles :

- une comparaison des notes obtenues à l'issue de la séance de notation des imperfections avec les notes obtenues lors d'une séance de notation sous un format déterministe ;
- une comparaison des notes données par plusieurs experts à un même indicateur.

2.2.4.1 Comparaison des notes imparfaites à une note précise

Nous effectuons une comparaison des notes obtenues lors de la séance de notation des imperfections avec celles enregistrées lors d'une séance, réalisée auparavant, au cours de laquelle les experts devaient fournir une note précise[7]. Ce test a pour objet de vérifier si les notations des experts présentent une bonne cohérence au cours du temps. Nous sommes dans le cadre de la répétabilité des résultats.

La note précise est positionnée sur la distribution de possibilité et le résultat est qualifié par les termes : « la note précise appartient au noyau » (cas 1), « la note précise appartient au support mais n'appartient pas au noyau » (cas 2), « la note précise n'appartient pas au support ». La Figure 22 montre des exemples de cette analyse (cas 3).

[7] Cette comparaison est possible car nous avons utilisé, pour la notation des imperfections, les fiches que nous avions élaborées pour la séance de validation de la méthode d'évaluation de la performance.

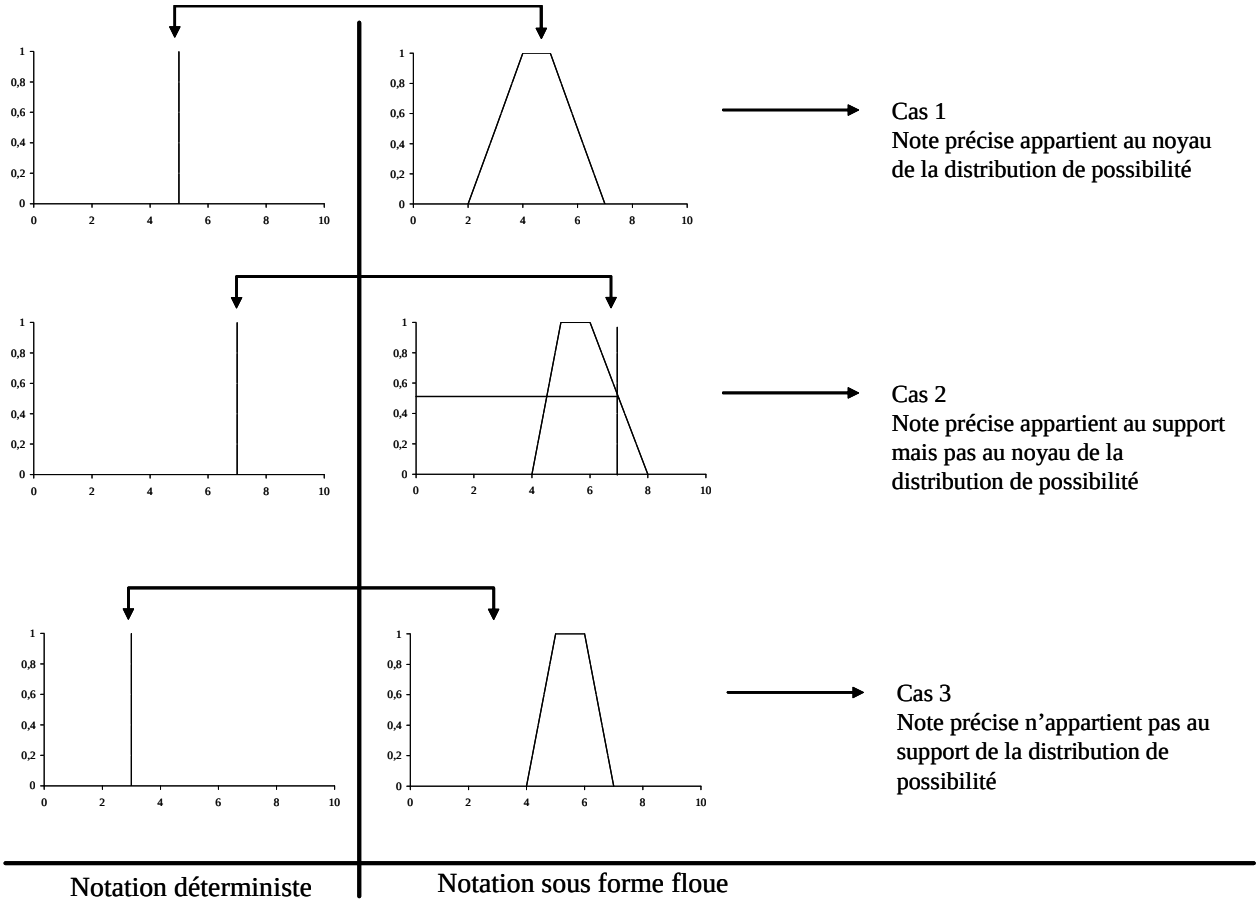


Figure 22 : Comparaison qualitative des notes précises et des distributions de possibilité

Dans le cas 2, afin de préciser sa position, nous employons la représentation des sous-ensembles flous sous la forme L-R : un intervalle flou (L-R) est un sous-ensemble flou $\tilde{A}$ de R défini par la fonction d'appartenance suivante :

$$\forall x \in \Re \qquad \begin{cases} L\left(\dfrac{a-x}{\alpha}\right) \text{ si } x \in]a-\alpha, a[\\ 1 \text{ si } x \in [a, b] \\ R\left(\dfrac{x-b}{\beta}\right) \text{ si } x \in]b, b+\beta[\\ 0 \text{ sinon} \end{cases} \qquad \text{(Equation 13)}$$

où a et b sont deux réels positifs et L et R sont deux fonctions de]0,1] dans [0,1[. L'intervalle flou $\tilde{A}$ est alors noté : $(a, b, \alpha, \beta)_{LR}$. La Figure 23 explicite les réels a, b, α et β.

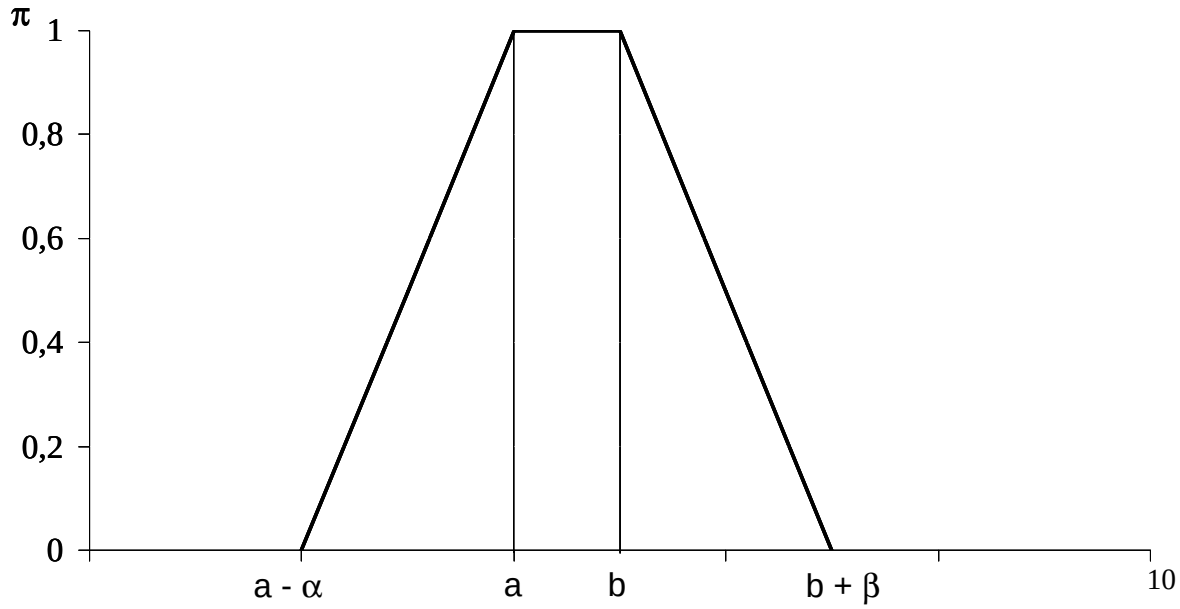


Figure 23 : Exemple d'intervalle flou sous la forme L-R

Toujours dans ce même cas n° 2, nous fournissons le degré d'appartenance de la note précise à la distribution de possibilité. Par exemple, sur la Figure 22, la note précise 7 appartient à la distribution de possibilité avec un degré de 0,5. Le résultat indiqué sera donc 0,5.

2.2.4.2 Comparaison des notes données par les différents experts

Nous avons à notre disposition un ensemble de distributions de possibilité déclarées par chaque expert. Nous souhaitons comparer ces distributions c'est-à-dire exprimer un degré de compatibilité entre une même évaluation faite par deux ou plusieurs experts. Pour ce faire, nous développons une méthode d'analyse comparative des distributions de possibilité.

Soient $\tilde{A}_1$ et $\tilde{A}_2$ deux distributions de possibilité déclarées respectivement par l'expert E1 et par l'expert E2 pour un même indicateur, sur un cas particulier. Soient $S_{\tilde{A}1}$ et $S_{\tilde{A}2}$ les surfaces associées à ces distributions et $S_{\tilde{I}}$, la surface du sous-ensemble flou $\tilde{I} = \tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2$:

$$\mu_{\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2}(x) = \min(\mu_{\tilde{A}_1}, \mu_{\tilde{A}_2}) \qquad \text{(Equation 14)}$$

Le degré de compatibilité entre l'expert E1 et l'expert E2 pour l'indicateur Ii est calculé par :

$$DC_{I_i}^{E1-E2} = \frac{S_{\tilde{I}}}{S_{\tilde{A}1} + S_{\tilde{A}2} - S_{\tilde{I}}} \times 100 \qquad \text{(Equation 15)}$$

La Figure 24 illustre la méthode de détermination du degré de compatibilité entre deux distributions de possibilité. Sur cet exemple, $S_{\tilde{A}1} = 2$, $S_{\tilde{A}2} = 2$ et $S_{\tilde{I}} = 0{,}5$ $DC_{I_i}^{E1-E2} = 14{,}3\,\%$.

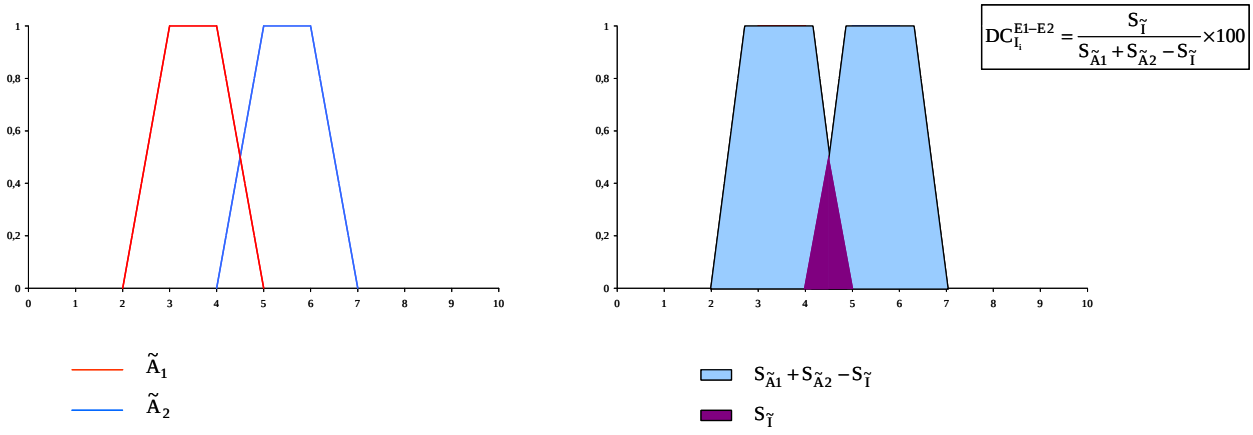


Figure 24 : Démarche de détermination du degré de compatibilité entre deux notations

Le degré de compatibilité s'exprime en pourcents. Si les deux distributions $\tilde{A}_1$ et $\tilde{A}_2$ sont complètement superposées, le degré de compatibilité est égal à 100 % ce qui traduit l'accord parfait entre les deux évaluations. Au contraire, si l'intersection est l'ensemble vide, le degré de compatibilité est égal à 0 % ce qui traduit un désaccord total entre les deux évaluations. Toutes les valeurs entre 0 et 100 % sont possibles.

Trois situations particulières peuvent être rencontrées :

- si les deux évaluations sont des notes précises, deux valeurs sont alors uniquement possibles :

  $\Rightarrow$ 0 % dans le cas où les notes sont différentes ;

  $\Rightarrow$ 100 % dans le cas où les notes sont identiques ;

- lorsque l'un des experts donne une note précise tandis que l'autre expert donne une distribution de possibilité. Nous ne pouvons alors pas mettre en œuvre les équations ci-dessus car il n'est pas possible de calculer une surface pour la note précise. Nous affecterons une note correspondant au degré d'appartenance de la note précise (donnée par l'un des experts) au sous-ensemble flou (fourni par l'autre expert). Par exemple, si le degré d'appartenance est de 0,5, nous considérerons la note 50 %. Si la note n'appartient pas au support, la note est de 0 % (le degré d'appartenance est dans ce cas égal à 0) et si elle appartient au noyau, la note est de 100 % (le degré d'appartenance est égal à 1). Toutefois, ces pourcentages ne sont pas du même niveau que les pourcentages calculés à partir de l'Equation 15. Pour différencier le cas où nous comparons une note précise à une note floue, nous indiquerons à côté du résultat « NP/NF » (Note Précise/Note Floue) ;

- si les deux notes sont des distributions de possibilité ayant comme intersection une valeur unique (cf. Figure 25), nous indiquons en résultat la lettre S pour « singleton ».

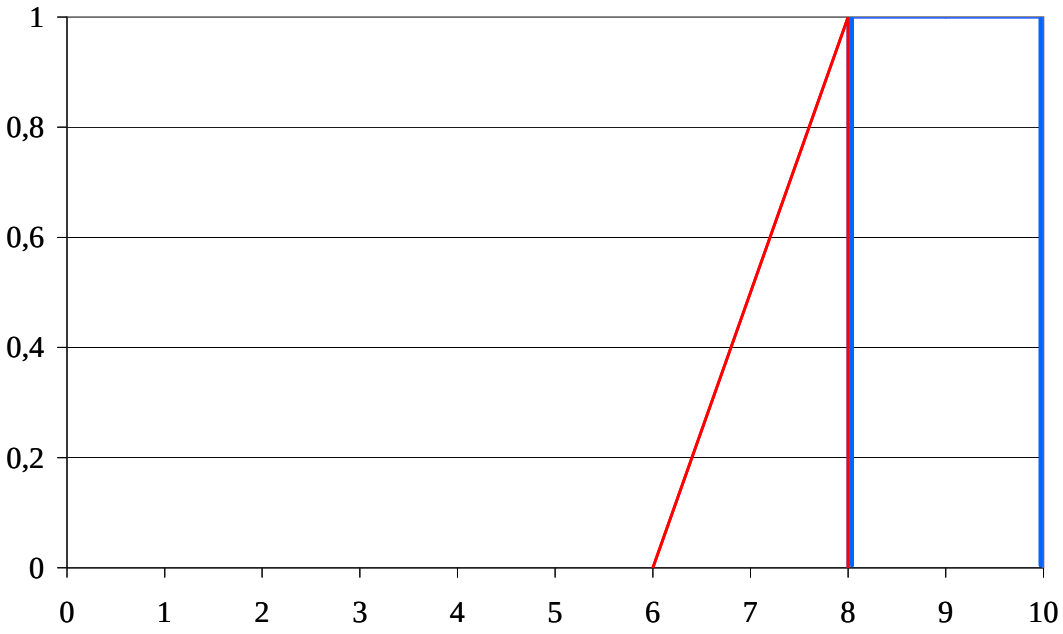


Figure 25 : Cas de deux distributions de possibilité dont l'intersection est un singleton

Nous avons présenté la méthode dans le cas où deux experts ont réalisé la notation. Nous pouvons généraliser l'Equation 15 au cas où n experts réaliseraient la notation de l'indicateur I ; nous obtenons l'Equation 16 qui définit un degré de compatibilité généralisé.

Soient $\tilde{A}_i$ (i = 1 à n) n distributions de possibilité déclarées par n experts Ei pour un indicateur Ik (k =1 à m). Soient $S_{\tilde{A}i}$ la surface associée à la distribution $\tilde{A}_i$ et $S_{\tilde{I}}$, la surface du sous-ensemble flou $\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2 \cap ... \cap \tilde{A}_n$. Soit $S_{\tilde{C}i,j}$ la surface du sous-ensemble flou $\tilde{A}_i \cap \tilde{A}_j$. Nous posons que le degré de compatibilité entre les n experts Ei pour l'indicateur Ik est calculé par :

$$DC_{Ik}^{n} = \frac{S_{\tilde{I}}}{\sum_{i=1}^{n} S_{\tilde{A}i} - \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=2}^{n} S_{\tilde{C}i,j} - S_{\tilde{I}}} \times 100 \qquad \text{(Equation 16)}$$

Pour le cas où des notes précises et/ou floues seraient fournies par un ou plusieurs experts, les conventions de notation décrites ci-dessus sont appliquées.

Cette méthode de comparaison est drastique et ne rend pas compte de l'écart entre des notes « incompatibles » : ainsi, dans le cas de deux notes précises différentes fournies par deux experts, la situation n'est pas la même si les notes données par les experts sont par exemple (5 et 6) correspondant à un écart de 1 point ou (3 et 9) correspondant à un écart de 6 points. Nous indiquerons donc dans le cas d'une incompatibilité de notes :

- l'écart entre deux notes précises ;
- l'écart entre la note précise et le noyau dans le cas d'une note précise et d'une note floue ;
- l'écart entre les deux noyaux dans le cas de deux notes floues.

Un seuil peut ensuite être fixé afin de conclure sur la compatibilité des deux notes.

2.3 Propagation des distributions de possibilité dans le modèle

2.3.1 Principe

Une fois les différents indicateurs représentés sous la forme d'une distribution de possibilité, l'étape suivante consiste à les agréger afin d'obtenir l'évaluation de la performance des différentes fonctions et l'évaluation de la performance vis-à-vis du mode de rupture (cf. Figure 26). Sur cette Figure, par souci de lisibilité, les indicateurs I5 à I7 n'ont pas été représentés.

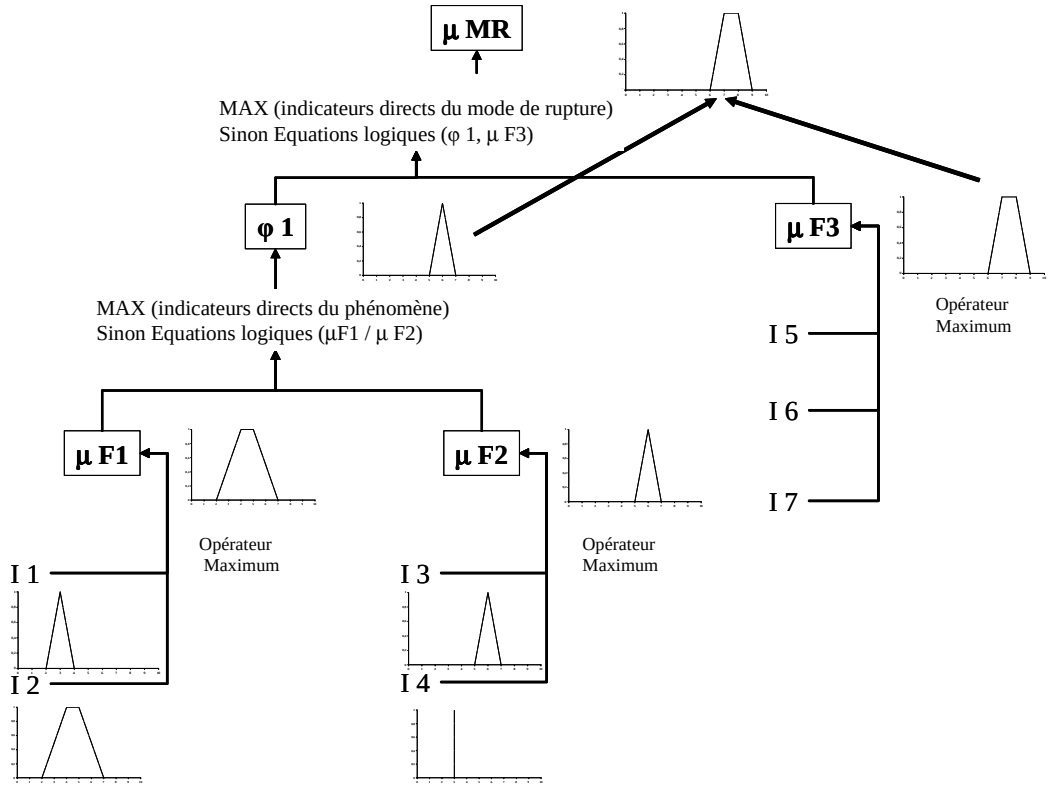


Figure 26 : Représentation et propagation des données imparfaites dans le modèle défini par le groupe d'experts

Pour réaliser la propagation, nous mettons en œuvre le principe d'extension proposé par (Zadeh, 1975) pour étendre les opérations générales entre nombres réels aux opérations correspondantes entre nombres flous.

Soit $\tilde{B} = f(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, ... \tilde{A}_n)$. La fonction d'appartenance μ_B d'un nombre flou $\tilde{B}$ est obtenue à partir des fonctions d'appartenance μ_{Ai} des nombres flous $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, ... \tilde{A}_n$ par :

$$\mu_B(b) = \sup_{\substack{a1...an \\ b=f(a1,...,an)}} \min(\mu_{A1}(a1), \mu_{A2}(a2), ..., \mu_{An}(an)) \qquad \text{(Equation 17)}$$

Par ce principe, il est possible de réaliser les combinaisons en utilisant notamment les opérateurs mathématiques classiques : addition, soustraction, produit, quotient, calcul du minimum, calcul du maximum.

Une méthode de simplification des calculs existe : la fonction d'appartenance μ_B peut être obtenue par la méthode des α-coupes. Les alpha-coupes sont définies par

$$F_\alpha = \{x | \mu(x) \geq \alpha\} \quad \text{(Equation 18)}$$

Le support (F_0) et le noyau (F_1) sont deux alpha-coupes particulières.

Considérons pour plus de simplicité d'exposé, une opération binaire : $\tilde{B} = f(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)$. Pour un degré d'appartenance α, les α-coupes des variables d'entrée sont définies par :

$$A_{1\alpha}(\alpha) = \{x, \mu_{A1}(x) \geq \alpha\} \quad \text{(Equation 19)}$$

$$A_{2\alpha}(\alpha) = \{y, \mu_{A2}(y) \geq \alpha\} \quad \text{(Equation 20)}$$

Le calcul $f(A_{1\alpha}, A_{2\alpha})$ est réalisé en appliquant le principe d'extension.

Les deux étapes précédentes sont réitérées pour un nombre pertinent de valeurs α.

La distribution de possibilité $\mu_{f(A1,A2)}(x)$ est construite de manière discrète à partir des intervalles précédents $f(A_{1\alpha}, A_{2\alpha})$.

Il est possible de généraliser cette démarche à n distributions de possibilité.

2.3.2 Procédure de validation des résultats de la propagation des imperfections

Pour traiter les résultats issus de la propagation des distributions de possibilité dans le modèle, nous procédons de la même manière que pour le traitement des résultats de la représentation des imperfections. Nous menons :

- une comparaison de la note fournie par l'algorithme par propagation des indicateurs notés de manière floue avec la note de performance vis-à-vis de l'érosion interne donnée par les experts lors de la séance de notation individuelle sous un format déterministe. L'analyse est effectuée :
  - $\Rightarrow$ sur la distribution de possibilité résultant de l'agrégation : nous plaçons la note précise sur la note imparfaite fournie par l'algorithme selon les trois critères définis plus haut : « note précise appartient au noyau », « note précise appartient au support mais pas au noyau », « note précise n'appartient pas au support» ;
  - $\Rightarrow$ sur le résultat de la défuzzification (voir § 2.4) de cette distribution qui permet d'obtenir une note précise : nous calculons la différence entre les deux notes ;
- une comparaison des notes de performance données par plusieurs experts en déterminant le degré de compatibilité entre deux experts (Equation 15) ou le degré de compatibilité généralisé (Equation 16).

2.4 Etablissement du résultat

Le résultat de l'agrégation et de la propagation des distributions de possibilité $\tilde{A}_i$ est une distribution de possibilité $\tilde{B}$. Pour la prise de décision, il est intéressant de fournir un nombre précis à partir de cette distribution. Nous devons opérer un processus de défuzzification. Différentes méthodes existent (Oussalah, 2002). Parmi celles-ci deux sont particulièrement employées :

- la méthode du centre de gravité qui consiste à prendre comme valeur précise l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance du sous-ensemble $\tilde{B}$;
- méthode du maximum qui consiste à prendre comme valeur précise l'abscisse du maximum de la fonction d'appartenance du sous-ensemble résultat $\tilde{B}$. Des méthodes de prise en compte de plusieurs maximums ont été développées pour le cas où $\tilde{B}$ comporterait plusieurs maximums.

Il est possible également de comparer les distributions par rapport à un critère de sécurité, à un seuil. Deux mesures sont alors utilisées : la possibilité et la nécessité. Nous y reviendrons dans le chapitre des perspectives.

3. Synthèse sur l'analyse et la prise en compte des imperfections

Dans ce chapitre, nous avons abordé les imperfections qui entachent les données sous deux angles.

Premièrement, nous avons proposé une analyse des imperfections des données de base et des données brutes qui vise à déterminer et à fournir une grille d'évaluation de caractéristiques de qualité des données de base et des données brutes qui sont utilisées dans notre système.

Deuxièmement, nous avons présenté une méthode de représentation et de propagation des imperfections et d'expression du résultat sous la forme d'une note précise autorisant ensuite une prise de décision. Cette prise en compte des imperfections permet de mieux retranscrire la réalité que ne le ferait une note précise.

Lorsque les deux approches sont conduites sur un indicateur donné, nous obtenons un couple sous la forme :

- d'une masse de qualité des données brutes et des données de base qui conduisent à l'indicateur ;
- l'indicateur exprimé sous la forme d'une distribution de possibilité.

Ces deux démarches seront illustrées par des exemples applicatifs dans le Chapitre 2 de la Partie 3.

Partie 3
Applications et outils opérationnels

Chapitre 1 – Evaluation déterministe de la performance des barrages en remblai vis-à-vis de l'érosion interne

Chapitre 2 – Analyse et prise en compte des imperfections - Analyse de sensibilité

Cette Partie a pour objet de présenter les applications des méthodologies établies dans la Partie 2 ainsi que les outils opérationnels qui en découlent. Le Chapitre 1 est dédié à l'application de la méthode de formalisation et d'agrégation des connaissances pour l'évaluation de la performance de l'ouvrage vis-à-vis de l'érosion interne dans le remblai. Un exemple d'application montre l'utilisation de la méthode pour le suivi d'un ouvrage au cours du temps. Ce barrage a subi un mécanisme d'érosion interne dans le remblai. A la fin du Chapitre 1 est présentée une procédure de comparaison des résultats de nos travaux à une méthode opérationnelle d'évaluation de la performance développée par Hydro-Québec.

Le Chapitre 2 est consacré à la mise en œuvre de la méthode d'analyse et de prise en compte des imperfections. En début de chapitre est présentée l'application de la méthode de détermination des causes des imperfections et l'affectation d'une masse de qualité à l'indicateur. Les résultats des séances de notation d'indicateurs sous une forme floue sont ensuite présentés et discutés.

Chapitre 1 – Evaluation déterministe de la performance des barrages en remblai vis-à-vis de l'érosion interne

Les mécanismes conduisant à la rupture des barrages en remblai touchent à la fois la partie de surface de l'ouvrage, le remblai (érosion interne, glissement et surverse) et la partie souterraine, les fondations (érosion interne, glissement). Le CIGB distingue (CIGB, 1994) :

- quatre scénarios[8] principaux pour le vieillissement de la fondation des barrages en remblai :
  - ⇒ déformation dans le cas de fondations meubles ou de rocher de mauvaise qualité ;
  - ⇒ perte de résistance, augmentation des sous-pressions et modification de l'état de contrainte ;
  - ⇒ érosion interne ;
  - ⇒ dégradation de la fondation c'est-à-dire modification des caractéristiques ou propriétés des fondations conduisant à une diminution de leur résistance ou à une augmentation de leur perméabilité ;
- six scénarios principaux pour le vieillissement du remblai lui-même :
  - ⇒ déformation ;
  - ⇒ perte de résistance ;
  - ⇒ augmentation des pressions interstitielles ;
  - ⇒ érosion interne ;
  - ⇒ dégradation du remblai ;
  - ⇒ érosion superficielle.

Les causes de ces mécanismes peuvent se diviser en causes primitives, liées aux conditions locales, au projet ou à la construction et causes ultérieures, liées à l'exploitation et à l'entretien dont les effets ne peuvent se faire sentir qu'après des années d'exploitation. (ICOLD, 1993).

[8] enchaînements de causes et d'effets conduisant à la dégradation des caractéristiques et propriétés des barrages et ouvrages annexes

Nous avons choisi d'illustrer la démarche présentée précédemment en traitant l'exemple de l'érosion interne dans le remblai. Nous donnons tout d'abord une description du mécanisme d'érosion interne avant de dérouler la méthode de formalisation et d'agrégation des connaissances sur ce mécanisme.

1. Description du mécanisme d'érosion interne

Les ruptures par érosion interne et par renard hydraulique ont représenté un peu plus de la moitié des ruptures des barrages en remblai entre 1950 et 1986, en excluant les ruptures pendant la construction (Foster et al., 2000). Elle constitue la première source d'incidents sur les ouvrages hydrauliques en terre (CFGB, 1997). Le mode de rupture par érosion interne peut toucher aussi bien la fondation que le remblai, y compris le noyau étanche. Il peut également se propager du remblai vers la fondation. Pour la période jusqu'à 1986, soixante-cinq pourcents des érosions internes se sont produites dans le remblai, trente pourcents dans la fondation et cinq pourcents du barrage vers la fondation (Foster et Fell, 2000). Nous traitons dans ce chapitre uniquement le cas de l'érosion interne au travers du remblai.

L'érosion interne est provoquée par l'existence de fuites non contrôlées par le système de drainage et qui entraînent vers l'aval des particules constitutives du remblai (ou de la fondation) à la suite de leur arrachement. Huit phénomènes d'arrachement peuvent être à l'origine d'une érosion interne (IREX, 2003) :

- la boulance : état d'un volume de sol dans lequel les grains flottent, entourés d'une phase liquide continue, sous l'effet d'une pression d'eau qui annule la contrainte effective. La boulance se distingue de la liquéfaction par le mécanisme initiateur qui est d'origine hydraulique (l'écoulement) pour le premier et mécanique (les vibrations) pour le second ;
- la suffusion : mouvement des grains de petite taille non structuraux lorsque la vitesse locale (ou le gradient local) dépasse une certaine limite. Le mouvement des grains est ensuite conditionné par les conditions hydrauliques et géométriques de site ;
- l'érosion régressive : arrachement des particules, une à une, à la surface d'un matériau sous l'effet de la poussée de l'écoulement percolant à travers le matériau. La valeur locale du gradient hydraulique de sortie et les vitesses d'écoulement sont suffisantes pour détacher les particules de la surface. Sont distingués :
- le débourrage : déséquilibre d'un volume de sol sous l'action de la poussée de l'eau que la résistance au cisaillement sur le pourtour du volume ne parvient plus à compenser. Il peut se produire dans le cas d'une fissure rocheuse ou d'un conduit karstique rempli de matériaux argileux et peut provoquer un élargissement de la fissure ;
- la dissolution : disparition d'une partie des constituants des particules, sous une action chimique ou thermique ;
- la défloculation ou dispersion : phénomène physico-chimique qui tend à diminuer la taille des agglomérats de particules argileuses, disperser les plaquettes d'argile et faciliter leur mobilité.
- l'arrachement ou l'entraînement : détachement des particules des parois d'un canal ou d'une rivière à partir d'une certaine valeur du cisaillement engendré par l'écoulement. Ce phénomène commande la vitesse de développement des renards. Le débit solide évacué est fonction du rapport entre la contrainte de cisaillement réelle et la contrainte de cisaillement critique ;

- l'exsolution : de l'air piégé dans le noyau lors de la mise en eau est comprimé et partiellement dissous dans l'eau en partie amont du noyau. L'air est ensuite transporté par l'eau via le corps du barrage et relâché dans les parties aval du noyau où la pression de l'eau interstitielle est plus faible. Il en résulte une diminution locale de la perméabilité lors du piégeage de l'air et de fait une augmentation nette des pressions interstitielles (St-Arnaud, 1995)

On distingue deux modes de transport : le renard et la suffusion (CFGB, 1997) (cf. Figure 27).

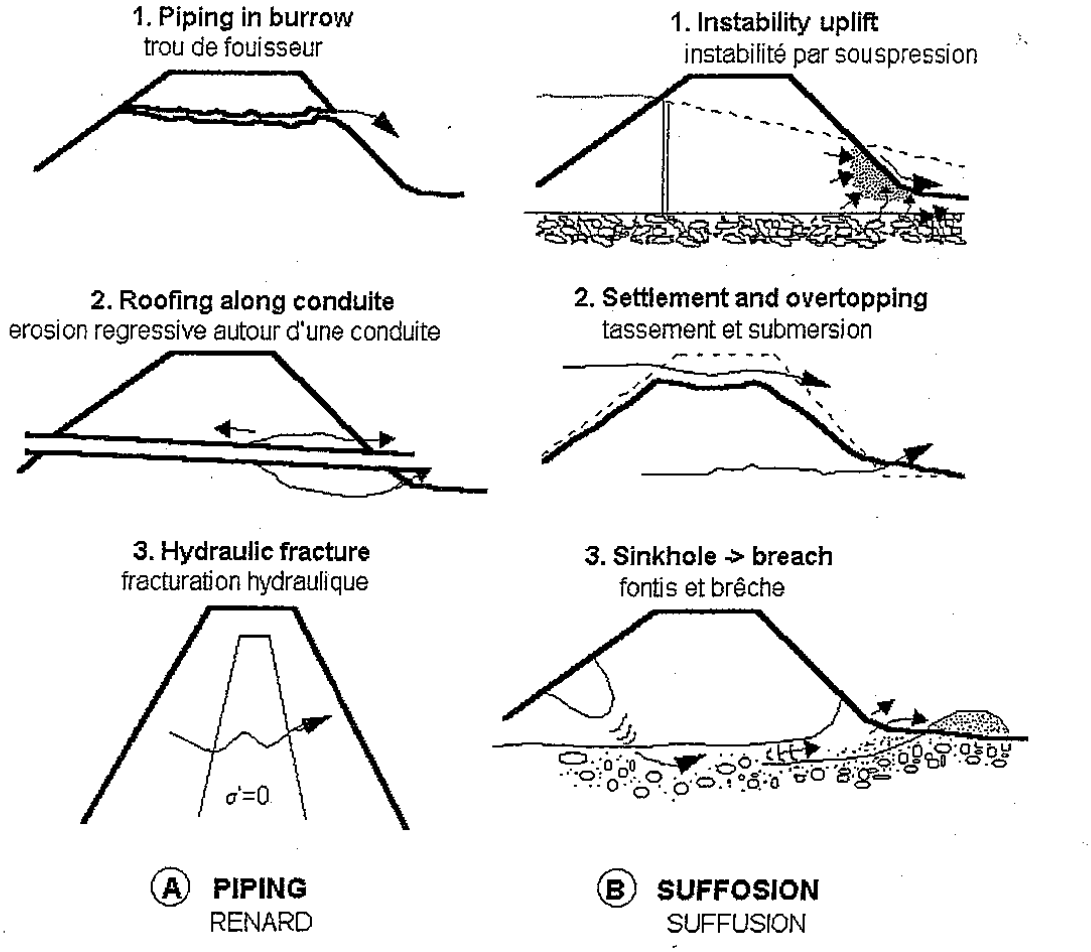


Figure 27 : Mécanismes d'érosion interne (extrait de CFGB (1997))

Lors du phénomène de renard, le transport des particules est concentré dans un conduit et les vitesses d'écoulement sont rapides. Sont distingués en fonction des mécanismes mis en jeu dans l'initiation et la progression (Foster et Fell, 2000) :

- le renard par érosion régressive dans lequel l'eau entraîne de fines particules en commençant par le débouché à l'aval. L'érosion remonte ensuite vers l'amont en s'accélérant car l'eau a un trajet de plus en plus court à parcourir et sa vitesse augmente ;
- l'érosion interne par fuite concentrée qui se produit du fait par exemple d'une fissure dans le noyau, d'une zone de forte perméabilité ou le long d'une conduite. Le trou initié s'agrandit pour former un conduit ;

Dans ces deux situations, le phénomène peut mener jusqu'à l'ouverture d'une brèche dans l'ouvrage.

Lors du phénomène de suffusion, le transport est diffus dans l'espace poreux interparticulaire et les vitesses sont initialement peu élevées. L'écoulement entraîne les particules les plus petites au travers de la matrice formée par les molécules les plus grosses. La teneur en fines diminue donc dans le temps. La suffusion peut tendre vers les trois modes de rupture suivants (CIGB, 1997) :

- la formation à l'aval du barrage ou de la fondation d'une zone dans laquelle la vitesse devient suffisante pour qu'apparaisse une érosion régressive évoluant éventuellement jusqu'à l'amont pour créer un renard qui ici, ne s'établit pas le long d'un cheminement préexistant. La cause est la perte de fractions fines qui provoque une perméabilité plus élevée et donc des vitesses d'écoulement plus élevées ;
- un affaissement local de la crête provoqué par l'entraînement de matériaux et donc une diminution de la densité du matériau constitutif du remblai ;
- la formation d'une zone instable à l'aval du barrage ou de la fondation, par augmentation des pressions interstitielles due à la formation de zones colmatées par l'arrivée des fines.

Le mode de rupture par renard hydraulique est plus rapide que le mode de rupture par suffusion. Il conduit rapidement à la rupture par création d'une brèche : ainsi 1h30 s'est écoulée entre le moment où une fuite d'eau claire a été signalée près de la galerie de vidange et la rupture par apparition d'une brèche pour le barrage de Bila Desna en République Tchèque (Simek, 1997), une brèche s'est ouverte en moins d'une heure après le premier constat d'un écoulement direct pour le barrage des Ouches en France (Peyras, 2003). L'augmentation des débits de fuite est également un indicateur remarquable : par exemple, lors de la rupture d'un remblai zoné sur la rivière Quail, le débit est passé d'environ 15 L/s à 2000 L/s en 12 heures, l'eau se chargeant peu à peu en matériau au cours de cette courte période (Catanach et al., 1991). Ces phénomènes extrêmes menant à la rupture peuvent se produire à la première mise en eau mais également beaucoup plus tard dans la vie d'un barrage : 200 ans pour le barrage des Ouches (Peyras, 2003). Actuellement, il n'est pas possible de prédire de manière fiable les barrages pour lesquels l'érosion progresserait rapidement plutôt qu'à un rythme lent (Brown et Gosden, 2006).

Quatre grandes phases s'enchaînent au cours du mécanisme d'érosion interne (Fry, 2007) : l'initiation, la filtration, la progression et la formation d'une brèche.

La phase d'initiation est caractérisée par l'arrachement de particules.

La filtration est la phase pendant laquelle la relation entre la distribution de taille des particules du matériau et du filtre détermine si l'érosion va se poursuivre ou non.

Pendant la progression se produisent l'agrandissement du conduit et l'augmentation de la pression interstitielle et des fuites. Ces phénomènes dépendent des conditions mécaniques (est-ce que le conduit va rester ouvert ou se rompre ?) et des conditions hydrauliques (est-ce que les zones à l'amont peuvent contrôler le processus d'érosion par une limitation des écoulements ? est-ce que le gradient critique ou la vitesse augmente ?).

La formation d'une brèche est la phase finale du mécanisme d'érosion interne. Elle peut provenir de quatre phénomènes : agrandissement du conduit (renard hydraulique), instabilité de la pente aval (instabilité générale), instabilité locale ou glissement de peau, ou surverse du fait du tassement de la crête.

Les origines de ce mode de rupture sont tous les phénomènes qui entraînent des circulations d'eau dans le remblai ou la fondation et un transport des particules à savoir :

- la défaillance du système d'étanchéité : dissolution du rideau d'injection, fracture du voile d'étanchéité, vieillissement du masque amont (fissuration, écaillage, faïençage), conception et/ou réalisation inadéquates du dispositif d'étanchéité ;

- l'absence de filtre ou des conditions de filtre non respectées, le contact entre un matériau grossier et un matériau fin (suffusion externe) ou encore des matériaux dans lesquels la granulométrie n'assure pas l'auto-filtration (suffusion interne) : ces situations permettent un entraînement des particules fines vers l'aval ;
- le colmatage, le contournement ou la rupture du dispositif de drainage, la rupture d'une canalisation ;
- l'augmentation des percolations liées à la nature des matériaux : augmentation des sous-pressions dans la fondation rocheuse, instabilité des matériaux en fondation ou en remblai du fait de sauts de granulométrie entre couches successives, compactage mal réalisé autour d'un instrument d'auscultation ou d'une conduite. (Foster et Fell, 2000) estiment qu'environ la moitié des ruptures par érosion au travers du remblai est associée à la présence de conduites. Ces mêmes auteurs montrent que le compactage du remblai est un élément essentiel de sécurité : les barrages sans réel compactage sont quinze fois plus susceptibles de se rompre que des barrages où le compactage a été conduit selon les recommandations modernes[9]) ;
- la déformation ou la fracturation du remblai : rupture par cisaillement, consolidation ou tassement de la fondation, modifications dans les états de contrainte dans le remblai, compactage insuffisant ou encore sollicitations du milieu (gel, dessiccation en profondeur) ou liées à l'exploitation.

La pratique actuelle est de se prémunir au mieux vis-à-vis de l'érosion interne par des dispositions constructives (écrans d'étanchéité, filtres notamment) et de s'appuyer sur la surveillance visuelle et l'analyse de l'auscultation (Bonelli, 2001). Si un mécanisme d'érosion interne s'est produit, des techniques de confortement différentes peuvent être envisagées en fonction (CFGB, 1997) :

- de la nature du désordre ;
- du type de barrage ;
- du risque aval lié aux dimensions du barrage ou de la charge hydraulique.

Si les désordres sont souvent liés à des défauts d'étanchéité plus ou moins graves, la réparation n'est pas forcément la réfection de l'étanchéité. La réparation consiste en théorie à stopper une des deux conditions nécessaires à l'érosion interne. La réfection de l'étanchéité diminue la vitesse d'écoulement et peut enlever la condition d'arrachement si la contrainte d'entraînement devient inférieure à τc. Les injections peuvent annuler la condition de transport si la perméabilité devient inférieure à 10^{-6} m/s. La pose d'un filtre aval sous une recharge est une autre façon de stopper la condition de transport. Le choix de la réhabilitation dépend de la fonction détériorée de l'ouvrage :

- perte d'eau : réfection de l'étanchéité par injection, pose d'une paroi d'étanchéité ou d'une étanchéité amont. Le domaine d'application des techniques de réfection d'étanchéité dépend des 3 principaux paramètres : la perméabilité du terrain, la nature et la résistance du terrain, les coût des techniques envisageables pour le site étudié.
- perte de stabilité : drainage ou pose d'une recharge aval après pose d'un filtre ;
- perte de l'ouvrage par renard : réfection de l'étanchéité.

[9] Densité supérieure ou égale à 98 % de la densité sèche maximum standard à l'OPN (Optimum Proctor Normal) et une teneur en eau comprise entre -1 % et +1 % de l'OPN (Foster et Fell, 2000).

Afin de mieux comprendre le comportement des barrages vis-à-vis de l'érosion interne, des travaux sont développés depuis une vingtaine d'années, notamment sur un plan expérimental. (Benahmed et Bonelli, 2007) présentent certaines de ces recherches qui, d'abord orientées vers une caractérisation qualitative, consistent depuis quelques années à une caractérisation de nature quantitative. Le travail de ces auteurs vise à proposer un dispositif expérimental avec une instrumentation très précise. Au plan numérique, peu de travaux ont porté sur le mécanisme d'érosion interne. (Bonelli et al., 2006) ont développé un modèle numérique permettant de déterminer un temps caractéristique pour ce mécanisme. Le projet Erinoh (Erosion Interne dans les sols des Ouvrages Hydrauliques) devrait mener à des apports scientifiques intéressants et faire progresser de manière importante la connaissance sur le mécanisme d'érosion interne[10].

Les ouvrages (CFGB, 1997 ; IREX, 2003) sont consacrés au mécanisme d'érosion interne et présentent ses origines, sa détection, les mesures de protection et les confortements de manière très détaillée.

L'érosion interne peut se produire dans le remblai ou dans les fondations. Dans ce paragraphe, nous ne traitons que la partie remblai. Les experts ont distingué deux catégories d'érosion interne touchant le remblai : soit un mécanisme qui se produit dans les matériaux du remblai proprement dit, soit un mécanisme dû à la présence d'un ouvrage traversant (galerie, conduite…) qui constitue une zone particulière et sensible. Nous exposons les résultats concernant ces deux types d'érosion interne.

Dans la suite, nous considérons deux types de barrages en remblai :

- les barrages en remblai avec masque amont : masque en béton conventionnel, en béton bitumineux, en argile, en maçonnerie et DEG (Dispositif d'Etanchéité par Géomembrane) ;
- les barrages à étanchéité interne : barrages homogènes, barrages à noyau en argile et barrage à parois minces (parois moulées, rideau de palplanches, mur en béton, parois en mastic bitumineux).

2. Indicateurs et modèle d'agrégation pour l'érosion interne dans le remblai

2.1 Caractéristiques du groupe d'experts

Les séances de recueil et de formalisation des connaissances sont menées auprès d'un groupe de cinq experts de l'équipe Secure du Cemagref d'Aix-en-Provence qui conduisent plusieurs expertises décennales par an, depuis au moins une dizaine d'années. Ce groupe détient les connaissances théoriques et heuristiques à formaliser.

Nous avons posé comme contrainte qu'une séance n'aurait lieu que si au moins trois experts y assistaient.

[10] Ce projet a été financé par l'ANR en 2005. Sur cet axe de recherche, il regroupe cinq laboratoires français (Cemagref, Gem, LIRIGM, LMPG, LCPC).

2.2 Identification des fonctions impliquées dans le mécanisme d'érosion interne

La préparation des séances de recueil repose sur une analyse de la bibliographie afin d'identifier les fonctions impliquées dans un mode de rupture. Des travaux ont été menés dans l'équipe SECURE afin de décrire les scénarios de vieillissement des barrages en remblai sous la forme de graphes orientés enchaînant fonctions et phénomènes détectés par des symptômes (Figeac, 2003). Comme nous l'avons précisé plus haut, nous avons simplifié et repris sous un autre formalisme ces graphes orientés. Nous avons également renommé les fonctions : le Tableau 13 donne la correspondance, pour ce qui concerne les fonctions impliquées dans l'érosion interne, entre les fonctions définies dans (Figeac, 2003) et celles utilisées dans ce travail.

Appellation utilisée dans (Figeac, 2003)	Appellation utilisée dans le mémoire
Limiter les flux hydrauliques	Fonction d'étanchéité
Evacuer les flux hydrauliques	Fonction de drainage
Résister aux sollicitations hydromécaniques	Fonction d'auto-filtration
Résister aux sollicitations chimiques Résister aux sollicitations mécaniques	Fonction de protection
Préparer les surfaces de contact	Fonction de résistance à l'érosion interne liée aux ouvrages traversants

Tableau 13 : Correspondance des appellations de fonctions

2.2.1 Erosion interne dans le remblai

La Figure 28 donne le schéma série et parallèle pour les remblais à étanchéité amont : quel que soit le type de masque, sont toujours impliquées les fonctions d'étanchéité, de drainage et d'auto-filtration.

Pour les étanchéités par masque en argile ou DEG, le masque est protégé par un dispositif de protection (enrochements, matelas Reno, dalles en béton) et une fonction de protection de l'étanchéité apparaît ainsi sur le schéma (cas a). Pour les masques en béton bitumineux la couche de béton bitumineux la externe remplit une fonction de protection de l'étanchéité. La fonction d'étanchéité est assurée par la couche interne de béton bitumineux. La fonction d'auto-filtration est la fonction de résistance à l'érosion interne. Pour les masques en béton conventionnel armé et les masques en maçonnerie, il n'y a pas de dispositif de protection de l'étanchéité, le schéma se résume ainsi à trois fonctions : étanchéité, drainage et auto-filtration (cas b). Les barrages en remblai à étanchéité interne sont traités par le cas b.

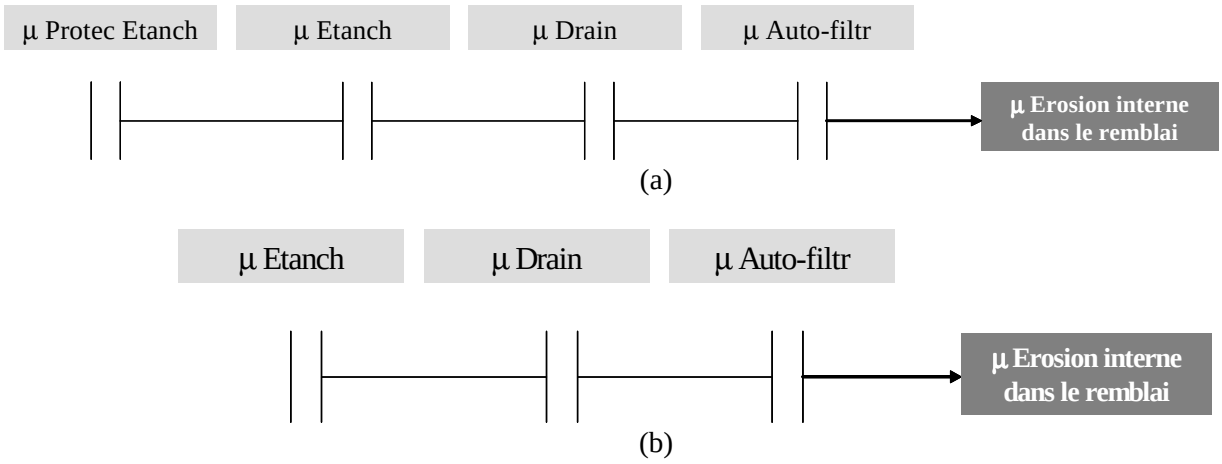


Figure 28 : Diagrammes équivalents électrique pour le cas de l'érosion interne dans le remblai – (a) : cas des masques en béton bitumineux, des masques en argile et des DEG – (b) : cas des masques en béton conventionnel et des masques en maçonnerie

2.2.2 Mécanismes conduisant à la rupture par érosion interne liée à la présence d'un ouvrage traversant

Par ouvrage traversant sont entendus déversoir, conduites et galeries. Pour les conduites et galeries, sont pris en compte l'ouvrage traversant proprement dit et son enrobage. Deux scénarios d'érosion interne liée à la présence d'un ouvrage traversant sont distingués (cf. Figure 29) :

- une érosion interne le long de l'ouvrage traversant. Ce mécanisme peut avoir comme origines :
  - ⇒ la présence de conduites mal enrobées ;
  - ⇒ la présence de conduites ou galeries entourées d'un sol mal compacté ce qui augmente la perméabilité du matériau et diminue sa résistance à l'érosion ;
  - ⇒ la présence d'écrans anti-renard hydraulique mal dimensionnés ou mal réalisés ;
- une érosion interne induite par l'eau présente dans la conduite (en charge). Ce mécanisme peut être lié à :
  - ⇒ une rupture de la conduite ;
  - ⇒ une fissuration de la conduite ;
- une combinaison des deux scénarios précédents est également possible, avec le développement d'une érosion interne induite par de l'eau qui passe du remblai vers l'ouvrage traversant.

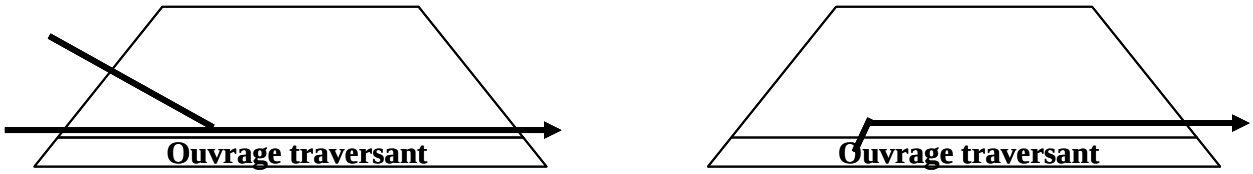


Figure 29 : Erosion interne liée à un ouvrage traversant – (a) : érosion le long de l'ouvrage traversant – (b) : érosion induite par l'eau présente dans la conduite

Ceci conduit au schéma équivalent série et parallèle suivant (cf. Figure 30) :

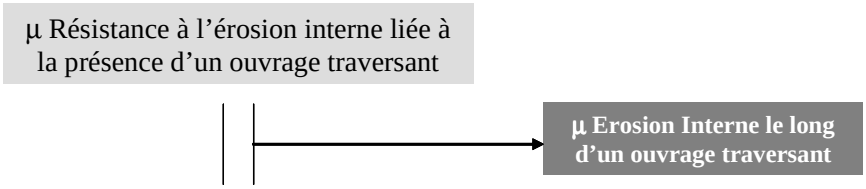


Figure 30 : Diagrammes série et parallèle – Erosion interne liée à un ouvrage traversant

2.3 Recueil et formalisation des indicateurs

Cette étape consiste à identifier et formaliser les indicateurs pertinents pour l'ensemble des fonctions sollicitées par un mode de rupture donné.

2.3.1 Identification des indicateurs

Une première liste d'indicateurs (appelés symptômes) avait été réalisée dans le travail de (Figeac, 2003) à la suite d'une AMDE. Cette liste a été complétée et modifiée sous plusieurs angles :

- nous avons étudié huit catégories de barrages (cinq à étanchéité amont et trois à étanchéité interne listés à la fin du paragraphe 1 de ce même chapitre). Dans le travail de N. Figeac, ont été traitées deux catégories : les barrages à noyau et les barrages à étanchéité amont sans que soit précisée la nature du masque. Or, cette dernière induit des indicateurs de la performance de la fonction d'étanchéité différents : nous les avons identifiés ici ;
- la fonction de protection du dispositif d'étanchéité n'a pas été intégrée dans le cas du travail de N. Figeac. Les indicateurs correspondant n'y avaient donc pas été listés, ce que nous avons fait ici lors des séances avec les experts ;
- pour les cas traités, outre les indicateurs rajoutés en liaison avec les deux points que nous venons d'évoquer, la liste des indicateurs pour une fonction donnée a été allongée : suite aux séances de recueil ont été listés par exemple, les indicateurs « Etat visuel de l'exutoire de drain », « Etat visuel (observé par caméra) du collecteur de drainage ou de la canalisation d'évacuation », « Présence de végétation sur le remblai aval », « Scarification lors de la réalisation du noyau », « Qualité du raccordement de l'ouvrage traversant au dispositif d'étanchéité »… ;
- pour les cas de barrages traités, les indicateurs ont pour certains été précisés : ainsi, dans le travail de N. Figeac, apparaît le symptôme « mesure débit drainage ». Cet indicateur a été défini au cours des séances de recueil par les experts, sous le terme de «Augmentation du Débit et Débit par rapport à la capacité drainante » qui caractérise la fonction d'étanchéité et « Diminution du débit » qui caractérise la fonction de drainage.

Le Tableau 14 recense le nombre d'indicateurs visuels, auscultés et calculés pour chacune des fonctions impliquées dans le mécanisme d'érosion interne dans le remblai. Remblais à étanchéité interne et remblais à étanchéité amont sont séparés. Le Tableau 15 est construit de la même manière pour les indicateurs de conception ou réalisation. Les cases en grisé indiquent que la fonction n'existe pas pour le type de barrage considéré.

Fonctions	**Remblai à étanchéité amont**		**Remblai à étanchéité interne**		
	Visuels	Auscultation	Visuels	Auscultation	Calculés
Fonction de protection du dispositif d'étanchéité	5	0			
Fonction d'étanchéité	13	2	0	2	0
Fonction de drainage	4	2	4	2	0
Fonction d'auto-filtration	4	0	4	0	1
Total	26	4	11	4	1

Tableau 14 : Erosion interne dans le remblai - Nombre d'indicateurs visuels, d'auscultation et calculés identifiés pour chacun des types de remblai

Fonctions	Remblai à étanchéité amont	Remblai à étanchéité interne
Fonction de protection du dispositif d'étanchéité	10	
Fonction d'étanchéité	18	10
Fonction de drainage	4	4
Fonction d'auto-filtration	5	5
Total	37	19

Tableau 15 : Erosion interne dans le remblai - Nombre d'indicateurs de conception ou réalisation identifiés pour chacun des types de remblai

Le Tableau 16 dénombre les indicateurs impliqués dans le mécanisme d'érosion interne liée aux ouvrages traversants. Dans le cas des indicateurs d'auscultation, l'un des deux indicateurs identifiés et formalisés est l'analyse d'une conduite métallique à partir de mesures ultrasonores. Cet équipement n'est pas un instrument d'auscultation mais nous le classons toutefois dans cette catégorie afin de ne pas alourdir la classification avec un type d'indicateur « indicateur instrumental » qui par ailleurs n'est rencontré que dans ce cas précis d'érosion interne liée aux ouvrages traversants.

Types	Nombre
Indicateurs visuels	3
Indicateurs d'auscultation	2
Indicateurs calculés	0
Indicateurs de conception ou de réalisation	6

Tableau 16 : Erosion interne liée aux ouvrages traversants - Nombre et types d'indicateurs identifiés

Les indicateurs visuels sont prépondérants : pour les remblais à étanchéité amont, ils sont au nombre de vingt-six sur les trente indicateurs présents et pour les remblais à étanchéité interne, ils sont au nombre de onze sur seize indicateurs au total. Les indicateurs auscultés sont les mêmes pour les deux types d'ouvrages. L'indicateur calculé est le gradient hydraulique.

Pour certaines fonctions, ce nombre d'indicateurs peut paraître très élevé. Ceci concerne la fonction de protection du dispositif d'étanchéité et la fonction d'étanchéité. Il s'explique par des types de protection et d'étanchéité différents : masque en béton conventionnel armé, masque en béton bitumineux, masque en argile, dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) et masque en maçonnerie sont caractérisés par des indicateurs différents.

2.3.2 Formalisation des indicateurs

Une fois identifiés, les indicateurs sont formalisés selon la grille proposée dans la Partie 2. Les tableaux suivants donnent trois exemples de structuration pour :

- un indicateur visuel « Fontis - cône d'affaissement » (Tableau 17) qui est l'un des indicateurs de la fonction d'auto-filtration ;
- un indicateur d'auscultation « Evolution du débit (diminution) » (Tableau 18) qui caractérise la performance de la fonction de drainage ;
- un indicateur de conception ou réalisation « Règles de filtre » entre couche de protection et couche d'étanchéité (Tableau 19) qui fournit des indications sur la conformité aux règles de l'art de la fonction d'étanchéité.

Les indicateurs de conception ou réalisation sont pour l'heure moins bien décrits que les indicateurs visuels ou d'auscultation.

Nom	Fontis – cônes d'affaissement
Définition	Effondrement de terrain localisé, souvent en forme d'entonnoir provoqué par la présence d'un vide qui se propage verticalement vers la surface du barrage. Se traduit par un affaissement du terrain (cône) ou la présence d'un trou (fontis)
Echelle et référence	0 : absence de fontis ou de cône d'affaissement 6 : fontis isolé, de petite taille (quelques dm) et ancien (quelques années) OU suspicion de fontis (cônes d'affaissement) 7 – 9 : fontis isolé, de petite taille, et récent (<1 an) OU fontis isolé, de grande taille et ancien 10 : fontis de grande taille et récent
Caractéristique de lieu	Crête ou talus aval ou talus amont
Caractéristique de temps	Evaluation menée une fois par semaine

Tableau 17 : Description de l'indicateur visuel « Fontis – cônes d'affaissement »

Nom	Evolution du débit (diminution)
Définition	La mesure des débits de drainage permet de quantifier les infiltrations d'eau contrôlées par le système de drainage. Une diminution du débit peut s'expliquer par un collecteur cassé, un drain colmaté, une étanchéité qui s'améliore du fait de la retenue, une source qui serait tarie, détournée, captée... Il y a donc une incertitude sur l'effet de cet indicateur sur la performance de la fonction de drainage, en particulier pour une variation comprise entre 10 et 50 % par an.
Echelle et référence	0 : débit sans évolution 1-2 : débit en diminution faible (<10%/an) 7-8 : débit en diminution forte et rapide (>50%/an) 10 : débit s'annule brutalement On ne donnera pas de note si la diminution est située entre 10 et 50 %
Caractéristique de lieu	Exutoire de drainage
Caractéristique de temps	Mesure menée une fois par semaine Evolution des mesures évaluée une fois par an

Tableau 18 : Description de l'indicateur issu de l'auscultation « Evolution du débit - diminution »

Nom	**Règles de filtre** (transition entre le dispositif de protection de l'étanchéité et le dispositif d'étanchéité)
Définition	Ce sont les règles de filtre transition qui doivent être respectées entre les enrochements ou les matelas Reno et le masque en argile ou le DEG C'est une protection pendant la vidange et contre le batillage
Echelle et référence	Absence de filtre transition : non conforme Filtre transition mal dimensionné : déviation faible ou forte selon les cas
Caractéristique de lieu	Dispositif de protection de l'étanchéité – Dispositif d'étanchéité

Tableau 19 : Description de l'indicateur de conception ou réalisation « Règles de filtre »

Une liste des indicateurs utilisés pour l'évaluation de la performance vis-à-vis de l'érosion interne et des différentes fonctions impliquées pour l'exemple du remblai à masque amont est fournie sur le Tableau 20. Nous pouvons retrouver les différents types d'indicateur définis plus haut : indicateurs de dégradation, indicateurs de défaillance et indicateurs de dégradation et défaillance.

Indicateurs	Type	Echelle de mesure										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fissuration des dalles	BC	■	■	■	■	■	■	■				■
Mouvement différentiel des dalles - altération au niveau des joints	BC	■			■	■	■	■	■	■	■	■
Qualité du béton conventionnel	BC	■		■	■				■			■
Mouvement différentiel au niveau du joint périmétral ou dans la masse du masque	BB	■			■	■	■	■	■			
Qualité du béton bitumineux	BB	■			■	■			■			
Fente liée au fluage (fente de l'ensemble du masque en béton bitumineux)	BB	■		■	■		■	■	■			■
Faïençage	DEG	■					■	■				
Poinçonnements, trous, déchirures, soudures défectueuses, plis dans la membrane	DEG	■				■	■	■	■	■	■	
Glissement du talus amont avec masque en argile	MA	■										■
Présence d'arbres sur la crête et haut du masque en argile	MA	■		■	■		■	■	■			
Etat de la couche anti-batillage (enrochements)	DEG - MA	■			■	■	■	■	■	■	■	■
Altération des matelas Reno	DEG - MA	■			■	■	■	■		■	■	■
Etat de la couche anti-batillage (pavés)	DEG - MA	■			■	■			■	■	■	■
Etat des pierres	MM	■		■	■				■	■		■
Dégradation des joints de maçonnerie	MM	■		■	■				■	■	■	■
Fissures au niveau des joints entre plots	MM	■							■	■	■	■
Débit par rapport à la capacité drainante/Evolution du débit (augmentation)	Tous	■	■		■	■	■	■	■	■		■
Etat visuel exutoire drain	Tous	■		■		■		■		■		■
Etat visuel collecteur drainage et/ou canalisation évacuation (inspection par caméra)	Tous	■		■		■		■		■		■
Fuite eau claire sur le remblai aval	Tous	■							■	■	■	■
Présence de végétation sur le pied aval	Tous	■			■			■				
Evolution du débit (Diminution)	Tous	■	■	■					■	■		■
Piézométrie	Tous	■						■	■	■	■	■
Fontis – Cônes d'affaissement	Tous	■							■	■	■	■
Tassements différentiels de la crête ou du talus aval	Tous	■								■	■	■
Fuites localisées et chargées sur le parement aval ou en exutoire de drainage	Tous	■							■	■	■	■
Présence d'arbres, de souches sur crête ou talus aval pour les barrages de moins de 15 m	Tous	■	■	■	■	■			■	■	■	

Tableau 20 : Utilisation de l'échelle en fonction des indicateurs – Erosion interne dans le remblai – Barrage à masque amont (BC : Béton Conventionnel – BB : Béton Bitumineux – DEG : Dispositif d'Etanchéité par Géomembrane – MA : Masque en Argile – MM : Masque en Maçonnerie)

2.4 Agrégation des indicateurs

Nous présentons successivement le modèle d'agrégation pour l'exemple de l'érosion au travers du remblai puis pour celui de l'érosion liée à la présence d'un ouvrage traversant.

2.4.1 Détermination de la performance

2.4.1.1 Erosion interne dans le remblai

La Figure 31 fournit une instanciation du modèle décrit sur la Figure 12.

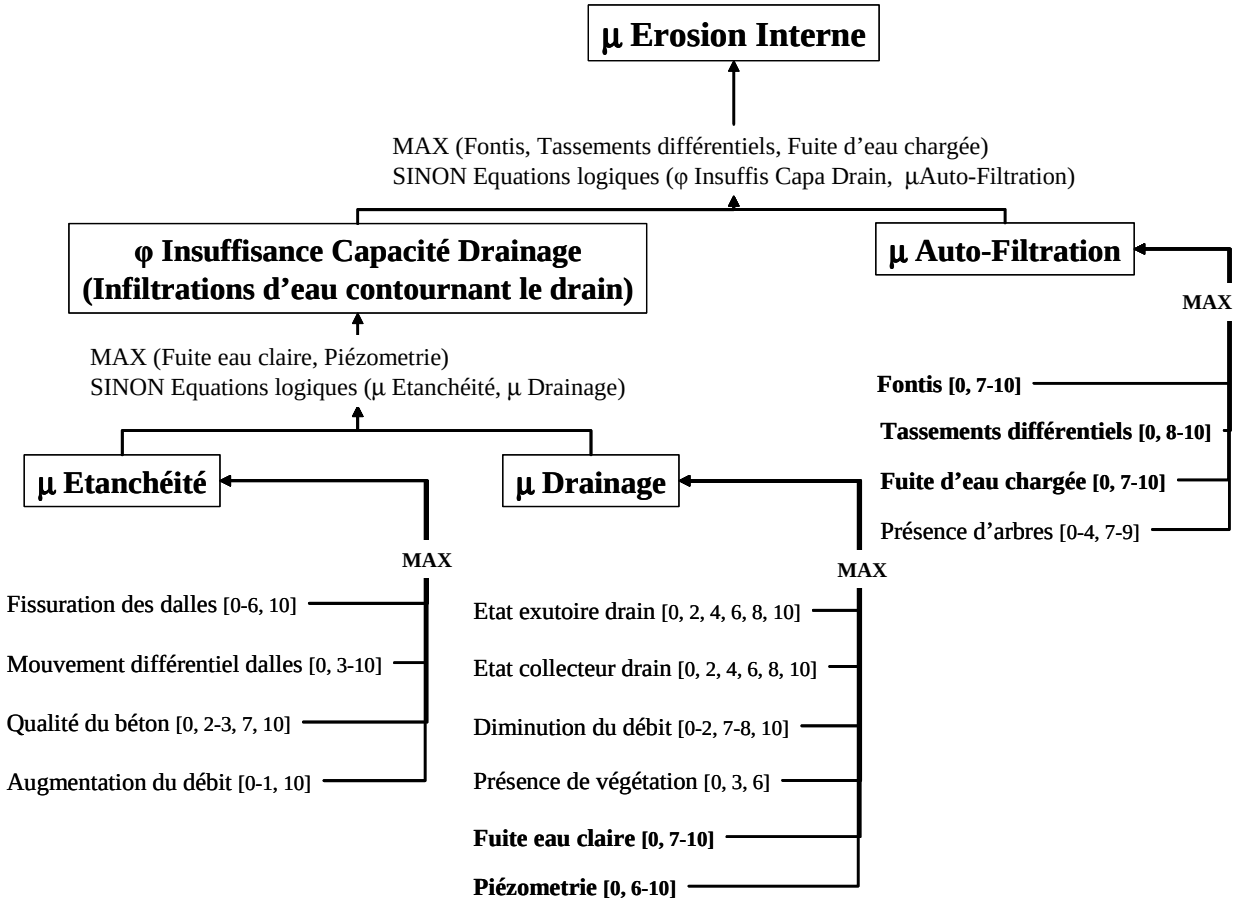


Figure 31 : Agrégation des indicateurs et des fonctions pour l'évaluation de la performance vis-à-vis de l'érosion interne dans le remblai à étanchéité amont (en gras : indicateurs directs – entre crochets : gamme de variation de l'indicateur)

Trois fonctions sont impliquées dans le modèle : la fonction d'étanchéité, la fonction de drainage et la fonction d'auto filtration. La fonction de protection de l'étanchéité est évaluée mais n'intervient pas directement dans le scénario de vieillissement car son rôle est moins important que les trois autres. Par contre, son évaluation permettra de décider de travaux de confortement, le cas échéant. Quatorze indicateurs sont nécessaires pour évaluer la performance par rapport à l'érosion interne au travers du remblai pour un barrage à masque amont en béton conventionnel.

L'évaluation du phénomène « insuffisance de la capacité de drainage » est obtenue soit par des indicateurs directs de ce phénomène, en l'occurrence des fuites d'eau claire ou la présence d'une piézométrie dans le remblai aval, soit par des équations logiques combinant la performance des fonctions d'étanchéité et de drainage. De la même manière, l'évaluation de la performance vis-à-vis de l'érosion interne est obtenue soit par des indicateurs directs de ce mode de rupture (fontis, tassements et fuites chargées pour l'érosion interne) ou par des équations logiques agrégeant le phénomène « infiltrations d'eau contournant le drain » avec la performance de la fonction d'auto-filtration.

Le nombre de règles dans les bases est très faible puisque trois règles suffisent par exemple pour déterminer le phénomène « insuffisance de la capacité de drainage » :

- (R1) - SI note Indicateur Fuite > 2 OU SI note Indicateur Piézométrie > 2 ALORS note Phénomène Infiltration = MAX (note indicateur Fuite, note indicateur Piézométrie) ;
- (R2) - SI note Indicateur Fuite ≤ 2 ET SI note Indicateur Piézométrie ≤ 2 ET SI note Performance Fonction Etanchéité ≤ 2 ALORS note Phénomène Infiltration = note Performance Fonction Etanchéité ;
- (R3) - SI note Indicateur Fuite ≤ 2 ET SI note Indicateur Piézométrie ≤ 2 ET SI note Performance Fonction Etanchéité > 2 ALORS note Phénomène Infiltration = note Performance Fonction Drainage.

La Règle R1 montre le rôle et le poids des indicateurs directs : la présence de fuites ou de piézométrie renseigne immédiatement sur le phénomène d'insuffisance de capacité de drainage et il ne reste qu'à évaluer la gravité de ces fuites ou de la présence de piézométrie pour quantifier ce phénomène.

La Règle R2 indique qu'en l'absence d'indicateurs directs du phénomène d'insuffisance de capacité de drainage et que si aucun problème d'étanchéité n'a été signalé, aucune infiltration particulière n'est à attendre sur le remblai aval.

Enfin la Règle R3 enseigne qu'en absence d'indicateurs directs du phénomène d'infiltrations et en présence d'une perte de performance de la fonction d'étanchéité (note strictement supérieure à 2), le phénomène d'infiltration est sous la dépendance du système de drainage : si les drains fonctionnent correctement et n'ont pas atteint la limite de leur capacité, les infiltrations dans le remblai sont considérées comme nulles. Par contre, si le système de drainage est lui aussi dégradé, des infiltrations se produisent dans le remblai aval, à hauteur de la note de performance de la fonction de drainage.

Pour la combinaison du phénomène « d'infiltration » avec la performance de la fonction d'auto-filtration, le même type de règles est formalisé.

La performance du barrage par rapport à l'érosion interne peut être très différente de la performance de ses composants ou de ses fonctions : en l'occurrence, il faut que les trois fonctions soient défaillantes pour qu'il n'y ait plus de bouclier et qu'il y ait érosion. Si uniquement une ou deux fonctions sont défaillantes, on considère que la performance par rapport à l'érosion interne est conservée.

Le modèle n'est pas chronologique : la défaillance de la fonction de drainage peut se produire avant la défaillance de la fonction d'étanchéité par exemple. C'est le cas lorsqu'on détecte un collecteur de drainage obstrué alors que par ailleurs le niveau des fuites reste faible et non évolutif.

Pour les remblais à étanchéité interne, les fonctions concernées sont les fonctions d'étanchéité, de drainage et d'auto-filtration. La démarche est similaire.

2.4.1.2 Erosion interne liée à la présence d'un ouvrage traversant

Sur la Figure 32 est représentée la structuration des données pour l'obtention de la note de performance du barrage par rapport à l'érosion interne liée à la présence d'un ouvrage traversant.

Le modèle se caractérise par une seule fonction : « Résistance à l'érosion interne liée à la présence d'un ouvrage traversant » évaluée par un indicateur direct (fuites sur le remblai aval dans l'environnement de l'ouvrage traversant) ou cinq indicateurs indirects qui sont combinés par l'opérateur maximum.

Tous ces indicateurs quantifient des faiblesses du système par rapport à ce mécanisme particulièrement redouté et donc particulièrement examiné par les experts. Cette configuration permet, dès que l'ingénieur détecte un problème, d'avoir une répercussion directe sur la sécurité par rapport au mode de rupture.

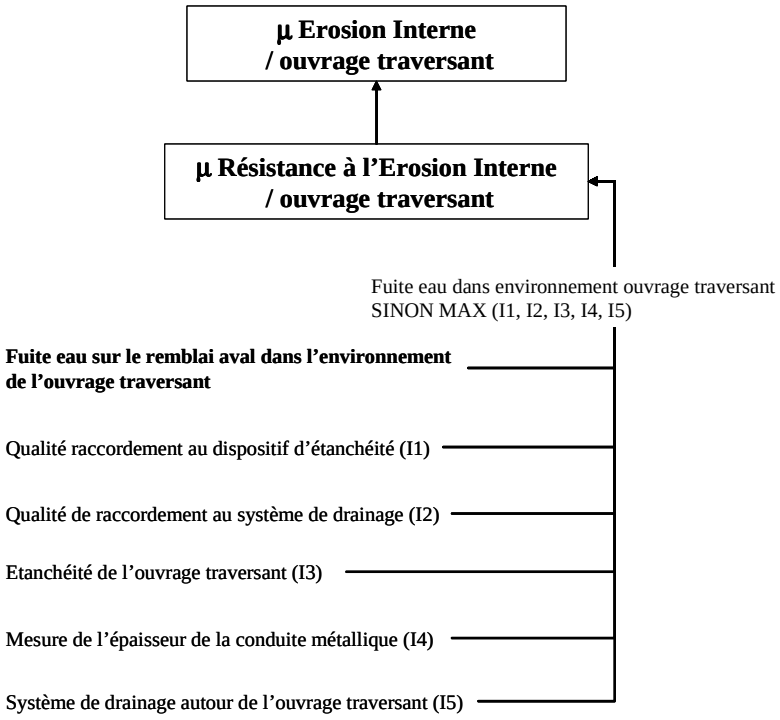


Figure 32 : Agrégation des indicateurs pour l'évaluation de la performance - Erosion interne liée à la présence d'un ouvrage traversant (en gras : indicateur direct)

2.4.2 Détermination de la conformité aux règles de l'art

La Figure 33 donne un exemple de détermination de la conformité aux règles de l'art pour le système de drainage.

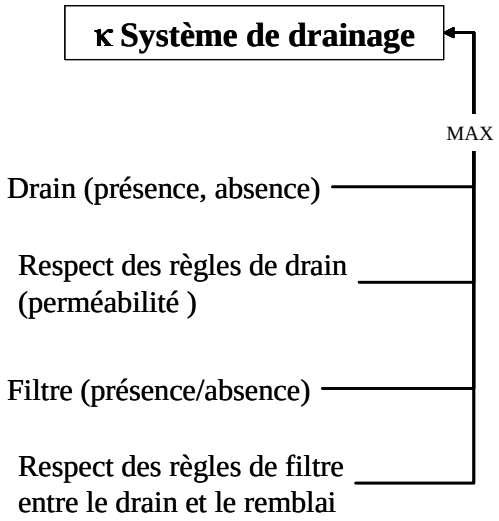


Figure 33 : Agrégation des indicateurs pour l'évaluation de la conformité aux règles de l'art - Exemple du système de drainage

Rappelons que ces barrages peuvent être touchés par d'autres modes de rupture que celui présenté dans ce chapitre : la surverse, le glissement du remblai, le glissement du remblai et de la fondation, l'érosion interne dans le remblai et l'érosion interne dans la fondation meuble. Des mécanismes de dégradation ne menant pas à la rupture peuvent également se produire : tassements différentiels de la fondation meuble, dissolution, cisaillement ou débourrage dans les fondations rocheuses. A terme, il est prévu de traiter l'ensemble de ces modes de rupture et mécanismes de vieillissement. Le Tableau 21 donne l'état d'avancement des travaux pour ces différents cas. Au total, ont été identifiés ou formalisés :

- cinquante-six indicateurs visuels ;
- quatorze indicateurs auscultés ;
- dix indicateurs calculés ;
- cent trente-huit indicateurs de conception ou réalisation.

Composant	Mode de rupture ou mécanismes de dégradation	Prévu	Formalisation en cours	Formalisation terminée	En cours de validation	Validé
Remblai	Erosion interne dans le remblai					X
	Erosion aux interfaces (ouvrages traversants, interface remblai-fondation)			X		
	Glissement des talus ou du talus et de la fondation			X		
	Surverse		X			
Fondations[11]	Erosion interne dans les fondations meubles (renard hydraulique, boulance)				X	
	Tassements des fondations meubles	X				
	Cisaillement des fondations meubles			X		
	Erosion interne des fondations rocheuses (débourrage, dissolution)			X		
	Cisaillement des fondations rocheuses	X				
	Tassement – Poinçonnements des fondations rocheuses	X				

Tableau 21 : Etat d'avancement de la formalisation pour les différents modes de rupture et mécanismes de dégradation

[11] Le travail de recueil et de formalisation des connaissances a été conduit dans le cadre d'un stage de fin d'études d'ingénieur (Argelliès, 2007)

2.5 Validation interne

Nous rappelons que les objectifs de l'étape de validation interne sont :

- de valider la grille de description des indicateurs formalisés ;
- de comparer les évaluations données par plusieurs experts pour tester la cohérence du groupe (reproductibilité). Nous pouvons formuler deux questions :

  ⇒ est-ce que collectivement (le groupe d'experts) les experts évaluent de la même manière d'une part, les performances des fonctions et d'autre part, les barrages?

  ⇒ est-ce qu'individuellement (deux à deux) les experts évaluent de la même manière, d'une part, les performances des fonctions et, d'autre part, les barrages ?
- de comparer l'évaluation de la performance vis-à-vis du mode de rupture considéré qui a été donnée par les experts et celle fournie par le modèle.

2.5.1 Interface développée

Une interface graphique a été implémentée afin de faciliter la notation et de permettre l'enregistrement des données fournies par les experts. Elle comporte autant de pages qu'il y a de fonctions impliquées dans le mode de rupture considérée : la Figure 34 illustre cette interface pour l'exemple de l'érosion interne dans le remblai à étanchéité amont. Elle comporte quatre pages, chacune d'elles étant dédiée à une fonction du barrage impliquée dans l'érosion interne : protection de l'étanchéité, étanchéité, drainage et auto-filtration. Le passage d'une fonction à l'autre, donc d'une page à l'autre, se fait par un simple clic sur l'onglet.

Chaque page comporte les mêmes éléments : indicateurs visuels, indicateurs d'auscultation, indicateurs calculés, indicateur de conception ou réalisation (« dossier barrage ») lorsqu'ils existent. Par exemple, il n'y a ni rubrique « auscultation » ni rubrique « modèle » pour la fonction de protection de l'étanchéité car aucun indicateur de cette nature n'a été identifié. En outre, un bouton « Calcul Performance » affecté à chaque page, permet l'affichage de la performance de la fonction concernée sur la base du modèle présenté en Figure 12, une fois tous les indicateurs renseignés par le notateur, à l'aide des curseurs.

Au final, lorsque tous les indicateurs ont été renseignés pour chacune des fonctions, un clic sur le bouton « Calcul Performance Mode de Rupture » demande à l'utilisateur d'indiquer sa propre notation avant que la performance par rapport à l'érosion interne calculée par l'outil ne s'affiche. C'est sur la base de ces deux notes que sera réalisée la validation du modèle.

Un espace d'aide a été implémenté au travers d'un menu d'aide général et de menus d'aide à la mesure. Le premier explique le fonctionnement global de l'outil et la manière de l'utiliser. Le second rappelle à l'opérateur l'emploi des indicateurs. Il y a autant de menus d'aide à la mesure qu'il y a d'indicateurs sensoriels. Un clic de souris sur un nom d'indicateur sensoriel entraîne l'ouverture d'une fenêtre : le nom, la définition et le lieu d'échantillonnage s'affichent à l'écran (cf. Figure 34).

Des messages d'erreur ont été prévus si la notation ne correspond pas aux jalons établis lors des séances. L'expert peut soit choisir de modifier sa note afin d'utiliser une des notes prévues ou encore de conserver sa première notation : dans cette éventualité, il doit justifier son choix dans la fenêtre « Commentaires » qui apparaît en fin d'exercice.

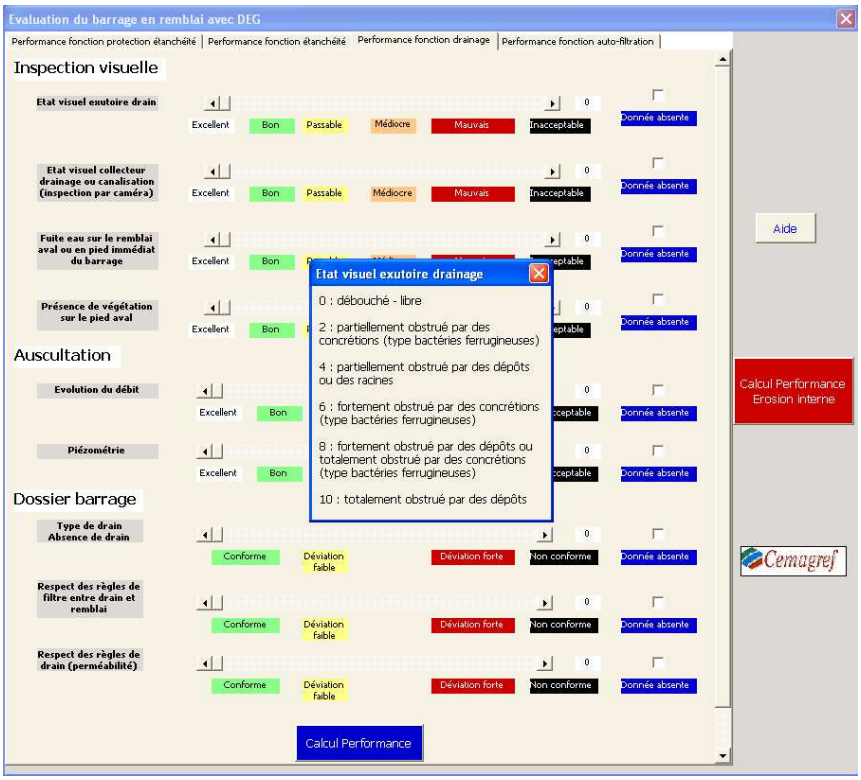


Figure 34 : Interface d'aide à l'évaluation

Un système de traçabilité des données est associé à l'outil d'évaluation de la performance. Il enregistre toutes les données fournies par l'utilisateur et les classe directement dans une feuille de calcul dédiée à un type de barrages ; par exemple, l'une d'elles est consacrée aux barrages à masque amont en béton bitumineux, une autre aux masques amont en béton conventionnel…Les données enregistrées sont :

- date de l'évaluation ;
- nom du barrage ;
- nom du notateur ;
- valeurs de tous les indicateurs ;
- indication de présence/absence d'une donnée : ce champ permet de ne traiter que les indicateurs réellement mesurés par les experts (il ne faut pas confondre une note 0 donnée par le notateur et une note 0 correspondant à une absence de donnée) ;
- performance des différentes fonctions ;
- performance vis-à-vis du mode de rupture : note donnée par l'utilisateur et note calculée par le modèle.

2.5.2 Données recueillies

L'analyse a été conduite, sur huit barrages, par cinq experts ayant participé aux séances de recueil. Chaque expert est invité à faire sa notation de manière individuelle pour chacun des dossiers en utilisant l'interface développée qui permet également un enregistrement des données. Une séance de restitution des résultats a ensuite été organisée afin de présenter l'ensemble des résultats au groupe et de les discuter, d'affiner la description de certains indicateurs et de revenir sur certaines notations.

Sont enregistrées sur les feuilles de calcul de l'interface :

- les notes des différents indicateurs et l'indication de présence ou absence de données afin de différencier les indicateurs réellement notés à 0 par l'utilisateur de ceux pour lesquels il n'est pas possible de donner une note du fait d'absence d'informations dans le cas test ;
- les évaluations des performances des différentes fonctions ;
- l'évaluation de la performance vis-à-vis du mode de rupture étudié c'est-à-dire la note fournie par l'expert à la fin de l'exercice et la note calculée par l'algorithme.

2.5.3 Résultats de la validation

2.5.3.1 Modification de la grille de description de certains indicateurs

L'utilisation des grilles d'indicateurs pour la notation des dossiers tests a permis de faire apparaître des améliorations à apporter à la description initiale. Une petite dizaine d'indicateurs ont été touchés par les modifications. Ils concernent toutes les fonctions. Les modifications ont été apportées sur les échelles (autoriser la notation jusqu'à 10), sur l'amélioration de la description (introduire la mesure de la profondeur des fentes pour l'indicateur « fente liée au fluage » qui ne prenait en compte que la situation de la fente par rapport aux PHE et niveau d'exploitation normal)…

Ces modifications interviennent ici en phase de construction de l'outil. Nous rappelons qu'il est par contre très préférable que les références soient figées avant l'utilisation de l'outil en routine. Nous avons proposé dans la Partie 2, deux alternatives si des changements devaient être introduits malgré tout dans les échelles lors de la phase d'utilisation.

2.5.3.2 Reproductibilité et caractère discriminant

a) Tests pour les performances des fonctions

Nous souhaitons déterminer si les experts donnent la même évaluation à une même fonction et s'il est possible de différencier les barrages. Pour cela, nous réalisons une ANOVA (Expert x Barrages) pour chacune des performances des fonctions à partir des données de l'Annexe 5. Le Tableau 22 fournit les valeurs de Fisher F et la probabilité associée. Les résultats montrent que l'effet Barrage (p Effet Barrage < 0,05) est significatif ce qui traduit le pouvoir de discrimination du groupe d'experts pour des barrages différents. Quelle que soit la fonction, il n'existe pas de différence significative entre les experts (p Effet Expert > 0,05) : ceci signifie qu'en moyenne, les cinq experts du groupe évaluent les fonctions de la même manière.

	Effet barrage (aléatoire)		**Effet Expert (fixe)**	
	F (B)	**pF(B)**	**F (E)**	**pF(E)**
μ Protect Etanch	7,65	0.0000	2,27	0,0871
μ Etanch	7,60	0,0000	1,78	0,1604
μ Drain	17,47	0,0000	1,18	0,3403
μ Auto-filtr	11,49	0,0000	0,53	0,7118

Tableau 22 : Résultats de l'ANOVA (Expert x Barrage)
F : F de Fisher, p : probabilité associée à F – Risque α = 5 % - ddl B = 7 – ddl E = 4

b) Tests pour les barrages

Une ANOVA (Expert) a été menée pour chaque barrage pour vérifier si, collectivement, les experts donnent la même note à un même barrage (Tableau 23 obtenu par traitement du Tableau A5-1). Un seul score significativement différent est obtenu entre les experts : il s'agit du Barrage 3 (pF(E) < 0,05). Toutefois, le test pour le Barrage 7 est tout juste significatif (pF(E) = 0,0538).

Barrages	Effet Expert	
	F(E)	pF(E)
Barrage 1	0,81	0,53
Barrage 2	1,13	0,37
Barrage 3	3,26	0,03
Barrage 4	0,21	0,93
Barrage 5	0,06	0,99
Barrage 6	0,49	0,75
Barrage 7	2,80	0,05
Barrage 8	0,49	0,82

Tableau 23 : Résultats de l'ANOVA (Expert)
F : F de Fisher, p : probabilité associée à F – ddl E = 4

Nous réalisons une comparaison d'échantillons appariés pour déterminer si les barrages sont évalués comme significativement différents d'un expert à l'autre. Le traitement est conduit à partir des données du Tableau A5-1. L'analyse teste l'hypothèse nulle que la moyenne des différences de notes appariées données par deux experts pour un barrage donné est égale à 0,0 contre l'hypothèse alternative que la moyenne est non égale à 0,0. Lorsque la valeur de la probabilité pour ce test est supérieure ou égale à 0,05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle au niveau de confiance de 95,0%. Des scores significativement différents ont été obtenus pour cinq comparaisons sur quatre-vingts (dix groupes de deux experts – E1/E2, E1/E3, etc. et huit barrages). Les résultats sont présentés dans le Tableau A5-2 de l'Annexe 5.

- pour cinq barrages, aucune différence significative n'est relevée (Barrages 1, 2, 4, 5 et 8) ;
- des différences significatives sont obtenues pour :

  ⇒ le Barrage 3 entre (E1 et E5), (E2 et E5), (E3 et E5) et (E4 et E5) ;

  ⇒ Pour ce barrage, E5 a toujours donné la plus forte note toutes notes confondues. En particulier E5 a donné la note 10 à toutes les fonctions du Barrage 3. Cet ouvrage est un barrage ancien dont les origines remontent au 16ème siècle et qui présente une fuite importante en extrémité rive droite à proximité immédiate de la berge et à environ 2,5 m sous le niveau normal des eaux. Les autres experts ont donné de mauvaises notes à ce barrage mais inférieures à 10 ;

  ⇒ le Barrage 6 entre (E2 et E4) ;

  ⇒ le Barrage 7 entre (E1 et E2), (E1 et E3), (E1 et E5), (E2et E5) et (E3 et E5).

  ⇒ Pour ce barrage, l'expert E1 a donné des notes relativement basses, contrairement à E5.

c) Traitements suite à la séance de présentation des résultats

La séance de présentation des résultats a permis :

- de traiter l'un des dossiers de manière collective par les experts car les experts avaient donné de manière individuelle des écarts de notation assez importants (Barrage 6). L'objectif est de vérifier si, en disposant de plus d'informations, le groupe arrive à un consensus pour la notation. Les notes obtenues de manière collective sont :

  ⇒ μ Protect Etanch = 10 ;

  ⇒ μ Etanch = 7 ;

  ⇒ μ Drain = 7 ;

  ⇒ μ Auto-filtr= 3 ;

⇒ Les cinq notateurs sont tombés très rapidement d'accord sur cette notation après que l'expert qui avait réalisé la visite ait répondu aux questions que se posaient les autres experts ;

- un écart important avait été relevé sur l'un des barrages pour ce qui concerne la fonction d'auto-filtration notée à 0 par E4 et 7 ou 8 par les autres notateurs. Lors de la discussion en séance collective, l'expert E4 a reconnu avoir donné une notation qui ne correspondait pas aux informations du dossier et a alors affecté la note de 7 à l'indicateur « Présence d'arbres ou de souches sur le talus aval ».

2.5.3.3 Conclusion sur la reproductibilité et le caractère discriminant

Ces premiers résultats sont très encourageants compte tenu des conditions de réalisation des tests : analyse de dossiers simplifiés de barrages avec un manque d'informations souligné par les évaluateurs. Voici trois exemples marquants de commentaires faits par les notateurs sur les dossiers : « Il y a beaucoup de données manquantes pour juger des données du dossier barrage sur la fonction drainage et auto-filtration », « Pas assez de connaissance de l'ouvrage (couche support, drain). Imprécisions sur certaines descriptions », « Pour ce barrage, l'étanchéité est mauvaise et on ne sait rien du drainage et de l'auto-filtration ».

La procédure de notation collective suivie d'une modification des notations aurait pu être effectuée pour les deux autres barrages présentant des écarts de notation importants entre experts (Barrage 3 et Barrage 7). Ceci aurait bien sûr conduit à une diminution de l'écart entre les notes moyennes mais cette procédure ne répond pas vraiment aux conditions réelles de réalisation d'une expertise c'est-à-dire :

- l'accès pour l'ingénieur responsable de l'expertise à un dossier complet ;
- la rédaction du rapport d'expertise par un seul ingénieur. Même si un deuxième ingénieur relit le rapport, il ne s'agit toutefois pas d'une évaluation collective.

Nous n'avons donc pas poussé cette analyse plus loin : nous avons vérifié qu'il était possible d'obtenir un consensus dans le groupe si plus d'informations étaient disponibles. Nous avons comme perspectives d'améliorer cette phase de validation interne en réalisant une séance de notation individuelle sur la base de dossiers complets de barrages. Cette manière de procéder correspond à la réalité des expertises et augmente la quantité d'informations disponibles sur le barrage. Toutefois, une partie des imperfections peut subsister, par exemple, si la végétation présente sur le talus amont empêche d'effectuer une mesure ou encore si les instrumentes d'auscultation sont défectueux. Nous abordons là des problèmes d'imperfections des connaissances et des informations. Nous traitons cette question dans le Chapitre 3 de cette même Partie.

2.5.3.4 Comparaison de la performance par rapport à l'érosion interne évaluée par les experts et par le modèle

Afin de comparer les évaluations de la performance par rapport à l'érosion interne fournies par l'algorithme avec les évaluations données par les experts, nous effectuons une comparaison d'échantillons appariés expert-modèle. Les écarts types de ces deux populations ne sont pas significativement différents. Cette analyse montre que pour quatre experts sur cinq, il n'existe pas de différence significative entre ces deux valeurs (cf. Tableau 24) ; les probabilités associées au test sont supérieures au risque α pris à 5 %.

	E1	E2	E3	E4	E5
t-Test	-1,03	-1,37	-1,65	-3,33	-1,85
p	0,34	0,21	0,14	0,01	0,11

Tableau 24 : Résultats du test de comparaison entre l'évaluation des experts et la note fournie par le modèle – Analyse sur huit barrages

Le barrage 2 a été évalué très différemment par l'Expert 4 et par l'outil.

Pour le Barrage 2, E4 a donné une note (note 6) très supérieure à celle établie par l'algorithme (note 0). Il est important de mentionner que la note de performance vis-à-vis de l'érosion interne donnée par E 4 est en cohérence avec les notations faites par les autres experts. Cet écart provient du fait que E4 a mis une note « 0 » à l'indicateur « Présence d'arbres ou de souches sur le talus aval » alors que dans le texte était indiqué « On signale la présence de grands arbres sur le talus pendant plusieurs décennies ». Les autres notateurs ont fourni les notes 7 ou 8. Comme la performance de la fonction d'auto-filtration a été évaluée à 0, compte tenu de la note de l'indicateur « Présence d'arbres ou de souches sur le talus aval », l'algorithme affecte donc une note de 0 à la performance vis-à-vis de l'érosion interne. En effet, nous rappelons qu'il faut que les trois fonctions soient défaillantes pour que la performance par rapport à l'érosion interne soit dégradée. Lors de la discussion en séance collective, l'Expert a reconnu avoir donné une notation qui ne correspondait pas aux informations du dossier et a alors affecté la note de 7 à l'indicateur « Présence d'arbres ou de souches sur le talus aval ». Avec cette nouvelle note, l'algorithme donne la note 7. Nous avons effectué de nouveau la comparaison entre les évaluations des experts et l'évaluation donnée par l'algorithme avec cette nouvelle valeur. Le résultat du test est 1,52 et la probabilité associée de 0,18. Il n'y a pas de différence significative entre l'évaluation de l'expert et la note calculée par l'algorithme pour E4.

Ainsi, les résultats donnés par l'algorithme correspondent aux résultats donnés par les experts. Ceci montre sur ces premiers résultats que le modèle d'agrégation proposé permet bien d'atteindre la notation de la performance du barrage vis-à-vis du mode de rupture par érosion interne telle que réalisée par les experts. En revanche, nous n'avons pas demandé aux évaluateurs de fournir pour chaque fonction sa propre notation afin de ne pas alourdir le système. Il serait peut-être judicieux d'intégrer ce niveau lors de prochaines sessions de validation.

La question de la fiabilité humaine a été soulevée dans l'exemple de la notation du Barrage 2 par l'Expert 4 : un seul indicateur noté incorrectement ou oublié peut faire totalement dévier le résultat. Ce problème de notation incorrecte suite à un oubli ou une erreur d'évaluation renvoie également à des questions de sensibilité du modèle vis-à-vis des indicateurs. Nous reviendrons sur ces aspects dans le Chapitre 2 de cette même Partie. Afin de réduire ces problèmes d'erreur ou d'oubli de notation, nous proposons qu'une fenêtre récapitulant toutes les notes affectées aux indicateurs apparaisse avant la fin de l'exercice : ceci permettrait au notateur de vérifier qu'il a bien noté l'ensemble des indicateurs pertinents. Cet aspect de fiabilité n'a que peu été traité jusqu'à présent dans notre outil, hormis les messages signalant que la note affectée est différente des jalons prédéfinis et établis collectivement lors des séances de recueil.

Il est important de noter que les experts ont consacré un temps limité aux exercices de notation ce qui ne sera pas le cas lorsqu'ils utiliseront l'outil en situation réelle. De même les données présentées lors des exercices sont beaucoup plus partielles que les données et informations recueillies et analysées par les experts lors des inspections.

Nous allons à présent montrer une application de la méthode dans le cadre du suivi d'un barrage dans le temps. Nous avons utilisé le logiciel prototype développé pour réaliser la notation, les données étant enregistrées dans la base de données.

3. Suivi de la performance d'un barrage au cours du temps

Comme nous l'avons vu plus haut, une des utilisations possibles de notre méthodologie est le suivi de barrages dans le temps avec une photographie à différents instants. Nous avons choisi de présenter une application de cette utilisation dans ce chapitre.

3.1 Description du barrage

Le barrage étudié est le barrage de Cublize également appelé barrage des Sapins. Cet exemple a été retenu car les désordres que ce barrage a connus ont été très largement et précisément décrits dans la thèse de Laurent Peyras (Peyras, 2003).

Le barrage de Cublize (département 69) est constitué d'un remblai quasi-homogène en arènes granitiques (environ 80 % de sable), de 16 m de hauteur maximale, créant un plan d'eau de 35 ha pour une capacité de 2 hm^3. L'ouvrage, fondé sur un massif granitique est pourvu d'un drain vertical arasé deux mètres en dessous du niveau normal des eaux (cote RN) et d'un drain horizontal au contact fondation-remblai sur la moitié aval du remblai. Construit en 1977 et 1978, le barrage a fait l'objet d'une première mise en eau en novembre-décembre 1978. Le niveau est ensuite resté très proche de la cote RN, sauf deux vidanges partielles de 2 m sous la cote RN en novembre 1981 et décembre 1985.

3.2 Chronologie des défaillances

Un ensemble de phénomènes a été relevé sur le barrage entre 1978 et 1988 : diminution des débits des drains, zone humide au niveau du pied aval du remblai, venues d'eau avec entraînement de matériaux... Le Tableau 25 présente la chronologie des désordres relevés sur le barrage de Cublize entre sa mise en eau en 1978 et sa vidange d'urgence en 1988. Sont également fournies les interprétations établies, a posteriori, par les experts à partir des différents indicateurs : ceux-ci permettent la détection du phénomène à la date à laquelle la mesure a été faite ; le phénomène a cependant pu débuter avant mais il n'a pas été observé. Le mécanisme a été analysé comme étant un mécanisme de suffusion.

On notera que, si le barrage avait été correctement ausculté dès sa première mise en eau, ce n'est qu'après les constats alarmants des inspections visuelles de 1988 qu'on a procédé à une analyse des mesures d'auscultation.

Dates	Observations	Interprétations
Octobre-décembre 1978	Première mise en eau	
Octobre 1978	Augmentation des pressions interstitielles lors du 1er remplissage Stabilisation rapide à cote normale	
Avril 1979	Pressions indiquent des valeurs non conformes à un fonctionnement normal : 1ère montée des pressions sur les cellules inférieures (C4 et C5)	Colmatage partie inférieure du drain – diminution sensible de la capacité à évacuer les infiltrations Colmatage entraîné par un mécanisme de suffusion des arènes granitiques du remblai, une granulométrie du drain inadaptée (granulométrie grossière) et non respect des règles de filtre par rapport au remblai
Juillet 1980	Pressions indiquent des valeurs non conformes à un fonctionnement normal : augmentation de la cellule C3 située en partie haute en amont immédiat du drain vertical	
Novembre 1980	Valeurs de la pression mesurée par C3 atteignent des valeurs correspondant à la cote RN	
Jusqu'à Novembre 1980	Augmentation progressive des débits de drain (retard classique par rapport à la piézométrie)	
Novembre 1980 à Novembre 1981	Diminution des débits de drainage (concorde avec la piézométrie)	Colmatage drain vertical
Novembre 1981	Vidange partielle (-2 m par rapport à RN) Débit de drain remontent autour d'un maximum de 1,5 L/s	Nettoyage partiel des drains lié à la vidange partielle
Octobre 1982 à Octobre 1984	Diminution des débits de drain pour atteindre en Oct 1984 : 0,1 à 0,2 L/s	Colmatage quasi-intégral du dispositif de drainage
Décembre 1985	Vidange partielle (-2 m par rapport à RN)	
Septembre 1988	Zone humide en pied aval	Saturation des remblais amont et aval par contournement par le haut (rendu possible par un sommet du drain inférieur à la cote RN)

Dates	Observations	Interprétations
Mi-octobre 1988	La zone humide s'est agrandie. Des glissements localisés sont observables sur environ une dizaine de m de long sous la risberme aval (cote 429,5) : critère de stabilité au glissement du remblai aval = 1,10	
2 jours plus tard	Venues d'eau avec entraînement de matériaux sont visibles dans le même secteur Vidange totale du plan d'eau	Amorce d'un renard hydraulique
Quelques semaines après vidange d'urgence	Mise en évidence grâce à des tranchées de reconnaissance d'une zone de circulation préférentielle dans le remblai aval autour de la cote 429,5	

Tableau 25 : Chronologie des désordres relevés sur le barrage de Cublize (tableau construit à partir de Peyras, 2003)

3.3 Représentation des désordres et analyse

Nous avons découpé la vie du barrage de Cublize entre 1978 et 1988 en un certain nombre d'instants : un instant est défini par l'évolution d'un ou de plusieurs indicateurs. Nous avons ainsi pu décomposer cette période de la vie du barrage en onze instants d'observation. Chacun d'eux est représenté par un diagramme radar (cf. Figure 35) : une branche du diagramme correspond à l'évaluation de la performance d'une des fonctions impliquées dans l'érosion interne (étanchéité, drainage et auto-filtration). Une performance optimale est indiquée par une zone totalement vide. Un des experts ayant participé à l'élaboration du modèle a réalisé la notation des différents indicateurs aux différents instants d'évaluation.

La représentation sous forme de diagrammes radars autorise le suivi des phénomènes se déroulant dans le barrage : le comportement du barrage est traduit sous la forme d'une trajectoire multidimensionnelle. Cette trajectoire est construite à partir de points correspondant à des instants d'observation : le temps séparant deux événements (donc deux points de la trajectoire) est a priori variable sur l'ensemble de la trajectoire du fait, d'une part, de cinétiques différentes pour chacun des phénomènes en jeu et, d'autre part, de la date de mise en œuvre d'actions correctives (cf. Figure 36). Il est possible ainsi d'avoir des renseignements sur la dynamique des phénomènes pour un barrage correspondant au type de Cublize. Enfin nous avons représenté sous la forme d'une courbe l'évaluation de la performance vis-à-vis de l'érosion interne au cours du temps.

La Figure 36 illustre l'évolution de la performance du barrage de Cublize au cours de sa vie. Pour les premières années, d'octobre 1978 à octobre 1981, les diagrammes permettent de mettre en évidence une dégradation de la fonction de drainage jusqu'à sa défaillance totale en octobre 1988. Cette dégradation de la fonction est évaluée tout d'abord à partir de l'augmentation des valeurs fournies par les cellules de pression puis à partir de novembre 1980 par une diminution du débit de drainage. Ces deux types de mesures sont des indicateurs directs du phénomène « infiltrations d'eau contournant le drain ». La fonction d'auto-filtration est également dégradée du fait de la combinaison d'une perméabilité des matériaux du remblai correcte mais non parfaite et d'une granulométrie de drain inadaptée associée à un non-respect des règles de filtre par rapport au remblai. La performance du barrage par rapport à l'érosion interne atteint une évaluation qualifiée de « mauvaise » en 1981.

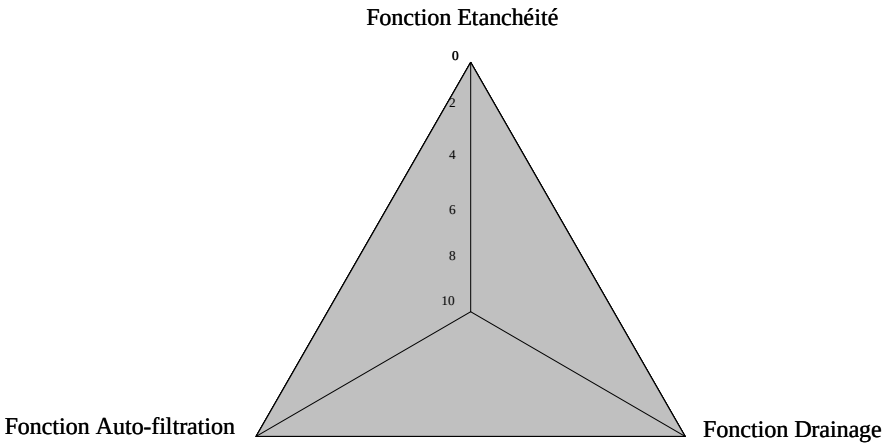
En novembre 1981, une vidange partielle entraîne un nettoyage partiel des drains : la fonction de drainage est de nouveau opérationnelle et la performance par rapport à l'érosion interne est évaluée comme excellente.

La fonction de drainage, et par conséquent la performance, se dégradent à nouveau entre octobre 1982 et octobre 1984 avec un colmatage quasi-intégral du dispositif de drainage : le débit mesuré en octobre 1984 est de 0,1 à 0,2 L/s. En décembre 1985 une vidange partielle a lieu mais est sans effet sur le colmatage du réseau de drainage.

En septembre 1988, une zone particulièrement humide est repérée au pied aval de l'ouvrage. A la mi-octobre 1988, des venues d'eau sont notées avec entraînement de matériaux : la fonction d'auto-filtration est défaillante, la performance du barrage est inacceptable, une vidange d'urgence vient clôturer cet accident. Des travaux de confortement ont été réalisés quelques mois plus tard. On peut se rendre compte de la rapidité de mise en place de ce mécanisme, amorcé cependant une dizaine d'années auparavant et qui relève principalement de problèmes de conception : système de drainage mal adapté par rapport à la granulométrie des matériaux du remblai et drain arasé sous le niveau normal des eaux.

Cette application montre l'utilisation possible de la méthode pour le suivi des barrages dans le temps : l'approche consiste à étudier la dérive d'une ou plusieurs variables (notamment fonctions mais également indicateurs) au cours du temps, c'est-à-dire par exemple d'une visite décennale à la suivante.

Octobre 1978



Octobre 1980

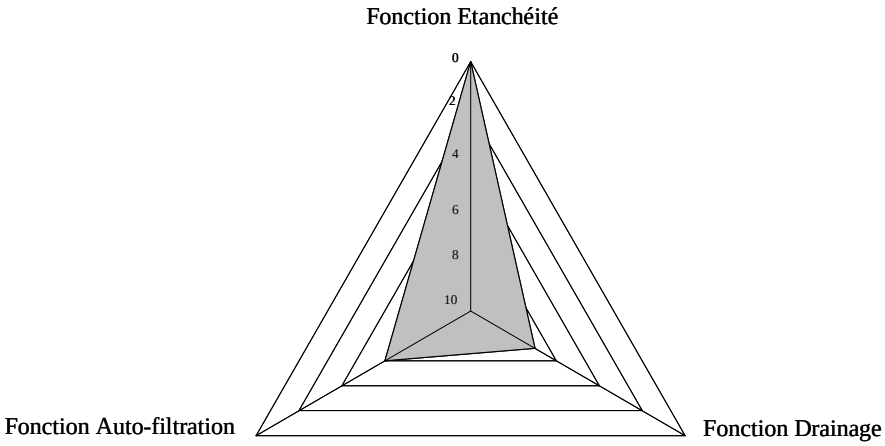


Figure 35 : Exemples de représentation sous la forme radar de désordres ayant affecté les fonctions du barrage de Cublize entre 1978 et 1988

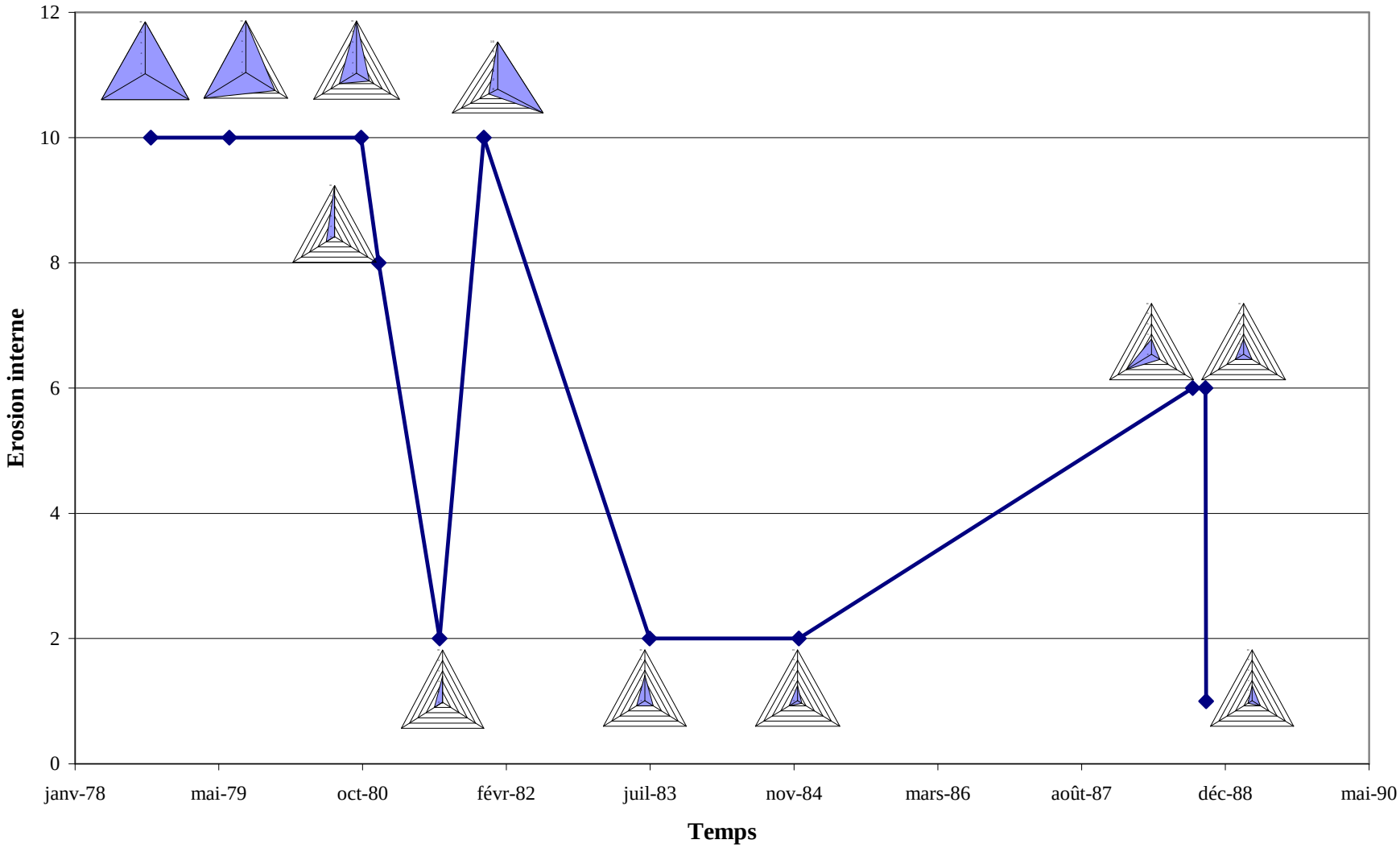


Figure 36 : Représentation chronologique des événements survenus sur le barrage de Cublize entre 1978 et 1988

4. Comparaison de la méthode développée par le Cemagref avec la méthode développée par Hydro-Québec

Le but de cette comparaison est de déterminer s'il existe des similitudes entre la méthode que nous avons développée au sein du Cemagref d'Aix-en-Provence et d'autres méthodes qui ont été mises en place par d'autres organismes. Il ne s'agit en aucun cas d'établir qu'une méthode est meilleure qu'une autre. En effet, « la connaissance recueillie ne peut pas être l'objet de validation au sens classique, car il s'agit d'une connaissance personnelle et/ou collective qui est très particulière à l'entreprise […] et pour laquelle il n'existe jamais de modèle externe de référence » (Ermine, 2001). Nous souhaitons, par contre, mettre en exergue les différences et similitudes entre les méthodes afin de dégager d'une part, les connaissances communes qui relèvent de la science du génie civil et d'autre part, les connaissances particulières à chaque méthode qui sont, en général, fortement liées à l'objectif de la méthode et/ou aux types de barrages considérés.

Pour ce faire, nous disposons d'un support permettant une comparaison très pertinente et pouvant être très précise : en effet, nous avons pu accéder à l'intégralité de la méthode des Indices de Condition (IC) déployée par Hydro-Québec pour l'évaluation de son parc. Un point important est à signaler : le recul sur les deux méthodes est très différent puisque la méthode IC est opérationnelle, ce qui n'est pas encore le cas pour la méthode que nous développons.

La méthode IC est une procédure de classement prioritaire des actions de maintenance à effectuer sur les barrages du parc d'Hydro-Québec. Elle comporte deux approches :

- l'analyse des systèmes de défense définie dans le manuel d'utilisation de la méthode IC comme « groupes de composantes physiques conçues pour travailler ensemble pour prévenir les différents modes de rupture » (Hydro-Québec, 2005) ;
- l'analyse des activités et dispositifs de surveillance définie dans le même manuel par « toute l'auscultation et les surfaces d'observation, comme la zone aval, le parement aval, la crête, les appuis, etc., qui sont utilisées par le personnel d'inspection pour établir le comportement des différentes composantes d'un barrage » (Hydro-Québec, 2005).

L'évaluation de la performance dans l'approche du Cemagref rejoint l'analyse des systèmes de défense. La suite de ce chapitre s'intéresse uniquement à cette dernière. Nous reviendrons sur l'analyse des activités et dispositifs de surveillance dans le chapitre Perspectives.

Pour effectuer la comparaison, nous nous plaçons sur deux plans : les types de connaissances utilisées et l'agrégation qui est mise en œuvre pour atteindre l'objectif visé par chacune des méthodes, objectif pouvant varier d'une méthode à l'autre. Nous analysons au paragraphe 6.3 un même barrage mené avec les deux méthodes différentes.

4.1 Comparaison des types de connaissances utilisés

Les types de données pris en compte dans les deux méthodes sont les mêmes : observations visuelles, mesures issues de l'auscultation, données issues des modèles mécaniques, caractéristiques du barrage. Les indicateurs manipulés sont identiques dans les deux méthodes. Pour l'érosion interne dans le remblai, on trouve :

- les mêmes indicateurs visuels : détection de fuites, glissement, présence de fontis ou de tassements… ;
- les mêmes indicateurs d'auscultation : piézométrie, débit ;
- les mêmes indicateurs issus de modèles mécaniques : coefficient de sécurité au glissement.

Ces différentes informations présentent d'ailleurs un caractère universel : les indicateurs de fuites, de tassements (localisé ou général), de fissuration… et les mesures d'auscultation (débit, pressions interstitielles…) sont couramment cités, notamment dans les communications aux Congrès Internationaux sur les Grands Barrages, pour le suivi des barrages, partout dans le monde.

Dans la méthode du Cemagref sont traités les barrages à étanchéité amont, contrairement à la méthode d'Hydro-Québec car ce type d'ouvrages est peu fréquent dans le parc. Ceci entraîne l'introduction d'indicateurs liés au composant « masque amont » dans la méthode du Cemagref.

Les champs des grilles de formalisation des indicateurs des deux méthodes sont proches :

- échelle et référence : une échelle unique est utilisée pour la notation dans les deux organismes. Cette échelle va de 0 à 100 pour Hydro-Québec et de 0 à 10 pour le Cemagref. L'axe temporel est également présent dans la méthode IC : par exemple, des niveaux piézométriques « supérieurs mais constants » obtiendra une meilleure note que des niveaux piézométriques « supérieurs mais en évolution ». Ceci rejoint totalement la description donnée par les experts du Cemagref pour les références de l'indicateur « piézométrie » : l'évolution de cette mesure est mentionnée comme étant un facteur aggravant (cf. Tableau 5) ;
- caractéristique spatiale : une caractéristique spatiale est précisée dans la description des indicateurs de la méthode IC comme le parement aval ou la crête dans l'indicateur « profondeur des ornières ou des sillons d'érosion sur la crête ou le parement aval » ;
- caractéristique temporelle : elle est liée comme dans le cas de la méthode du Cemagref à la fréquence des inspections.

4.2 Agrégation des données

4.2.1 Comparaison des méthodes d'agrégation

La Figure 37 expose la méthode d'agrégation pour la méthode IC et la méthode développée dans ce mémoire.

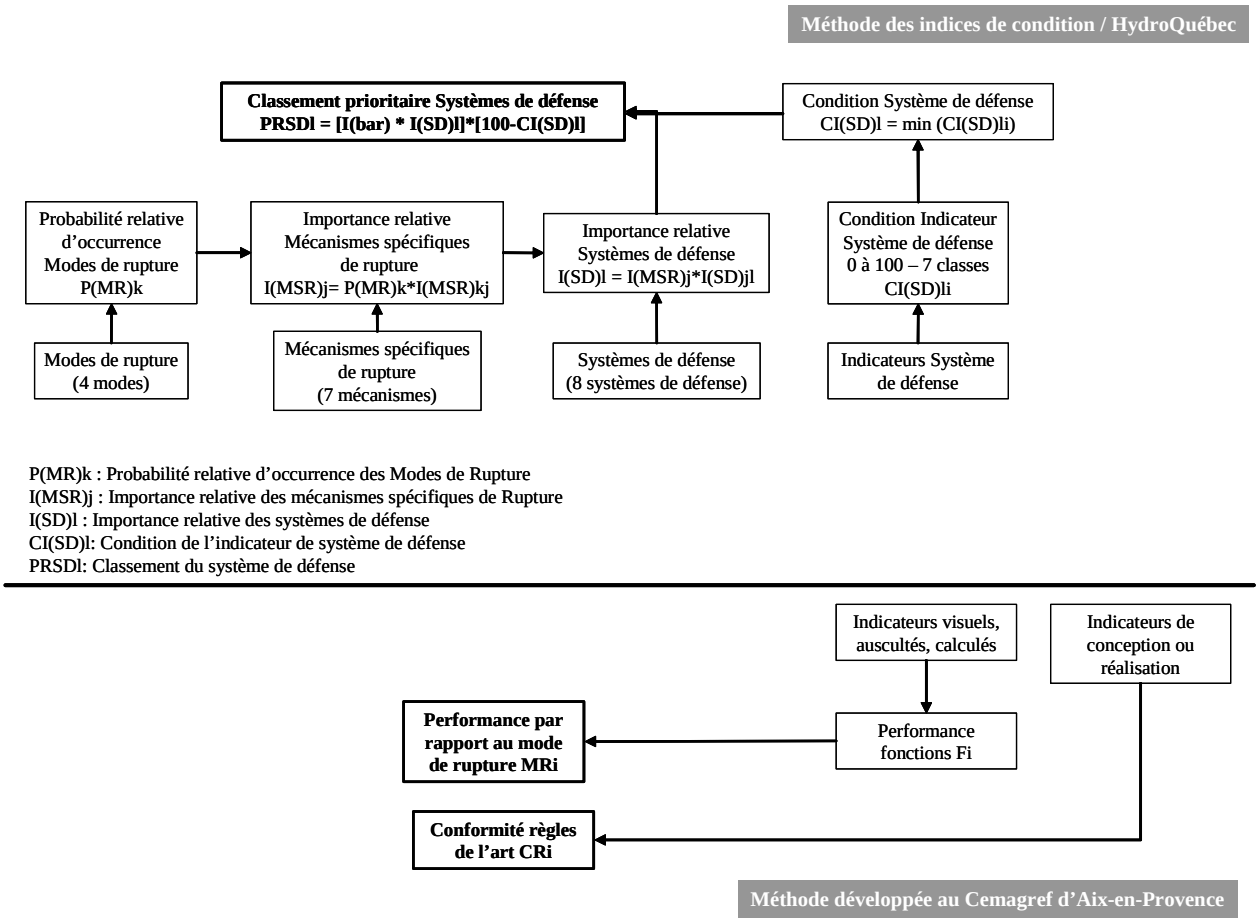


Figure 37 : Démarche Hydro-Québec et démarche Cemagref

L'agrégation des indicateurs permet d'établir (cf. Figure 37) :

- la performance et la conformité aux règles de l'art d'un ouvrage dans la démarche du Cemagref ;
- des priorités de maintenance dans la démarche d'Hydro-Québec, ce qui implique un classement des ouvrages du parc les uns par rapport aux autres.

L'agrégation des données dans la méthode des IC procède par une approche de type analyse de risque (cf. Figure 37) :

- l'ingénieur établit tout d'abord les probabilités relatives des modes de rupture de l'ouvrage. Quatre modes de rupture sont identifiés : débordement en crête, glissement en masse, érosion externe, érosion interne dans le remblai ou la fondation, y compris l'érosion du remblai le long de surfaces bétonnées ou métalliques. La probabilité relative d'occurrence est une valeur de 0 à 100 % ; la somme des probabilités relatives des quatre modes de rupture est égale à 100 ;
- il renseigne ensuite l'importance relative des mécanismes spécifiques de rupture. Sept mécanismes spécifiques de rupture ont été mis en évidence : diminution de la revanche, érosion interne des matériaux de remblai, érosion interne des matériaux de fondation, détérioration de la protection de surface du remblai, détérioration de la protection de surface des appuis et de la plage aval, glissement à travers le remblai, glissement à travers le remblai et la fondation ;

- il indique l'importance relative des systèmes de défense qui sont au nombre de huit : maintien de la cote nominale de la crête, contrôle de la filtration dans le remblai, contrôle de la pression dans le remblai, contrôle de la filtration dans la fondation, contrôle de la pression dans la fondation, protection du parement amont, protection de la crête et du parement aval, protection des appuis et de la plage aval ;
- il affecte une note à l'ensemble des indicateurs qui sont combinés par l'opérateur minimum afin d'obtenir le score du système de défense ;
- la détermination de l'indice de condition se poursuit en combinant l'ensemble de ces probabilités et valeurs d'importance relative avec la note affectée à chaque système de défense.

Pour la détermination des probabilités et importances relatives, des valeurs guides sont fournies ; elles ont été établies par le retour d'expériences. Par exemple, des valeurs sont indiquées pour les probabilités relatives en ce qui concerne les quatre modes de rupture pour des ouvrages sur fondation alluvionnaire. De même, des valeurs indicatives sont proposées pour chacun des modes spécifiques de rupture en fonction du mode de rupture considéré. Par exemple, le mécanisme spécifique de rupture « Diminution de la revanche » contribue pour 100 % au mode de rupture « Débordement ». Néanmoins, l'ingénieur peut ajuster les probabilités relatives, s'il le pense nécessaire, en justifiant son choix.

4.2.2 Mécanismes de rupture étudié

Le Tableau 26 liste les différents mécanismes de rupture étudiés dans chacune des méthodes.

Méthode Hydro-Québec	**Méthode Cemagref**
Diminution de la revanche	Surverse
Erosion interne des matériaux de remblai Erosion interne des matériaux de fondation	Erosion interne dans le remblai Erosion interne de la fondation meuble Erosion liée aux ouvrages traversants
Détérioration de la protection de surface du remblai Détérioration de la protection de surface des appuis et de la plage aval	
Glissement à travers le remblai Glissement à travers le remblai et la fondation	Glissement du remblai Glissement du remblai et de la fondation

Tableau 26 : Liste des modes de rupture traités dans la méthode Hydro-Québec et dans la méthode Cemagref

Plusieurs sont communs. Les spécificités portent sur la prise en compte :

- de l'érosion externe des barrages québécois qui est un mode de rupture compte tenu de l'action très préjudiciable des vagues vu l'immensité des retenues. Ce mécanisme n'est pas un mode de rupture dans le cas des barrages français. Il correspond à un mode de dégradation ;
- de l'érosion interne liée aux ouvrages traversants dans le cas de la méthode Cemagref. Ce mode de rupture n'est pas traité en tant que tel dans la méthode Hydro-Québec car il existe très peu d'ouvrages présentant des conduites traversantes. Par contre, la présence de structures, de conduits ou d'équipements enfouis dans l'ouvrage est un attribut négatif qui apparaît dans la fiche descriptive du barrage ;

Dans la méthode Cemagref sont aussi évalués des mécanismes de dégradation qui toutefois, ne conduisent pas à la rupture. Ce sont :

- pour les fondations meubles : le poinçonnement et le tassement différentiel ;
- pour les fondations rocheuses : la dissolution, le cisaillement, le débourrage.

Dans la méthode IC, ces modes de dégradation sont étudiés au regard du glissement à travers le remblai et la fondation. En outre, certains de ces mécanismes de dégradation sont très peu fréquents sur les ouvrages d'Hydro-Québec. Ceci provient du fait :

- que les sols d'origine alluvionnaire ou les sols morainiques possèdent habituellement des capacités portantes admissibles fort élevées ;
- que la grande majorité des fondations rocheuses sont composées de roches ignées ou métamorphiques de bonne résistance mécanique ;
- que la plupart des structures bétonnées sont construites sur un socle rocheux compétent et stable ;
- qu'il existe peu de fondations touchées par des problèmes d'écoulement localisé dans des rocs jointés et partiellement solubles.

4.2.3 Systèmes de défense et fonctions

Les systèmes de défense correspondent globalement à nos fonctions :

- maintien de la cote nominale en crête : fonction d'évacuation des crues
- contrôle de la filtration dans le remblai : fonction d'auto-filtration du remblai ;
- contrôle de la pression dans le remblai : fonction d'étanchéité du remblai et fonction de drainage du remblai ;
- contrôle de la filtration dans la fondation : fonction d'auto-filtration de la fondation ;
- contrôle de la pression dans la fondation : fonction d'étanchéité de la fondation et fonction de drainage de la fondation ;
- protection du parement amont : fonction de protection ;
- protection de la crête et du parement aval : fonction de résistance à la surverse ;
- protection des appuis et de la plage aval : ces composants ne sont pas étudiés dans l'approche mise en place au Cemagref.

4.2.4 Opérateurs d'agrégation

Les agrégations permettant d'obtenir les performances des fonctions ou les notes affectées au système de défense sont réalisées dans les deux méthodes par des opérateurs arithmétiques : minimum pour la méthode IC et maximum pour la méthode du Cemagref. Les deux organismes utilisent des échelles uniques mais inversées (0 à 100 pour Hydro-Québec et 10 à 0 pour le Cemagref).

Par contre, un certain nombre de différences résident dans les agrégations permettant d'accéder à la performance par rapport aux modes de rupture (Cemagref) et à l'indice de condition (Hydro-Québec). Elles sont principalement dues aux différences d'objectifs des deux méthodes. Elles portent sur (cf. Figure 37) :

- premièrement, les variables de sortie : dans la méthode d'Hydro-Québec, les modes de ruptures ne sont plus différenciés, une agrégation mène à une évaluation globale du barrage. Dans la méthode du Cemagref, l'évaluation de la performance se fait en différenciant les modes de rupture. Une agrégation de ces résultats pour obtenir une évaluation plus globale reste possible par exemple pour un propriétaire possédant plusieurs barrages et souhaitant avoir une évaluation synthétique de son parc pour optimiser ses actions de maintenance ; il sera nécessaire de déterminer les règles d'agrégation des différentes performances ;
- deuxièmement, la combinaison des systèmes de défense ou des fonctions : la méthode mise en place par Hydro-Québec emploie un système de pondération pour évaluer la performance globale du barrage alors que la méthode développée par le Cemagref met en œuvre des équations logiques pour établir la performance par rapport aux modes de rupture ;
- troisièmement, une hypothèse est faite a priori sur le mode de rupture le plus probable en lien avec le type de barrages pour la démarche d'Hydro-Québec. Aucune hypothèse n'est posée pour la méthode du Cemagref ;
- quatrièmement, une évaluation de la conformité aux règles de l'art individualisée par rapport à la notation de la performance de l'ouvrage est proposée dans le cadre de notre travail. Dans la méthode IC, des données de conception et de réalisation sont présentes dans les attributs positifs (coupure positive de la fondation (parafouille, palplanches…) et les attributs négatifs de l'ouvrage (filtres inadéquats ou absentes dans le remblai…). L'introduction d'une note de conformité basée sur l'examen des informations disponibles dans le dossier de l'ouvrage (conception et réalisation) est actuellement à l'étude chez Hydro-Québec.

4.3 Bilan

Nous pouvons conclure que les connaissances et données utilisées et intégrées par les experts de ces deux organismes sont identiques. Les différences proviennent des objectifs différents visés par les deux méthodes et plus marginalement des spécificités des parcs d'ouvrages concernés.

Dans ces deux méthodes, l'évaluation est faite à un moment donné sans aspect prédictif.

4.4 Comparaison des résultats obtenus avec les deux méthodes

Afin d'aller plus loin dans notre comparaison, nous avons fait la notation d'un barrage français selon les deux méthodes, en partant d'un des dossiers élaborés pour la validation interne.

4.4.1 Description du barrage

Le barrage est un petit ouvrage dont la première mise en eau date de 1979. Il est fondé sur des matériaux alluvionnaires. Il est constitué d'un remblai de 8 m de hauteur étanché par un masque amont réalisé par géomembrane confinée. Les fruits amont et aval sont respectivement de 2,5 et 2. Le volume retenu est de 350 000 m^3. Le remblai a été réalisé avec des matériaux plutôt hétérogènes, constitués de limons argileux et de graves argileuses, issus des alluvions et colluvions superficielles du fond de la vallée au droit du site.

L'étanchéité amont du remblai est obtenue par géomembrane bitumineuse, confinée sous une couche de 2 m de graves type tout-venant et rip-rap en enrochements jusqu'à la cote RN. Le talus au-dessus du Rip-Rap est enherbé.

Le dispositif de drainage est constitué :

- d'un drain sous la membrane (matériaux 8-20)
- d'un drain tapis sous l'ensemble du remblai (matériaux 15-25)
- d'une butée de pied drainante (matériaux 20-60).

Il n'y a pas de dispositif de collecte.

La conduite de vidange est de diamètre 1200 mm (en béton armé). Elle a été enrobée dans un massif de béton coffré et de section carrée. Le compactage du remblai a été fait manuellement à proximité du massif de béton. Les planches photos du chantier confirment ces éléments.

La Figure 38 présente une coupe de ce barrage.

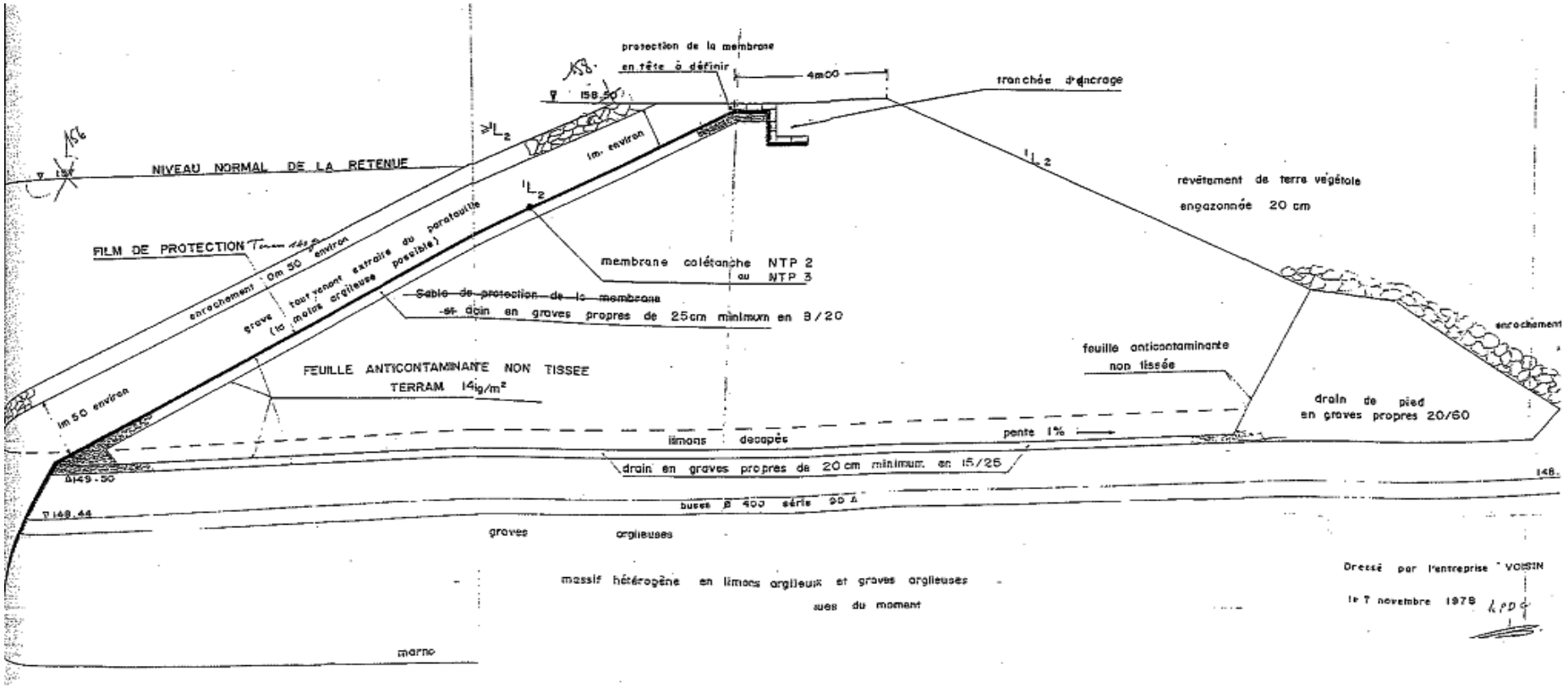


Figure 38 : Coupe du barrage V1-BAR1

4.4.2 Description des désordres

Deux types de désordres ont été relevés lors de l'inspection visuelle réalisée à l'automne 2004 alors que la retenue était vide :

- l'un concerne le Rip-Rap (cf. Figure 39) : « le Rip Rap est formé de petits enrochements, qui se sont déplacés vers le bas par rapport à leur position originelle, sous l'effet du batillage. Cette couche de Rip Rap est maintenant fortement dégradée. Nous remarquons ainsi une marche d'érosion externe dans la zone de marnage (autour de la cote RN). Cette marche est assez importante et atteint quelques décimètres. Dans la zone enherbée au-dessus de la cote RN, nous observons des arbustes et arbres de taille moyenne à grande, et ce quasiment jusqu'à la crête. » ;



Figure 39 : Etat du rip-rap amont

- l'autre concerne le parement aval et le système de drainage (cf. Figure 40, Figure 41, Figure 42) : « le parement aval est mal entretenu et est le siège, sur une grande partie de sa surface, de végétations importantes : herbes hautes, broussailles, arbustes et arbres. Cette végétation empêche une inspection détaillée du parement aval. En pied de parement aval, la butée de pied drainante apparaît à de nombreux endroits (au centre de l'ouvrage et en rive droite) complètement recouverte de terre et/ou de végétation dense, empêchant toute inspection visuelle et obstruant l'exutoire du tapis drainant. Par ailleurs, il semblerait que des matériaux aient été déposés sur certains secteurs de la rive droite. On observe en aval du pied de la butée drainante plusieurs anomalies :

  $\Rightarrow$ une zone humide de plusieurs mètres carrés, placée au centre de l'ouvrage et qui donnerait, d'après les informations recueillies sur place, un écoulement permanent lorsque la retenue est pleine ;

⇒ plusieurs petites dépressions en rive droite, semblant correspondre à des petits fontis. Ces singularités sont saturées en eau. ».



Figure 40 : Présence de zones humides sur le remblai aval



Figure 41 : Présence de zones humides sur le remblai aval



Figure 42 : Présence de végétation sur le remblai aval

Il est considéré que l'ouvrage présente une pathologie d'érosion interne dans le remblai. Cependant, le rapport d'expertise mentionne que « sa conception générale est satisfaisante et l'ouvrage est sain. Toutefois, il est fondamental de remettre à niveau de dispositif de drainage actuellement obstrué par des dépôts de terre. »

4.4.3 Evaluations faites par les deux méthodes

La méthode Hydro-Québec prend en compte les imperfections des informations et notamment les surfaces d'observation masquées : la présence d'une végétation envahissante sur le parement et le pied aval est notée de manière très défavorable (les notes sont autorisés entre 10 et 69) par la méthode Hydro-Québec. La prise en compte de ce type d'imperfections n'apparaissait pas encore dans nos travaux au moment de l'échange avec deux membres d'Hydro-Québec.

En éliminant artificiellement les imperfections des informations dans cette étude de cas et en verrouillant le calcul des autres modes de rupture puisque la méthode Cemagref ne fusionne pas les résultats des différents modes de rupture, les résultats sont comparables : la note d'érosion interne obtenue avec la méthode d'Hydro-Québec est de 75 sur 100 et la note obtenue avec notre méthode est de 3 sur 10. Si l'on se ramène à la même échelle de mesure, nous avons ainsi des scores de 2,5 et 3 sur 10 ce qui est très proche.

La note qui correspond dans notre méthode au qualificatif « passable », traduit bien le fait que la pathologie d'érosion interne est due uniquement à l'obstruction des exutoires de drainage et ne concerne nullement l'ensemble du remblai.

Chapitre 2 – Analyse et prise en compte des imperfections

Dans ce chapitre, nous présentons l'application de l'analyse des imperfections. Nous exposons et commentons ensuite les résultats obtenus lors des séances de notation des indicateurs sous la forme de distributions de possibilité. Ils concernent la représentation des imperfections, leur propagation dans le modèle d'agrégation des indicateurs et enfin l'expression du résultat final. Nous finissons ce chapitre par la présentation d'une étude de sensibilité réalisée sur le modèle d'évaluation de la performance.

1. Analyse des imperfections

1.1 Analyse du système

1.1.1 Définition du système et analyse structurelle

Nous définissons en premier lieu le système sur lequel est réalisée l'analyse. Nous en donnons les limites, qui conduisent ensuite à considérer les milieux extérieurs en interaction. Le système est constitué de deux sous-systèmes :

- d'une part, par le sous-système de mesure (SSM) défini par « ensemble complet d'instruments de mesure et autres équipements assemblés pour exécuter des mesurages spécifiés » (AFNOR, 1994). Le sous-système de mesure comporte des composants particuliers en fonction des indicateurs évalués :

  ⇒ indicateurs d'auscultation : le système de mesure est composé des instruments de mesure tels que piézomètres, capteurs de débit, …

  ⇒ indicateurs de conception ou de réalisation : le système de mesure est constitué par des équipements permettant des essais in situ composé d'un équipement permettant l'essai et de capteurs permettant de recueillir les informations ;

  ⇒ indicateurs visuels : le système de mesure est l'expert qui réalise l'observation visuelle ;

  ⇒ indicateurs calculés : le système de mesure est constitué par les deux systèmes de mesure rattachés aux indicateurs de conception ou de réalisation et indicateurs d'auscultation ;

- d'autre part, par le sous-système de traitement des données de base en données brutes (SST). Il concerne :

  ⇒ les données d'auscultation qui sont traitées pour éliminer les perturbations et se ramener à conditions constantes ;

  ⇒ les indicateurs calculés à l'aide de modèles mécaniques.

1.1.2 Etapes dans le cycle de vie

Le système passe par différentes étapes chronologiques ou positions du cycle de vie. Dans notre démarche, deux positions particulières nous intéressent :

- la phase de conception et de réalisation du SSM ou du SST :

  ⇒ la phase de conception est importante au travers du choix du système de mesure (type d'instruments, type d'essais…), du choix de l'implantation du SSM (position de l'instrument sur le talus aval…), du choix du SST (logiciel)… Elle concerne pour le SSM, les instruments d'auscultation et les essais géotechniques et pour le SST, les logiciels de traitement des données d'auscultation et les logiciels de calcul de modèles mécaniques ;

  ⇒ la phase de réalisation intéresse seulement les instruments d'auscultation au travers de leur installation dans le barrage ou les fondations ;

- la phase d'exploitation concerne deux types de SSM –le système de mesure visuelle et le système de mesure par auscultation – et le SST pour l'analyse des mesures d'auscultation. Deux situations sont prises en compte :

  ⇒ l'exploitation dans les conditions normales ;

  ⇒ l'exploitation en situations dégradées : instrument d'auscultation défaillant, mesures visuelles perturbées par de la végétation…

La phase d'exploitation ne touche que le SSM par mesure visuelle et le SSM par auscultation. En effet, si des essais géotechniques sont réalisés au cours de la vie de l'ouvrage, nous pouvons les analyser selon l'AMDE processus : ces essais ne sont pas perturbés par des phénomènes de vieillissement par exemple (contrairement aux informations qu'ils fournissent). De même, l'étude du SST est menée uniquement au stade de la conception ou réalisation. Le Tableau 27 récapitule les analyses effectuées en fonction de la nature du sous-système. Les indicateurs calculés sont pris en compte par le SST.

Type de sous-système	Phase de conception	Phase de réalisation	Phase d'exploitation
Indicateurs visuels			X
Indicateurs auscultés	X	X	X
Indicateurs de conception ou réalisation	X		
Système de traitement	X		X

Tableau 27 : Analyses menées en fonction des phases du cycle de vie et du sous-système considéré

Le système et ses phases de vie étant définis, ses défaillances vont être à présent analysées alternativement pour la phase de conception et de réalisation puis d'exploitation.

1.2 Analyse des défaillances du système

1.2.1 En phase de conception et de réalisation

L'AMDE processus permet de faire une description des modes de défaillances du composant liés au processus de conception et de réalisation.

1.2.1.1 Cas du système de mesure

Le Tableau 28 présente le résultat de l'AMDE processus pour le SSM. Sont concernés directement les instruments d'auscultation et les essais et indirectement les indicateurs calculés puisque déterminés à partir des mesures d'auscultation et des caractéristiques du barrage. Dans la dernière colonne du Tableau 28 sont définies les caractéristiques de qualité liées aux processus de conception et de réalisation.

Type d'indicateur concerné	Type de système de mesure	Phases du processus	Modes de défaillances	Caractéristiques de qualité
Indicateur d'auscultation	Instruments d'auscultation	Conception	Nombre d'instruments insuffisants	Nombre d'instruments
			Localisation des instruments inadaptée	Localisation des instruments
			Sensibilité[12] des instruments insuffisante	Sensibilité des instruments
		Réalisation	Installation des instruments incorrecte	Installation des instruments
Indicateur de conception et réalisation	Essais	Conception	Nombre d'essais insuffisants	Nombre d'essais
			Localisation et/ou prélèvement des échantillons inadaptés	Localisation et/ou prélèvement des échantillons
			Essais non pertinents (sensibilité)	Sensibilité
			Mise en œuvre des essais incorrecte	Mise en œuvre des essais

Tableau 28 : AMDE processus pour le sous-système de mesure

Comme nous l'avons mis en évidence dans le chapitre précédent, les informations sont analysées de manière spatiale : pour l'évaluation de la piézométrie, l'expert considère à la fois son évolution dans le temps et la position amont-aval des instruments, pour le débit de drainage est tenu compte de l'évolution dans le temps également… Cela corrobore la caractéristique de localisation de l'instrument de la grille d'évaluation des indicateurs : il faut instrumenter plus particulièrement les zones de forts déplacements, les zones de rupture possibles… Par exemple, les localisations pertinentes du suivi des pressions interstitielles sont dans le noyau à différentes hauteurs, dans la fondation, sous le noyau et à son aval, à l'amont et à l'aval d'un parafouille (Brenner et al., 1994).

1.2.1.2 Cas du système de traitement

Le Tableau 29 fournit les résultats de l'AMDE processus pour le SST (traitement des données d'auscultation et l'utilisation des modèles mécaniques pour établir les indicateurs calculés).

[12] La sensibilité est définie par « le quotient de l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée » (AFNOR, 1994).

Type de systèmes de traitement des données	Type d'indicateur concerné	Phases du processus	Modes de défaillance	Caractéristiques de qualité
Traitement des données d'auscultation	Indicateur d'auscultation	Conception	Type de logiciel inadapté	Type de logiciel
		Réalisation	Nombre de données insuffisant	Nombre de données
Calcul des indicateurs à partir de modèles mécaniques	Indicateur calculé	Conception	Type de modèle inadapté	Type de modèle

Tableau 29 : AMDE processus pour le sous-système de traitement

1.2.2 En phase d'exploitation

Afin de déterminer les défaillances en phase d'exploitation, nous identifions dans un premier temps les milieux extérieurs en interaction avec les sous-systèmes. Nous définissons ensuite les fonctions avant de mettre en évidence les dysfonctionnements potentiels de ces différentes fonctions.

1.2.2.1 Détermination des milieux extérieurs en interaction avec le système

Les milieux extérieurs sont constitués des éléments matériels et naturels qui sont susceptibles d'agir sur le système ou subir ses actions. Le Tableau 30 donne une liste des milieux extérieurs au SSM. En fonction du type de SSM considéré, des composants différents du barrage sont impliqués : par exemple, un piézomètre va être concerné par le remblai aval, une mesure de débit par le système de drainage, la mesure de la hauteur d'eau par la retenue…

Types	Milieux extérieurs au système de mesure
Ouvrage	Barrage (crête, talus amont, talus aval, système de drainage, système d'étanchéité, système de protection de l'étanchéité, galerie, conduite) Fondation (fondation amont, fondation aval, système d'étanchéité, système de drainage, galerie) Retenue
Environnement	Précipitations (pluie, neige), soleil, gel Temps
Activités de l'Homme	Expertise, contrôle, essais (experts, services de contrôle, exploitants et bureaux d'études)

Tableau 30 : Milieux extérieurs au sous-système de mesure

1.2.2.2 Fonctions de conception

Nous réalisons une analyse fonctionnelle interne c'est-à-dire directement au niveau des composants. Les interactions entre les sous-systèmes et leur environnement sont décrites à l'aide de deux types de relations (cf. Figure 43) :

- des relations de contact entre le SSM et les milieux extérieurs (représentées par des traits continus) ;
- des relations de flux entre le SSM ou le SST et les milieux extérieurs (représentées par des traits pointillés).

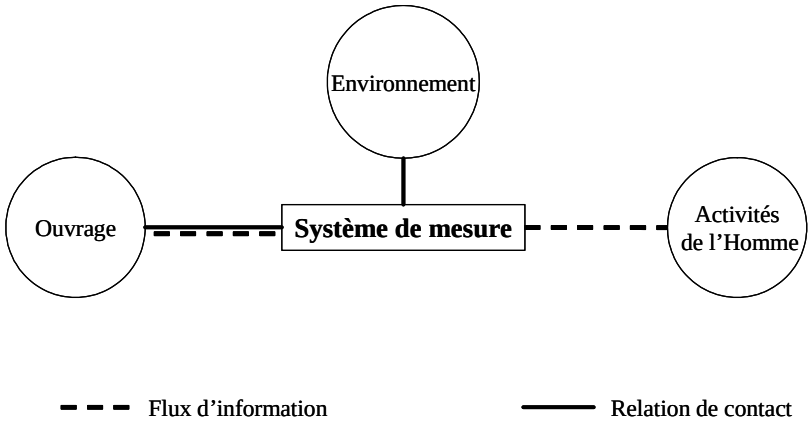


Figure 43 : Relations de flux et de contact pour le sous-système de mesure

Les relations entre le barrage et le système de mesure sont différentes en fonction du type de SSM (cf. Figure 44) : pour les mesures d'auscultation et les essais, ce sont des relations de contact (le capteur ou l'équipement est placé dans ou sur l'un des composants de l'ouvrage) et des relations de flux d'informations (le capteur mesure des caractéristiques) ; pour les observations visuelles, ce sont des flux d'informations qui se produisent de l'ouvrage vers le SSM c'est-à-dire l'ingénieur chargé de l'analyse du barrage.

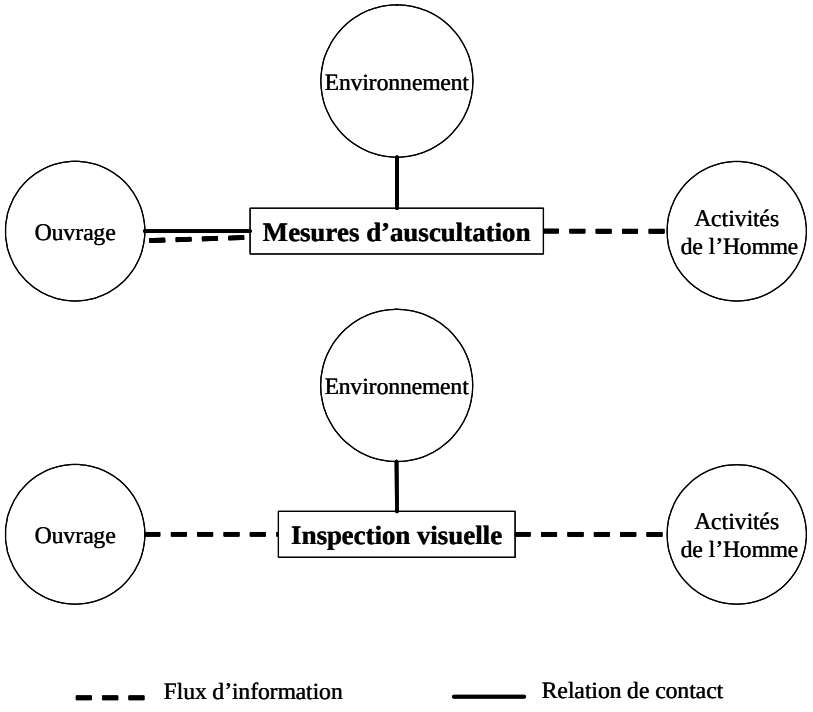


Figure 44 : Relations de flux et de contact en fonction du type de sous-système de mesure

Ces diagrammes permettent de définir les fonctions principales et les fonctions de contrainte du SSM. Nous les exprimons sous la forme de fonctions de contact et fonctions de flux. Le Tableau 31 est dédié aux indicateurs d'auscultation.

Milieux extérieurs	Fonctions de contact	Fonctions de flux
Ouvrage (Barrage - Fondation – Retenue)	Etre en contact avec le composant à caractériser	
		Etre sensible à certaines propriétés de l'ouvrage
Environnement	Résister aux perturbations de l'environnement	
Activités de l'Homme		Fournir des données de base pertinentes

Tableau 31 : Tableau d'analyse fonctionnelle pour le sous-système de mesure - cas du sous-système de mesure par auscultation

Illustrons le Tableau 31 par le cas d'une mesure de piézométrie. Le piézomètre doit :

- être en contact avec le composant à caractériser par exemple le remblai aval ;
- être sensible à la hauteur d'eau dans ce même composant ;
- résister aux perturbations de l'environnement c'est-à-dire ne pas être dégradé par ces perturbations, par exemple les cycles gel-dégel ;
- fournir des données de base pertinente c'est-à-dire des données justes.

Le Tableau 32 présente les fonctions de contact et de flux dans le cas du système de mesure visuelle. Par rapport aux mesures d'auscultation, nous avons supprimé la fonction de flux « être sensible à certaines propriétés de l'ouvrage » et « fournir des données de base pertinentes » car nous avons pris comme hypothèse que l'expert possédait une masse de qualité maximale dans ses évaluations. Pour aborder ces questions, nous devrions faire appel aux méthodes d'évaluation de la fiabilité humaine. Ceci n'entre pas dans le propos de notre travail. De la même manière, nous retirons la fonction de contact « Résister aux perturbations de l'environnement » qui ne concerne pas a priori les experts !

Milieux extérieurs	Fonctions de contact	Fonctions de flux
Ouvrage (Barrage - Fondation – Retenue)	Etre en contact avec le composant à caractériser	

Tableau 32 : Tableau d'analyse fonctionnelle pour le sous-système de mesure – cas du sous-système de mesure visuelle

1.2.2.3 AMDE

Le fonctionnement des deux sous-systèmes a été défini. Il faut maintenant déterminer comment ces sous-systèmes peuvent dysfonctionner, en phase d'exploitation. Afin de répondre à cette question, nous mettons en œuvre une AMDE produit. Elle permet d'identifier les différents modes de défaillance du système en service, en fonction du vieillissement et des phénomènes pouvant se produire lors de son exploitation. Comme nous l'avons précisé plus haut, cette phase ne touche que le SSM par mesure visuelle et le SSM par auscultation.

Le Tableau 33 montre la trame proposée pour l'AMDE produit pour le système de mesure. Dans ce tableau n'apparaissent pas les causes des défaillances ni les moyens de détection afin de rester à un niveau d'abstraction adéquat pour identifier des caractéristiques génériques pour chacun des types d'indicateurs. En effet, les causes de défaillance sont très différentes entre deux indicateurs différents, même s'ils appartiennent à la même catégorie des indicateurs visuels par exemple. Ainsi, les modes de défaillance d'un piézomètre et d'une échelle de cotation de la hauteur de la retenue ne sont pas les mêmes. Les fonctions proviennent de l'analyse fonctionnelle synthétisée dans le Tableau 31 et le Tableau 32. La caractéristique « Prise d'information » dépend principalement de la phase de réalisation (pose) des instruments (caractéristique « Installation des instruments »). Nous regrouperons ces deux caractéristiques dans le Tableau final.

Fonction	Mode de défaillance	Caractéristique de qualité associée	Types d'indicateur ou de système de traitement concernés
Etre en contact avec le composant à caractériser	Le contact avec le composant à caractériser est insuffisant	Prise d'informations	Visuels Auscultation
Etre sensible à certaines propriétés de l'ouvrage	Le SSM n'est plus assez sensible	Sensibilité	Auscultation
Résister aux perturbations de l'environnement	Le SSM n'a pas résisté aux perturbations de l'environnement	Fonctionnement de l'instrument Fidélité[13]	Auscultation
Fournir des données de base pertinentes	Le SSM ne fournit pas des données de base pertinentes	Justesse[14] de l'instrument	Auscultation
		Difficulté à réaliser la mesure (accessibilité, conditions de mise en œuvre)	Auscultation

Tableau 33 : Trame du tableau résultant de l'AMDE produit

La prise d'information indique qu'un contact doit être suffisant entre l'instrument et le composant à caractériser. Ainsi, des mouvements au sein du barrage peuvent avoir dégrader ce contact.

Comme dans le cas de l'AMDE processus, nous identifions une caractéristique de qualité « sensibilité » pour les indicateurs d'auscultation. Dans le cas de l'AMDE processus, cette caractéristique du SSM renseigne sur sa sensibilité lors du choix de l'instrument. Dans le cas de l'AMDE produit, elle indique la sensibilité en cours d'exploitation, c'est-à-dire au moment de la notation. C'est ce dernier type de sensibilité qui est pertinent dans notre démarche.

La caractéristique fonctionnement de l'instrument indique que des pannes sont possibles. Ainsi, un piézomètre obstrué par des dépôts n'aura plus un fonctionnement correct.

[13] La fidélité est définie par « l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure » (AFNOR, 1994).

[14] La justesse est définie par « l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique » (AFNOR, 1994).

La difficulté à réaliser la mesure correspond à la plus ou moins grande accessibilité à l'information ou au respect des conditions optimales de cette prise d'information. Donnons quelques exemples en fonction des types d'indicateurs :

- pour un indicateur visuel : par exemple, un parement recouvert de végétation ne pourra pas être facilement inspecté, la détection de fuite sur le parement sera rendue difficile en cas de pluie… ;
- pour un indicateur ausculté : par exemple, des bornes et piliers topographiques déchaussés ne seront plus en contact correct avec l'ouvrage ce qui entraîne une prise d'information dégradée.

1.3 Notation des caractéristiques de qualité

A l'issue de l'analyse des défaillances, nous disposons :

- pour le système de mesure :
  - ⇒ des caractéristiques de qualité liées à la conception et à la réalisation (cf. Tableau 28) ;
  - ⇒ des caractéristiques de qualité liées à l'exploitation (cf. Tableau 33) ;
- pour le système de traitement des données :
  - ⇒ des caractéristiques de qualité liées à la conception et à la réalisation (cf. Tableau 29) ;
  - ⇒ des caractéristiques de qualité liées à l'exploitation (cf. Tableau 33).

Ces caractéristiques de qualité sont regroupées, par type d'indicateur, dans un tableau (cf. Tableau 34 et Tableau 35). Pour un même type d'indicateur sont considérées à la fois des caractéristiques de qualité issues de l'AMDE produit et celle issues de l'AMDE processus. Nous constatons que les indicateurs d'auscultation sont le type d'indicateur qui présente le plus de caractéristiques de qualité et les indicateurs visuels le moins. Ceci est logique compte tenu des hypothèses qui sont faites sur la « qualité » des experts.

Il est ensuite nécessaire de définir une échelle de notation des différentes caractéristiques. Pour cela, nous nous inspirons des échelles définies par (Lair, 2000) et par (Talon, 2006). L'échelle définie par (Lair, 2000) comporte cinq niveaux et celle définie par (Talon, 2006), quatre niveaux. Nous choisissons de considérer une échelle à quatre niveaux. Il faut que le nombre de jalons soit suffisant pour pouvoir discriminer les différentes situations mais il est inutile de les multiplier si cela ne se justifie pas en terme de sensibilité de la mesure. Nous avons conservé une échelle inversée afin d'être en cohérence avec le système de notation des indicateurs (0 exprime une conformité et 3 un non-conformité).

Tous les niveaux ne sont pas pertinents pour toutes les caractéristiques. Chaque niveau pertinent est défini par une expression linguistique.

	Indicateurs auscultés											
	C2k1	C2k2	C2k3	C2k4	C2k5	C2k6	C2k7	C2k8	C2k9	C2k10	C2k11	C2k12
Echelle	Nombre d'instruments sur le barrage (instruments nécessaires)	Localisation des instruments sur le barrage	Installation des instruments (pose des instruments dans le barrage)	Prise d'information	Sensibilité des instruments	Fidélité des instruments	Justesse des instruments	Difficulté à réaliser la mesure	Fonctionnement	Type de logiciel de traitement des données	Nombre de données traitées	Périodicité des mesures
0	Nombre d'instruments supérieur ou égal au nombre minimal requis	Emplacement optimal	Installation conforme	Prise d'information conforme	Instrument très sensible	Fidélité correcte	Instrument juste	Mesure facilement réalisable	Instrument en état de fonctionnement		Nombre de données correct	Périodicité correcte (règles définies en fonction de l'instrument considéré)
1	Nombre d'instruments légèrement inférieur au nombre minimal	Légère déviation par rapport à un emplacement optimal	Légère déviation par rapport à une l'installation conforme	Prise d'information légèrement dégradée	Instrument sensible	Fidélité légèrement dégradée					Légère déviation par rapport à un nombre de données correct	Légère déviation par rapport à une périodicité correcte
2	Nombre d'instruments fortement inférieur au nombre minimal	Forte déviation par rapport à un emplacement optimal (mesure inexploitable)	Forte déviation par rapport à une installation conforme		Instrument peu sensible	Fidélité fortement dégradée					Forte déviation par rapport à un nombre de données correct	Forte déviation par rapport à une périodicité correcte
3	Absence d'instruments		Installation incorrecte	Prise d'information non conforme		Instrument non fidèle	Instrument non juste	Mesure difficilement réalisable	Instrument en panne		Aucune donnée	Aucune donnée

Tableau 34 : Grille d'évaluation des caractéristiques de qualité pour les indicateurs d'auscultation

	Indicateurs visuels	**Indicateurs calculés**	**Indicateurs de conception ou réalisation**			
	C1k1	C3k1	C4k1	C4k2	C4k3	C4k4
Echelle	Prise d'information	Type de modèle utilisé	Nombre d'essais	Localisation	Sensibilité de l'instrument	Mise en œuvre de l'essai
0	Information totalement accessible		Nombre d'essais corrects	Localisation correcte	Instrument très sensible	Mise en œuvre correcte
1			Légère déviation par rapport à un nombre d'essais correct	Légère déviation par rapport à une localisation correcte	Instrument sensible	Légère déviation par rapport à une mise en œuvre correcte
2	Information partiellement accessible (végétation, pluie…)		Forte déviation par rapport à un nombre d'essais correct	Forte déviation par rapport à une localisation correcte	Instrument peu sensible	Forte déviation par rapport à une mise en œuvre correcte
3	Information totalement inaccessible (végétation, pluie…)		Aucune donnée	Localisation incorrecte		Mise en œuvre incorrecte

Tableau 35 : Grille d'évaluation des caractéristiques de qualité pour les indicateurs visuels, les indicateurs calculés et les indicateurs de conception et de réalisation

Nous avons comparé les caractéristiques listées dans le Tableau 34 à des caractéristiques définies comme importantes pour les dispositifs d'auscultation dans le document « La surveillance des barrages » de (Poupard et Royet, 2001). Nos résultats rejoignent les informations fournies dans ce document. En effet, sont définies comme caractéristiques importantes :

- pour l'inspection visuelle :
  - ⇒ l'entretien strict de la végétation sur les talus des remblais et aux abords des ouvrages ;
  - ⇒ l'enlèvement de la calcite, gênant l'observation des parements en maçonnerie ;
  - ⇒ le dégagement des exutoires de drainage et surveillance des dépôts de matériaux ;

  Ces différentes caractéristiques sont des exemples de la caractéristique « Prise d'information » du Tableau 35.

- pour les instruments d'auscultation :
  - ⇒ la localisation des instruments ;
  - ⇒ le soin à apporter à la pose (cas des cellules de mesure de la pression interstitielle) qui correspond à la caractéristique « installation des instruments) ;
  - ⇒ la précision que nous appelons « sensibilité » ;
  - ⇒ la fidélité ;
  - ⇒ la facilité de réalisation de la mesure ;
  - ⇒ la robustesse et la longévité que nous pouvons relier à la caractéristique « Fonctionnement ».

1.4 Agrégation des caractéristiques de qualité

Les grilles d'évaluation définies dans le Tableau 34 et le Tableau 35 fournissent un ensemble de caractéristiques C :

- une caractéristique pour les indicateurs visuels ;
- dix caractéristiques pour les indicateurs auscultés ;
- une caractéristique pour les indicateurs calculés ;
- quatre caractéristiques pour les indicateurs de conception ou réalisation.

Une masse globale de qualité (m) peut être affectée à chacun de ces types d'indicateurs. Cette masse est établie de la manière suivante :

$$m_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_{jki}}{n} \qquad \text{(Equation 21)}$$

où :

- C_{jki} est une caractéristique de qualité ;

- j désigne le type d'indicateur (visuel, ausculté, calculé, conception ou réalisation). Nous affecterons l'indice 1 pour les indicateurs visuels, l'indice 2 pour les indicateurs auscultés, l'indice 3 pour les indicateurs calculés et l'indice 4 pour les indicateurs de conception ou réalisation ;
- k est le nombre d'indicateurs d'un type donné utilisé dans l'étude. Par exemple, si le barrage est équipé de capteurs piézométriques et de capteurs de débit, l'indice k = 1 désignera les piézomètres et l'indice k = 2, les débits ;
- n est le nombre de caractéristiques de qualité utilisées pour définir un indicateur donné.

Cette moyenne permet de pouvoir comparer différents types d'indicateurs vis-à-vis de leur masse de qualité : en effet, pour les indicateurs visuels, une seule caractéristique de qualité a été identifiée tandis que onze caractéristiques ont été identifiées pour les indicateurs d'auscultation.

Une masse de qualité de 4 représente une faible fiabilité de l'information tandis qu'une masse de 0 indique une très grande fiabilité.

A titre d'illustration nous pouvons traiter un exemple théorique. Supposons que les caractéristiques de qualité du dispositif de piézométrie présenté dans le Tableau 34 aient été évaluées de la manière suivante :

- $C_{212} = 1$ (légère déviation par rapport à un emplacement optimal) ;
- $C_{216} = 3$ (instrument non fidèle) ;
- les dix autres caractéristiques sont notées à 0.

La masse de qualité résultante pour ce piézomètre est évaluée par : $m_{21} = \frac{4}{10}$.

La masse de qualité des indicateurs calculés s'obtient en sommant la masse de qualité spécifique aux indicateurs calculés (provenant d'une seule caractéristique, le type de modèle utilisé), la masse de qualité des indicateurs auscultés concernés et la masse de qualité des indicateurs de conception et réalisation concernés.

1.5 Bilan

Une table listant les caractéristiques de qualité des différentes origines des imperfections a été obtenue par la mise en œuvre d'une analyse fonctionnelle et d'une AMDE. Les résultats concernant les dispositifs d'auscultation et de l'inspection visuelle ont été confrontés aux informations issues de (Poupard et Royet, 2001) : cette analyse a montré une correspondance entre les caractéristiques issues de ces deux travaux.

Nous souhaitons souligner que le Tableau 34 et le Tableau 35 constituent une première approche qui se situe à un niveau assez global puisque devant répondre notamment à l'ensemble des dispositifs d'auscultation. Or ceux-ci présentent des caractéristiques très différentes (mesure locale ou globale, fréquence de la mesure…). Cette approche de quantification des origines des imperfections sera d'autant plus pertinente qu'elle sera menée à un niveau inférieur c'est-à-dire par type de dispositifs d'auscultation : pendules, mesures topographiques, cellules de mesure de pressions interstitielles, piézomètres, mesures de débit… Menée à ce niveau, l'analyse permettra :

- de supprimer des caractéristiques non adaptées pour le dispositif considéré ;
- d'adapter l'échelle de notation : par exemple, concernant la périodicité des mesures, des règles doivent être indiquées en fonction de l'instrument considéré. Une liste des pas de temps recommandés figure dans le paragraphe 2.2.2.4 du Chapitre 1 de la Partie 2.

2. Prise en compte des imperfections

2.1 Données recueillies

Les séances ont été conduites auprès de trois experts qui ont participé à la construction du modèle d'évaluation de la performance.

Onze fiches descriptives d'indicateurs leur ont été distribuées. Elles ont été extraites des dossiers qui avaient été utilisés pour la validation du modèle de l'érosion interne (voir dans la même Partie, le Chapitre 1 et l'Annexe 3. La Figure 19 fournit un exemple de fiches décrivant un indicateur.

Ces fiches ont mené à la notation de quinze indicateurs ; en effet, certaines fiches décrivent plusieurs indicateurs qu'il est difficile de dissocier. Treize d'entre eux sont des indicateurs visuels et les deux autres, des indicateurs d'auscultation.

Le notateur a à sa disposition l'interface développée pour l'évaluation de la performance : il a ainsi accès au descriptif des indicateurs (notamment échelle de notation avec références).

Pour chaque indicateur, nous recueillons la distribution de possibilité ainsi que les origines des imperfections comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent. La Figure 45 donne un exemple de distribution de possibilité déclarée par l'expert E2 pour l'indicateur « Etat des enrochements ». En Annexe 6 est figuré l'ensemble des distributions de possibilité formalisées lors des séances.

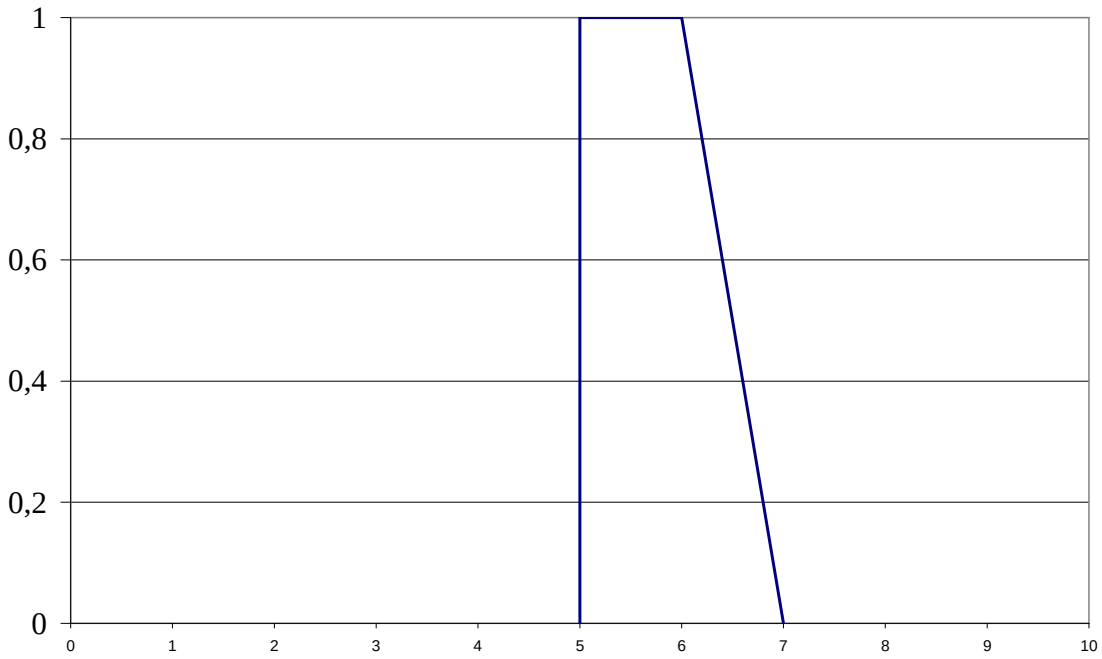


Figure 45 : Distribution de possibilité déclarée par l'expert E2 pour l'indicateur « Etat des enrochements »

2.2 Traitement des données

2.2.1 Bilan factuel

2.2.1.1 Durée des séances

La durée des séances est de l'ordre de deux heures dont environ quinze minutes consacrées à la présentation des objectifs. Ce temps est constant pour les trois experts.

2.2.1.2 Analyse des distributions de possibilité

Nous faisons une première analyse des distributions en comptabilisant les différents types de distribution utilisés par les experts (cf. Tableau 36).

Experts	**Note précise**	**Intervalle précis**	**Distribution trapézoïdale**	**Distribution triangulaire**	**Total**
E1	3	5	2	5	15
E2	1	1	12	1	15
E3	4	4	5	2	15
Total	8	10	19	8	45

Tableau 36 : Types de distribution utilisés par les experts

E2 a préférentiellement utilisé le format trapézoïdal pour représenter les imperfections associées aux indicateurs étudiés. E3 a, quant à lui, mis en œuvre de manière équivalente les notes précises, les intervalles précis et les distributions trapézoïdales. Par contre, pour ces deux experts, le format triangulaire est le moins employé des quatre formats : il correspond à l'attribution d'une valeur nominale associée à une marge d'incertitude. Il a été par contre préférentiellement utilisé par E1, à égalité avec les intervalles précis.

Le Tableau 37 présente les intervalles maximum et minimum couverts par le noyau et le support des distributions de possibilité. Les cellules sont fusionnées lorsque l'expert n'a donné qu'une seule distribution du type concerné ou si toutes les distributions d'un même type ont les mêmes caractéristiques (même largeur de noyau et/ou de support) : par exemple, sur les quinze indicateurs évalués, E2 a représenté seulement un indicateur sous la forme d'un intervalle précis de support 2.

	Trapèze				**Triangle**		**Intervalle précis**	
	Noyau		Support		Support		Support	
	Valeur Minimum	Valeur Maximum	Valeur Minimum	Valeur Maximum	Valeur Minimum	Valeur Maximum	Valeur Minimum	Valeur Maximum
E1	1		2		1	5	1	2
E2	1	2	2	5	2		2	
E3	1	2	3	5	2	3	1	3

Tableau 37 : Largeur minimum et maximum relevées pour le noyau et le support de l'ensemble des distributions de possibilité

Les trois experts ne donnent pas exactement les notes avec les mêmes marges d'incertitude. E1 a tendance à donner les marges les plus petites et E2 les marges les plus élevées : le Tableau 38 présente les surfaces des sous-ensembles flous donnés pour chacun des indicateurs Ii. La moyenne a été calculée sur les quinze surfaces (une note précise a une surface égale à zéro). En outre, E1 et E3 affectent plus fréquemment des notes précises (cf. Tableau 36 et Tableau 38). Ces résultats sont probablement très liés au fait que E1 et E3 sont les auteurs de la majorité des dossiers d'expertise dont sont issus les cas tests.

Nous avons relevé les écarts moyens par indicateur supérieur à 1,5. Cinq indicateurs sur quinze répondent à ce critère.

	$S_{\tilde{A}1}$	$S_{\tilde{A}2}$	$S_{\tilde{A}3}$	**Moyenne**
I1	1,5	1,5	1	1,3
I2	NP	1	2	1
I3	NP	2,5	3	1,8
I4	1	1,5	NP	0,8
I5	2,5	2	NP	1,5
I6	NP	2	NP	0,7
I7	1	2,5	2	1,8
I8	1,5	3,5	3,5	2,8
I9	1	NP	2	1
I10	2	2	2,5	2,2
I11	1	2	NP	1
I12	0,5	2	2	1,5
I13	0,5	2,5	2,5	1,8
I14	1	2	1,5	1,5
I15	1	2	1	1,3
Moyenne	0,97	1,93	1,53	1,5

Tableau 38 : Surfaces des sous-ensembles flous donnés par les experts (NP : note précise – en grisé, surface maximale entre les 3 experts pour un indicateur donné)

2.2.2 Comparaison des distributions de possibilité avec les notes précises

Comme les fiches descriptives sont extraites des dossiers qui avaient été utilisés pendant la validation de la phase de formalisation des connaissances, nous avons accès aux notes précises qui avaient alors été affectées par les experts aux indicateurs. Nous sommes donc en mesure de réaliser une comparaison de ces deux jeux de données.

Pour ce faire, nous positionnons la note précise par rapport au support et au noyau de la distribution de possibilité correspondante. Trois cas peuvent être rencontrés :

- « la note précise appartient au noyau » ;
- « la note précise appartient au support mais pas au noyau ». Une précision est apportée sous la forme d'un L ou d'un R d'après la description L-R du sous-ensemble flou ;
- « la note précise n'appartient pas au support ».

Les résultats sont présentés dans le Tableau 39.

	Nombre de notes précises appartenant au noyau de la distribution de possibilité	**Nombre de notes précises appartenant au support mais pas au noyau**	**Nombre de notes précises n'appartenant pas au support**
Expert 1	10	1 (L)	4
Expert 2	7	5 (5 fois L)	3
Expert 3	14	0	1
Total	31	6	8

Tableau 39 : Position des notes précises sur la distribution de possibilité

Pour les trois experts :

- la majorité des notes précises se situent dans le support : 11 cas sur 15 pour E1, 12 cas sur 15 pour E2 et 14 cas sur 15 pour E3. Pour ce dernier expert, le score de notes appartenant au noyau est très élevé puisqu'il atteint 14 notes sur 15. Ceci montre une très bonne cohérence dans le temps (rappelons que l'amplitude maximale du noyau des notes fournies par cet expert est de 2) ;
- les notes de E1 ou E2 appartenant au support mais pas au noyau sont toujours situées sur la partie L (gauche) du sous-ensemble flou : ceci traduit, contrairement à ce que l'on aurait pu supposer, une notation plus pessimiste que lors de la notation précise ;
- pour les notes situées en dehors de la distribution, nous distinguons :

  ⇒ les cas où il y a un écart non expliqué entre les deux notations. Les experts seront interrogés à ce propos. Ils correspondent à trois cas sur quatre pour E1, deux cas sur trois pour E2 et un cas pour E3. Pour l'un de ces indicateurs (I10), on peut avancer l'hypothèse d'une définition incomplète de l'échelle de notation de l'indicateur considéré (« Qualité du béton ») ;

  ⇒ les cas où cet écart n'est pas significatif : en effet, les experts font souvent peu de différence entre les notes 0, 1 et 2. Nous considérerons donc qu'un écart dans cette gamme n'est pas significatif. Il s'agit d'un cas sur quatre pour E1 et d'un cas sur trois pour E2.

2.2.3 Comparaison des distributions fournies par les différents experts

Le degré de compatibilité permet de comparer les distributions fournies par deux experts. Le Tableau 40 donne les résultats des comparaisons faites (E1, E2), (E1, E3), (E2, E3) et (E1, E2, E3). Dans le cas où la note précise donnée par un expert est dans le support de la distribution donnée par l'autre expert, le résultat de la comparaison est le degré d'appartenance de la note précise au sous-ensemble flou. De même, si l'intersection des deux distributions n'est constituée que d'une note (cf. Figure 25Figure 25 : Cas de deux distributions de possibilité dont l'intersection est un singleton), la lettre S apparaît pour la comparaison correspondante.

Les résultats sont très variables d'un indicateur à l'autre :

- il y a incompatibilité pour les indicateurs I3 et I4 entre E1 et E2 et pour les indicateurs I3 et I5 entre E1 et E3. L'écart entre les notes va de 2 à 8. Cet écart devra être comparé à la sensibilité de notation des experts. Aucune incompatibilité n'a été relevée entre les notes de E2 et de E3. Ces cas devront être discutés lors de la séance de confrontation des résultats. Ces incompatibilités restent donc à un nombre très bas (4 cas sur 45 comparaisons) ;
- pour les autres indicateurs, il y a compatibilité partielle :

  ⇒ entre E1 et E2, pour dix indicateurs, il y a une compatibilité partielle allant de 9,1 à 100 % et pour trois autres indicateurs, une compatibilité de 100 % (NP/NF) dans la mesure où l'un des experts a donné une note précise qui est incluse dans le noyau de la distribution de possibilité donnée par le second expert ;

  ⇒ entre E1 et E3, pour dix indicateurs, il y a une compatibilité partielle allant de 3,8 à 100 % et pour les cinq autres indicateurs, une compatibilité partielle liée à la comparaison entre une note floue et une note précise (20 à 100 % NP/NF) ;

⇒ entre E2 et E3, pour neuf indicateurs, il y a une compatibilité partielle allant de 14,3 % à 70 % et quatre indicateurs pour lesquels la note précise d'un expert appartient à la distribution de possibilité fournie par le deuxième expert (100 % NP/NF).

Lorsqu'on s'intéresse à la comparaison des notes au sein du groupe constitué par les trois experts, on peut noter :

- une incompatibilité entre les trois notes pour les indicateurs I3, I4 et I5, ce qui est logique puisque nous avions déjà relevé une incompatibilité entre les notes données par deux experts ;
- une compatibilité partielle allant de 3,3 à 66,7 % pour huit indicateurs et une compatibilité partielle entre notes floues et notes précises dans quatre cas.

2.2.4 Bilan

A ce stade de la recherche, nous considérons ces résultats comme encourageants. En effet :

- les experts qui ont participé à l'exercice ont bien accepté la démarche et l'ont trouvé pertinente pour une application concrète future dans des diagnostics et des expertises d'ouvrages ;
- pour la majorité des indicateurs, il existe une réelle compatibilité entre les notes données par les différents experts. Toutefois, pour certains indicateurs, la compatibilité est faible voire nulle lorsqu'on considère les notes de deux experts (et a fortiori, les notes des trois experts) : une discussion doit être engagée de manière collective afin de trouver les origines de ces écarts. Nous pouvons dès à présent évoquer une difficulté de notation à partir de seuls dossiers très simplifiés (un dossier est composé de quelques paragraphes et le cas échéant, de quelques photos). **Des exercices de notation directement sur site avec une lecture préalable du dossier du barrage devront être conduits afin d'améliorer cette situation** ;
- cette analyse de compatibilité devra être examinée dans le cadre d'une étude de sensibilité du modèle aux variations des indicateurs. En effet, une incompatibilité faible pour un indicateur donné aura d'autant moins d'importance sur le résultat final que le modèle est peu sensible aux variations de cet indicateur. Nous effectuerons une étude de sensibilité dans le paragraphe 3 de ce même chapitre.

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15
E1-E2	100	100 (NP/NF)	0 (NP/NF) Ecart=8	0 Ecart=2	48,8	100 (NP/NF)	40	42,9	100 (NP/NF)	14,3	50	11,1	9,1	28,8	9,1
E1-E3	66,7	100 (NP/NF)	0 (NP/NF) Ecart=7	100 (NP/NF)	20 (NP/NF)	100	28,8	15,5	50	3,8	100 (NP/NF)	25	20	66,7	60
E2-E3	66,7	S	70	0 (NP/NF) Ecart=2	0 (NP/NF) Ecart=2	100 (NP/NF)	33,4	27,3	100 (NP/NF)	33,4	100 (NP/NF)	14,3	42,9	47,4	20
E1-E2-E3	66,7	S	0	0	0	100 (NP/NF)	15,4	12,2	50	3,3	50	7,1	5,3	28,2	11,1

Tableau 40 : Degré de compatibilité entre les notes données par deux experts

I1 : Etat des enrochements
I2 : Etat visuel exutoire drain
I3 : Fuite d'eau Remblai aval
I4 : Présence de végétation sur le pied aval
I5 : Végétation sur le remblai aval
I6 : Végétation sur le remblai aval
I7 : Qualité du béton
I8 : Fente due au fluage
I9 : Evolution du débit
I10 : Qualité du béton
I11 : Evolution du débit
I12 : Mouvement des dalles de protection
I13 : Poinçonnements
I14 : Etat des pavés
I15 : Poinçonnements

NP/NF : comparaison Note Précise et Note Floue
S : intersection des deux notes floues est un singleton

2.3 Propagation des imperfections et obtention du résultat

2.3.1 Propagation des imperfections dans le modèle d'évaluation de la performance

La méthodologie de propagation des résultats que nous avons présentée dans la Partie 2 est ici appliquée avec les opérateurs concernés par notre application.

Pour le calcul de la performance des fonctions, l'opérateur d'agrégation est le maximum. L'Equation 17 devient :

$$\mu_{\tilde{max}(A,B)}(z) = \sup_{x,y:z=max(x,y)} \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \qquad \text{(Equation 22)}$$

La base de règles qui permet de combiner deux fonctions ou un phénomène et une fonction comporte un nombre très restreint de règles, trois en l'occurrence pour chacune des combinaisons. Par exemple, pour la combinaison entre la Fonction de Drainage et la Fonction d'Etanchéité pour obtenir le Phénomène Infiltration d'eau dans le remblai, les règles sont :

- **SI** Fuite > 2 **OU** si Piézométrie > 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = MAX (Fuite, Piézométrie) ;
- **SI** Fuite ≤ 2 **ET SI** Piézométrie ≤ 2 **ET SI** Fonction Etanchéité ≤ 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = Performance Fonction Etanchéité ;
- **SI** Fuite ≤ 2 **ET SI** Piézométrie ≤ 2 **ET SI** Fonction Etanchéité > 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = Performance Fonction Drainage.

2.3.2 Obtention du résultat : processus de défuzzification

Lorsque les distributions de possibilité ont été propagées dans le système, est obtenue au final une distribution de possibilité représentant la performance du barrage vis-à-vis de l'érosion interne. Il est possible de présenter une note précise à l'utilisateur en effectuant une défuzzification. Nous employons la méthode du maximum qui correspond à l'abscisse du maximum de la distribution finale. Si celle-ci comporte plusieurs maximums, le maximum de ces maximums est déterminé.

Nous choisissons ce mode de défuzzification afin que la note précise appartienne au noyau de la distribution c'est-à-dire à l'une des notes les plus vraisemblables (cf. Figure 20).

2.3.3 Résultats obtenus

Les données issues de la séance de notation sous la forme de distribution de possibilité des indicateurs d'un dossier simplifié de barrage sont agrégées selon la méthode présentée ci-dessus. Le barrage étudié a été présenté dans le paragraphe 4 du Chapitre1 de la Partie 3.

La Figure 46 donne l'exemple de traitement des résultats pour l'expert E3. Les résultats pour les deux autres experts sont présentés en Annexe 7.

Le Tableau 41 présente les comparaisons effectuées entre les notations déterministes et les notations sous la forme floue.

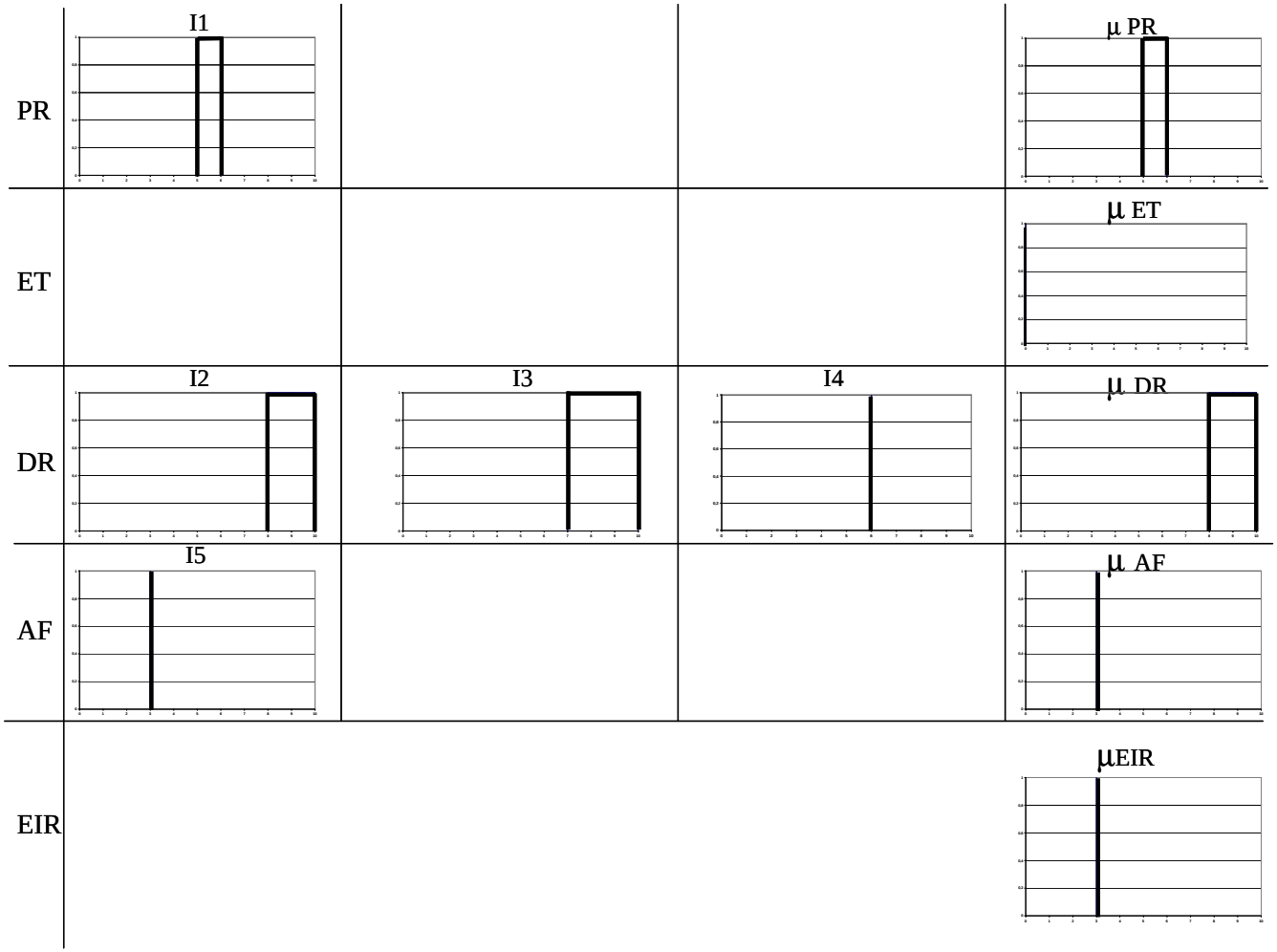


Figure 46 : Propagation des distributions de possibilité dans le modèle d'agrégation (E3 – V1-BAR1) – μPR : Performance Fonction de Protection – μET : Performance Fonction d'étanchéité – μDR : Performance Fonction de drainage – μAF : Performance Fonction d'auto-filtration – μEIR : Performance par rapport à l'érosion interne dans le remblai

Barrage	Experts	Comparaison de la note précise donnée par l'expert avec la distribution de possibilité	Comparaison de la note précise donnée par l'expert avec le résultat de la défuzzification	Comparaison de la note précise calculée par l'algorithme avec la distribution de possibilité	Comparaison de la note précise calculée par l'algorithme avec le résultat de la défuzzification
V1-BAR1	**E1**	Note précise expert = 6 Distribution : Support = [2, 7] Note précise appartient au support	Note précise expert = 6 Note défuzzifiée = 7 Ecart entre les deux notes	Note précise algorithme = 6 Distribution : Support = [2, 7] Note précise appartient au support	Note précise algorithme = 6 Note défuzzifiée = 7 Ecart entre les deux notes
	E2	Note précise expert = 8 Distribution : Support = [3, 6] Note précise n'appartient pas au support	Note précise = 8 Note défuzzifiée = 6 Ecart entre les deux notes	Note précise algorithme = 6 Distribution : Support = [3, 6] Note précise appartient au noyau	Note précise algorithme = 6 Note défuzzifiée = 6 Notes identiques
	E3	Note précise expert = 3 Distribution : Note précise = 3 Notes précises et identiques		Note précise algorithme = 0 Distribution : Note précise = 3 Notes précises mais différentes	
V1-BAR4	**E1**	Note précise expert = 0	Note précise expert = 0	Note précise algorithme = 1	
	E2	Note précise expert = 2 Distribution : Note précise = 0		Note précise algorithme = 2 Distribution : Note précise = 0	
	E3	Note précise expert = 2 Distribution : Note précise = 0		Note précise algorithme = 2 Distribution : Note précise = 0	
V1-BAR5	**E1**	Note précise expert = 0	Note précise expert = 0	Note précise algorithme = 2	
	E2	Note précise expert = 1 Distribution : Note précise = 0		Note précise algorithme = 2 Distribution : Note précise = 0	
	E3	Note précise expert= 2 Distribution : Note précise = 0		Note précise algorithme = 2 Distribution : Note précise = 0	

Tableau 41 : Résultat de la comparaison de la notation déterministe (fournie par l'expert et calculée par l'algorithme) avec la notation floue

Pour les deux barrages étudiés pour lesquels ne se pose aucun problème particulier d'érosion interne (V1-BAR4 et V1-BAR5), la notation précise et le résultat de la notation avec prise en compte des imperfections sont très proches : nous rappelons que pour les experts, il n'existe pas vraiment de différence entre les notes 0, 1 et 2.

Pour le barrage V1-BAR1 qui lui présente des problèmes d'érosion interne dans le remblai, les résultats sont variables en fonction des experts :

- pour E1, il y a un écart d'un point entre la note précise que cet expert avait donné lors de la séance de validation de la méthode d'évaluation de la performance et la note defuzzifiée. En revanche, la note précise appartient au support du sous-ensemble flou. Nous obtenons les mêmes résultats lorsque nous comparons la distribution de possibilité au résultat fourni par l'algorithme d'évaluation de la performance ;
- pour E2, il y a un écart de deux points entre la note précise que cet ingénieur avait donné lors de la séance de validation de la méthode d'évaluation de la performance et le résultat de la defuzzification. Par contre, si l'on compare par rapport au résultat fourni par l'algorithme d'évaluation déterministe de la performance, la note fournie par l'algorithme appartient au noyau de la note imparfaite ;
- pour E3, il y a accord parfait entre le résultat qui avait été donné par cet expert au cours de la séance de notation déterministe (note 3) et le score obtenu par propagation des imperfections dans le modèle qui est la note précise 3. Par contre, on peut relever un écart entre la note calculée par l'algorithme et la notation sous forme imparfaite.

2.3.4 Bilan

Les premiers résultats obtenus dans le cadre de la propagation des imperfections sont encourageants. Il faut à présent creuser la validation de cette étape en étudiant d'autres cas d'ouvrages concernés par des phénomènes de vieillissement.

2.4 Fusion de données

Nous avons à notre disposition des distributions de possibilité fournies par trois experts. Nous proposons une démarche de fusion des données. Cette démarche est intéressante au stade de conception de l'outil où nous faisons noter le même dossier par plusieurs experts afin de vérifier l'homogénéité du groupe mais pourra également être mise en œuvre dans le cadre d'expertise collective.

Le principe de la fusion de données a été présenté dans la Partie 1 (Chapitre 4 - § 2.2.). Nous illustrons ce principe à partir des données obtenues pour l'indicateur I7 (Qualité du béton) présentées sur la Figure 47.

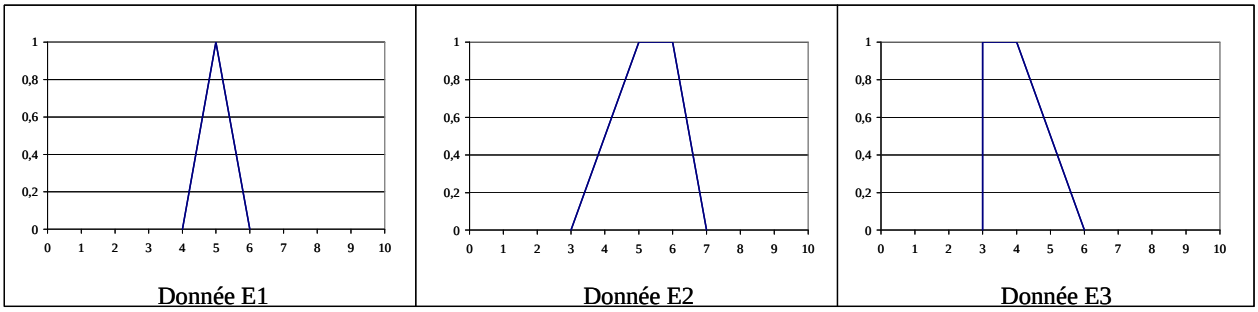


Figure 47 : Distributions de possibilité utilisées pour réaliser la fusion des données

Les intervalles à unifier avec leur masse de qualité associée sont les suivants :

- Donnée E1 :

  $\Rightarrow$ [4 ; 6] – m = 0,5

  $\Rightarrow$ [4,5 ; 5,5] – m = 0,5
- Donnée E2 :

  $\Rightarrow$ [3 ; 7] – m = 0,5

  $\Rightarrow$ [4 ; 6,5] – m = 0,5
- Donnée E3 :

  $\Rightarrow$ [3 ; 6] – m = 0,5

  $\Rightarrow$ [3 ; 5] – m = 0,5

Le Tableau 42 présente la fusion de la donnée E1 avec la donnée E2.

		Donnée E1	
		[4 ; 6] m = 0,5	[4,5 ; 5,5] m = 0,5
Donnée E2	[3 ; 7] m = 0,5	[4 ; 6] m = 0,25	[4,5 ; 5,5] m = 0,25
	[4 ; 6,5] m = 0,5	[4 ; 6] m = 0,25	[4,5 ; 5,5] m = 0,25

Tableau 42 : Fusion de la Donnée E1 avec la Donnée E2

La répartition des masses est la suivante :

- [4 ;6] – m = 0,5
- [4,5 ; 5,5] – m = 0,5

Ces intervalles résultats sont combinés avec la donnée E3 (cf. Tableau 43)

		Résultat (Donnée E1 ⊕ Donnée E2)	
		[4 ; 6] m = 0,5	[4,5 ; 5,5] m = 0,5
Donnée E3	[3 ; 6] m = 0,5	[4 ; 6] m = 0,25	[4,5 ; 5,5] m = 0,25
	[3 ; 5] m = 0,5	[4 ; 5] m = 0,25	[4,5 ; 5] m = 0,25

Tableau 43 : Fusion du résultat (Donnée E1 ⊕ Donnée E2) avec la Donnée E3

La répartition des masses résultat de la fusion (Donnée E1 ⊕ Donnée E2 ⊕ Donnée E3) est la suivante :

- [4 ; 6] – m = 0,25
- [4 ; 5] – m = 0,25
- [4,5 ; 5,5] – m = 0,25
- [4,5 ; 5] – m = 0,25

L'histogramme correspondant est présenté sur la Figure 48. La valeur consensuelle est l'intervalle qui rassemble le plus de consensus : ici, il correspond à [4,5 ; 5].

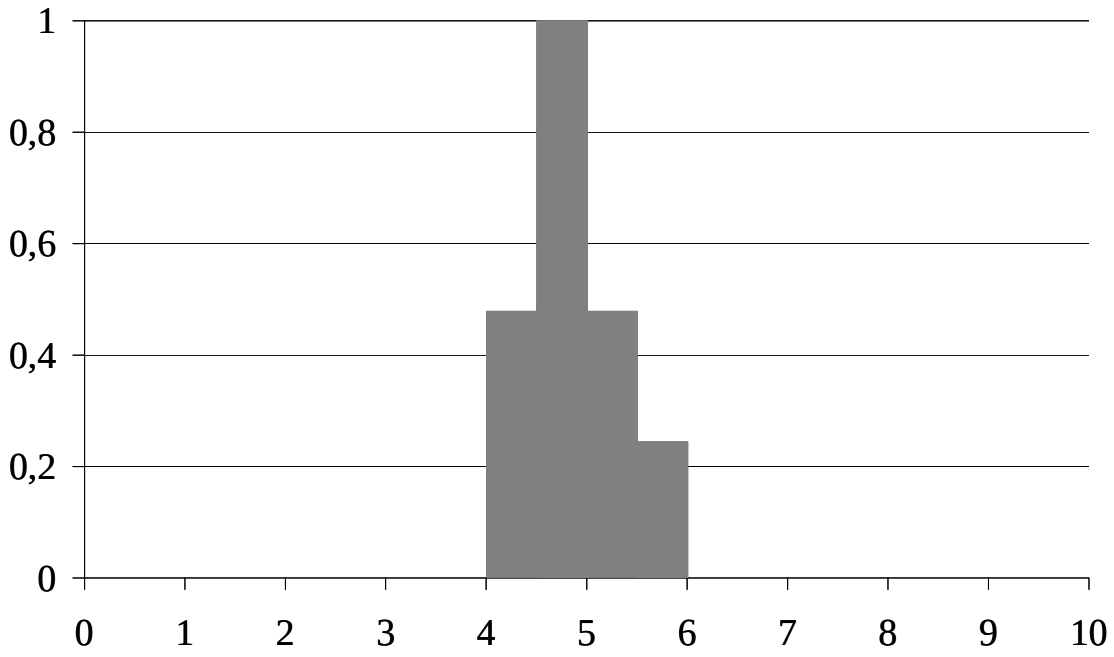


Figure 48 : Courbe de consensus obtenue pour la fusion (Donnée E1 ⊕ Donnée E2 ⊕ Donnée E3) de la Figure 47

Nous traitons à présent un cas théorique en affectant une masse de croyance à la note fournie par chacun des experts. Ces masses sont arbitrairement fixées à :

- mE1 = 0,9
- mE2 = 0,8
- mE3 = 0,7

Les intervalles à unifier avec leur masse de qualité associée sont les suivants :

- Donnée E1 :
  ⇒ [4 ; 6] – m = 0,45
  ⇒ [4,5 ; 5,5] – m = 0,45
  ⇒ [0 ; 10] – m = 0,1
- Donnée E2 :
  ⇒ [3 ; 7] – m = 0,4
  ⇒ [4 ; 6,5] – m = 0,4
  ⇒ [0 ; 10] – m = 0,2
- Donnée E3 :
  ⇒ [3 ; 6] – m = 0,35
  ⇒ [3 ; 5] – m = 0,35
  ⇒ [0 ; 10] – m = 0,3

Le Tableau 44 présente la fusion de la donnée E1 avec la donné E2.

		Donnée E1		
		[4 ; 6] m = 0,45	[4,5 ; 5,5] m = 0,45	[0 ; 10] m = 0,1
Donnée E2	[3 ; 7] m = 0,4	[4 ; 6] m = 0,18	[4,5 ; 5,5] m = 0,18	[3 ; 7] m = 0,04
	[4 ; 6,5] m = 0,4	[4 ; 6] m = 0,18	[4,5 ; 5,5] m = 0,18	[4 ; 6,5] m = 0,04
	[0 ;10] m = 0,2	[4 ; 6] m = 0,09	[4,5 ; 5,5] m = 0,09	[0 ; 10] m = 0,02

Tableau 44 : Fusion de la Donnée E1 avec la Donnée E2

La répartition des masses est la suivante :

- [3 ; 7] – m = 0,04
- [4 ;6] – m = 0,45
- [4 ; 6,5] – m = 0,04
- [4,5 ; 5,5] – m = 0,45
- [0 ; 10] – m = 0,02

Ces intervalles résultats sont combinés avec la donnée E3 (cf. Tableau 45)

		Résultat (Donnée E1 ⊕ Donnée E2)				
		[3 ; 7] m = 0,04	[4 ; 6] m = 0,45	[4 ; 6,5] m = 0,04	[4,5 ; 5,5] m = 0,45	[0 ; 10] m = 0,02
Donnée E3	[3 ; 6] m = 0,35	[3 ; 6] m = 0,014	[4 ; 6] m = 0,1575	[4 ; 6] m = 0,014	[4,5 ; 5,5] m = 0,1575	[3 ; 6] m = 0,007
	[3 ; 5] m = 0,35	[3 ; 5] m = 0,014	[4 ; 5] m = 0,1575	[4 ; 5] m = 0,014	[4,5 ; 5] m = 0,1575	[3 ; 5] m = 0,007
	[0 ; 10] m = 0,3	[3 ; 7] m = 0,012	[4 ; 6] m = 0,135	[4 ; 6,5] m = 0,012	[4,5 ; 5,5] m = 0,135	[0 ; 10] m = 0,006

Tableau 45 : Fusion du résultat (Donnée E1 ⊕ Donnée E2) avec la Donnée E3

La répartition des masses résultat de la fusion (Donnée E1 ⊕ Donnée E2 ⊕ Donnée E3) est la suivante :

- [3 ;6] – m = 0,021
- [3 ; 5] – m = 0,021
- [3 ; 7] – m = 0,012
- [4 ;6] – m = 0,3065
- [4 ; 5] – m = 0,1715
- [4 ; 6,5] – m =0,012
- [4,5 ; 5,5] – m = 0,2925
- [4,5 ; 5] – m = 0,1575
- [0 ;10] – m= 0,006

L'histogramme correspondant est présenté sur la Figure 49. La valeur consensuelle est l'intervalle qui rassemble le plus de consensus : ici il correspond à [4,5 ; 5]. Toutefois par rapport à la courbe de la Figure 49, l'histogramme est beaucoup plus étalé, conséquence de l'ignorance partielle introduite dans ce cas théorique.

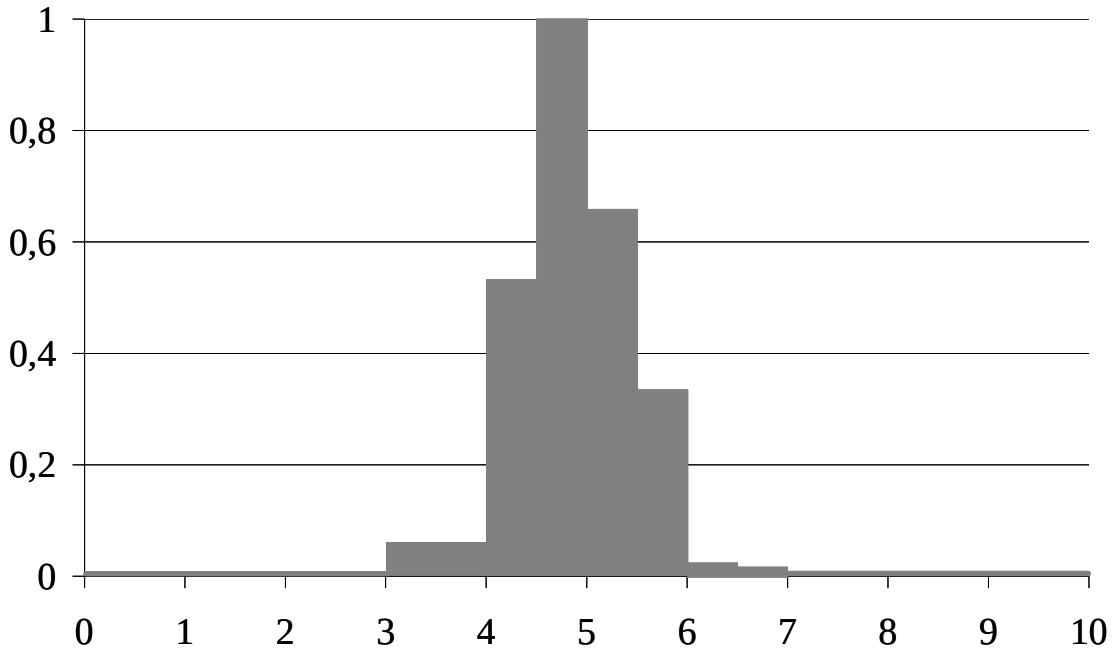


Figure 49 : Courbe de consensus obtenue pour la fusion (Donnée E1 ⊕ Donnée E2 ⊕ Donnée E3) avec introduction de masses de qualité pour l'évaluation des trois experts

3. Etude de sensibilité

L'analyse de sensibilité peut être définie comme la quantification de l'effet d'une ou de plusieurs variables d'entrée sur la ou les variables de sortie. Nous effectuons ici une étude à partir de données théoriques : cette étude ne représente qu'un cas d'école.

3.1 Types d'analyses de sensibilité

Il existe plusieurs types d'analyses de sensibilité, notamment :

- les analyses à variations fixes : chaque variable d'entrée se voit attribuer une valeur de base qui représente les conditions du milieu. L'analyse de sensibilité s'effectue en faisant varier la valeur de base d'une seule variable d'entrée en gardant toutes les autres variables d'entrée à leurs valeurs de base respectives. En modifiant la valeur de base de seulement une variable d'entrée à la fois, les analyses de sensibilité à variations fixes ne peuvent couvrir qu'une partie de toutes les combinaisons des valeurs possibles des variables d'entrée. De fait, les interactions entre les variables d'entrée ne sont pas prises en compte ;
- les analyses stochastiques : cette approche intègre les densités de probabilité de chacune des variables d'entrée au lieu de leurs valeurs de base. L'utilisation des densités de probabilité permet d'éliminer les limites des analyses à variations fixes :

  ⇒ en incluant la corrélation entre les variables d'entrée ;

  ⇒ en utilisant toute la densité de probabilité des variables d'entrée au lieu de seulement quelques valeurs ;

  ⇒ en traitant simultanément toutes les variables d'entrée.

3.2 Approche développée

Nous prenons ici une approche de ce dernier type. Toutefois, ce sont des distributions de possibilité qui sont introduites sur les variables d'entrée puis propagées dans le modèle. Nous considérons une fonction mathématique générique appelée f pour faire cette analyse sur un plan théorique. Notre modèle est à sorties multiples comme nous l'avons vu plus haut : les sorties sont, d'une part, les performances des fonctions et, d'autre part, les performances par rapport aux modes de rupture. La fonction f représente aussi bien la fonction permettant l'agrégation des indicateurs (obtention de l'évaluation de la performance des fonctions) que la fonction d'agrégation des fonctions (obtention de l'évaluation de la performance vis-à-vis d'un mode de rupture).

Soit $\tilde{B} = f(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, ... \tilde{A}_n)$ avec

- $\tilde{B}$ la variable de sortie exprimée sous la forme d'une distribution de possibilité ;
- $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, ... \tilde{A}_n$ les variables d'entrée exprimées sous la forme de distributions de possibilité ;
- f une fonction pouvant être un opérateur arithmétique de type addition, soustraction, calcul du maximum, égalité…

Pour évaluer la sensibilité de $\tilde{B}$ par rapport aux variables $\tilde{A}_i$, nous recherchons les variables $\tilde{A}_i$ ou les combinaisons de variables $\tilde{A}_i$ qui influencent la distribution de possibilité $\tilde{B}$.

3.3 Applications

Nous menons cette étude de sensibilité tout d'abord pour le modèle d'évaluation de la performance des fonctions puis pour le modèle d'évaluation d'un phénomène ou de la performance de l'ouvrage vis-à-vis d'un mode de rupture.

3.3.1 Evaluation de la performance des fonctions

Dans notre cas, la performance des fonctions est obtenue en assemblant les différents indicateurs concernés par l'opérateur maximum (cf. Figure 12). Pour analyser la sensibilité de la variable de sortie aux variables d'entrée, nous considérons deux cas :

- les indicateurs sont représentés par des distributions dont les supports sont disjoints : l'imprécision sur la sortie sera donnée par l'imprécision de la variable d'entrée située la plus loin sur l'échelle c'est-à-dire la plus près de la note 10 (cf. Figure 50). Dans tous les cas, il est donc important de donner des notes les plus « serrées » possibles tout en représentant la réalité des imperfections : plus les notes des indicateurs seront larges, plus la performance de la fonction sera imprécise et donc les décisions d'action correctives sur le composant correspondant défectueux seront difficiles ou délicates à prendre. Ceci concerne plus particulièrement les indicateurs directs, qui comme nous l'avons indiqué plus haut, se mesurent sur la partie supérieure de l'échelle ;

- les variables sont représentées par des distributions de possibilité différentes (triangles de support différent ou encore triangle et trapèze) et dont les supports ont une intersection non nulle : S_{SOR} sera déterminée par $MAX(S_{ENTi})$ que nous calculons selon l'équation 6. Dans ce cas, la convergence de plusieurs indicateurs évalués sur la même échelle vers une même « zone » de l'échelle tend à diminuer l'imprécision attachée à la performance de la fonction (cf. Figure 51).

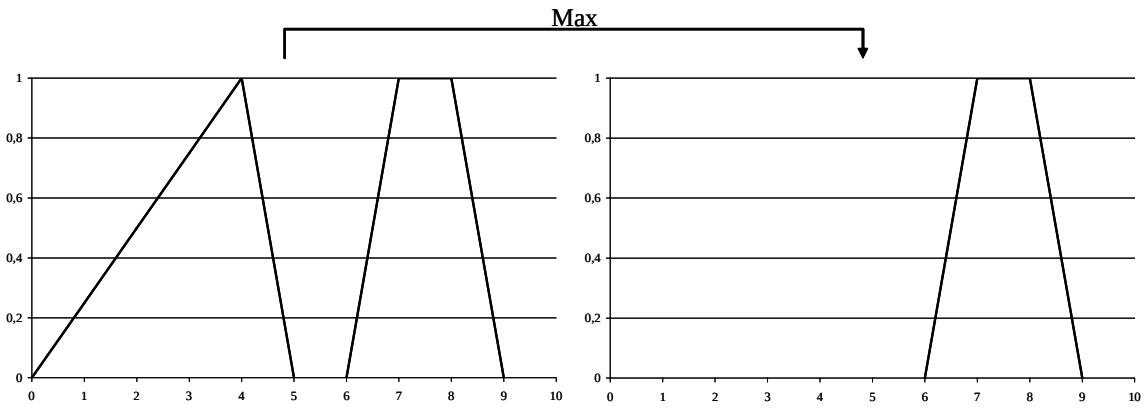


Figure 50 : Résultat de la propagation de données imprécises dans le modèle de calcul de la performance d'une fonction

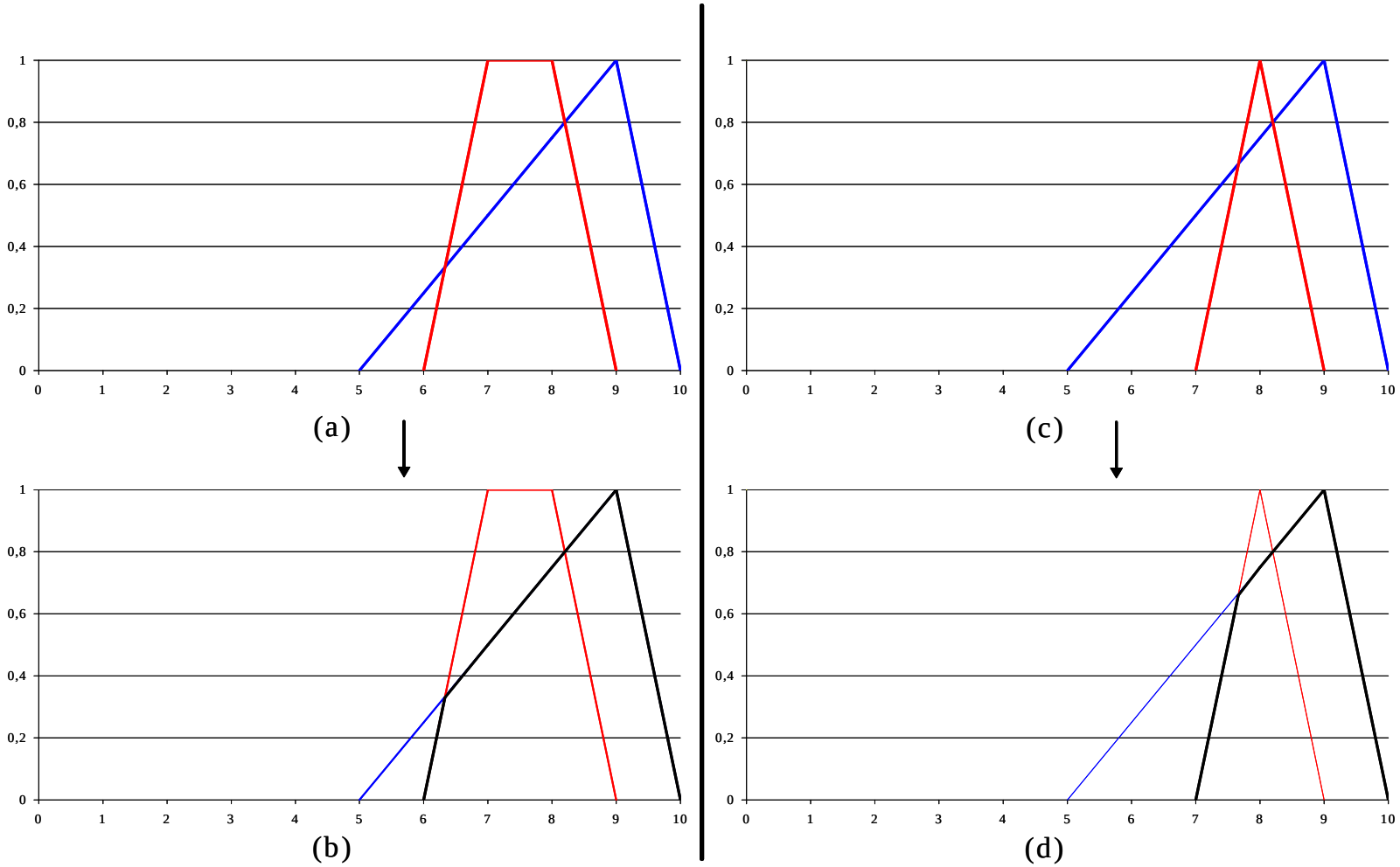


Figure 51 : Résultat de la propagation de données imprécises dans le modèle de calcul des performances - a et c : entrées du modèle, b et d : sorties du modèle (performance d'une fonction)

3.3.2 Evaluation des phénomènes ou de la performance vis-à-vis d'un mode de rupture

Le raisonnement développé ci-dessous pour l'évaluation d'un phénomène est valable pour l'évaluation de la performance vis-à-vis d'un mode de rupture.

Plaçons-nous dans le cas de l'érosion interne dans le remblai et considérons l'évaluation du phénomène « infiltration d'eau contournant le drain » (cf. Figure 31). Trois règles permettent d'obtenir la valeur du phénomène d'infiltrations d'eau contournant le drain à partir de quatre variables d'entrée (Fuite, Piézométrie, Performance Fonction Etanchéité, Performance Fonction Drainage) :

- **SI** Fuite > 2 **OU SI** Piézométrie > 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = MAX (Fuite, Piézométrie) ;
- **SI** Fuite ≤ 2 **ET SI** Piézométrie ≤ 2 **ET SI** Perf Fonction Etanchéité ≤ 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = Perf Fonction Etanchéité ;
- **SI** Fuite ≤ 2 **ET SI** Piézométrie ≤ 2 **ET SI** Perf Fonction Etanchéité > 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = Perf Fonction Drainage.

Pour réaliser cette étude de sensibilité, nous nous plaçons dans différentes situations récapitulées dans le Tableau 46 qui définit les notes possibles pour chacun des indicateurs en fonction du cas considéré. Cette partition permet de tester les trois règles de la base. Nous avons considéré toutes les valeurs de l'échelle pour les indicateurs Fuite et Piézométrie même si les jalons n'ont pas été définis en tous les points de l'échelle : avec une notation sous forme de distribution, il est envisageable que l'expert dépasse les jalons établis pour la notation déterministe.

Variables d'entrée	**Cas a**	**Cas b**
Fuite (FU)	0-1-2	3-4-5-6-7-8-9-10
Piézométrie (PI)	0-1-2	3-4-5-6-7-8-9-10
Performance Fonction Etanchéité (ET)	0-1-2	3-4-5-6-7-8-9-10
Performance Fonction Drainage (DR)	0-1-2	3-4-5-6-7-8-9-10

Tableau 46 : Situations étudiées pour l'analyse de sensibilité

Pour étudier la sensibilité, chacune des variables est représentée par une forme géométrique (triangle, trapèze…). L'aire de cette forme est notée S_{FU}, S_{PI}, S_{ET} et S_{DR} respectivement pour la mesure des fuites, la piézométrie, la performance de la fonction d'étanchéité et la performance de la fonction de drainage. L'aire de la forme géométrique représentant la sortie du modèle, c'est-à-dire le phénomène d'infiltration d'eau contournant le drain, est notée S_{INF}.

Le Tableau 47 donne les résultats de l'étude de sensibilité. Il se lit de la manière suivante : pour la première ligne, tous les indicateurs sont évalués selon le cas a, donc entre 0 et 2. Le résultat pour le phénomène d'infiltration est un ensemble flou correspondant à l'ensemble flou correspondant à la performance de la fonction d'Etanchéité.

Fuite (S_{FU})	Piézométrie (S_{PI})	Performance Fonction Etanchéité (S_{ET})	Performance Fonction Drainage (S_{DR})	Résultats « Infiltrations d'eau contournant le drain » (S_{INF})
a	a	a	a	$S_{INF} = S_{ET}$
a	a	a	b	$S_{INF} = S_{ET}$
a	a	b	a	$S_{INF} = S_{DR}$
a	a	b	b	$S_{INF} = S_{DR}$
a	b	a	a	$S_{INF} = S_{PI}$
a	b	a	b	$S_{INF} = S_{PI}$
a	b	b	a	$S_{INF} = S_{PI}$
a	b	b	b	$S_{INF} = S_{PI}$
b	a	a	a	$S_{INF} = S_{FU}$
b	a	a	b	$S_{INF} = S_{FU}$
b	a	b	a	$S_{INF} = S_{FU}$
b	a	b	b	$S_{INF} = S_{FU}$
b	b	a	a	$S_{INF} = MAX (S_{FU}, S_{PI})$
b	b	a	b	$S_{INF} = MAX (S_{FU}, S_{PI})$
b	b	b	a	$S_{INF} = MAX (S_{FU}, S_{PI})$
b	b	b	b	$S_{INF} = MAX (S_{FU}, S_{PI})$

Tableau 47 : Résultats de l'analyse de sensibilité en fonction des situations rencontrées

On peut constater que dans douze cas sur seize au total, l'imprécision liée à l'une des quatre variables FU, PI, ET, DR est directement reportée sur la variable de sortie INF. Dans les quatre autres cas, c'est la combinaison, par l'opérateur maximum, de l'imprécision attachée aux deux variables FU et PI qui est reportée sur la variable de sortie. Comme nous venons de le voir, dans ce cas, il est possible d'avoir une réduction de l'imprécision sur la variable de sortie : tout dépend des formes géométriques des entrées et de leur superposition éventuelle (cf. Figure 51).

Si on analyse dans le détail, les seize situations :

- dans deux cas, l'imprécision de la variable de sortie est directement liée à l'imprécision attachée à l'évaluation de la performance de la fonction d'étanchéité ;
- dans deux cas, l'imprécision de la variable de sortie est directement liée à l'imprécision attachée à l'évaluation de la performance de la fonction de drainage ;
- dans quatre cas, l'imprécision de la variable de sortie est directement liée à l'imprécision attachée à l'évaluation des fuites ;
- dans quatre cas, l'imprécision de la variable de sortie est directement liée à l'imprécision attachée à la piézométrie ;
- dans quatre cas, l'imprécision de la variable de sortie est liée à l'imprécision attachée à l'évaluation des fuites et à celle attachée à la piézométrie.

En conclusion, en fonction de la situation, il est nécessaire d'apporter un soin particulier à la notation des imprécisions sur telle ou telle entrée. On remarque néanmoins l'importance de la qualité à apporter à la notation des indicateurs directs qui interviennent directement sur la variable de sortie.

Si l'indicateur Fuite et/ou l'indicateur Piézométrie et/ou la performance de la fonction d'étanchéité et/ou la performance de la fonction de drainage sont évalués par une distribution dont le support remplit les conditions du cas a et du cas b (triangle dont le support est [1,4] par exemple), on se trouve dans une situation particulière puisque des règles contradictoires vont être activées. Par exemple :

- **SI** Fuite > 2 **OU** si Piézométrie > 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = MAX (Fuite, Piézométrie) ;
- **SI** Fuite ≤ 2 **ET SI** Piézométrie ≤ 2 **ET SI** Perf Fonction Etanchéité ≤ 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = Perf Fonction Etanchéité ;

Dans ce cas, nous posons une hypothèse simplificatrice en nous ramenant au cas b (logique de la situation la pire) : on ne considèrera que les notes comprises dans [3,4] (cf. Figure 52). Ce procédé permet d'éliminer le caractère non monotone de la base de règles autour du point 2 et ainsi de pouvoir réaliser la propagation des imperfections dans le modèle.

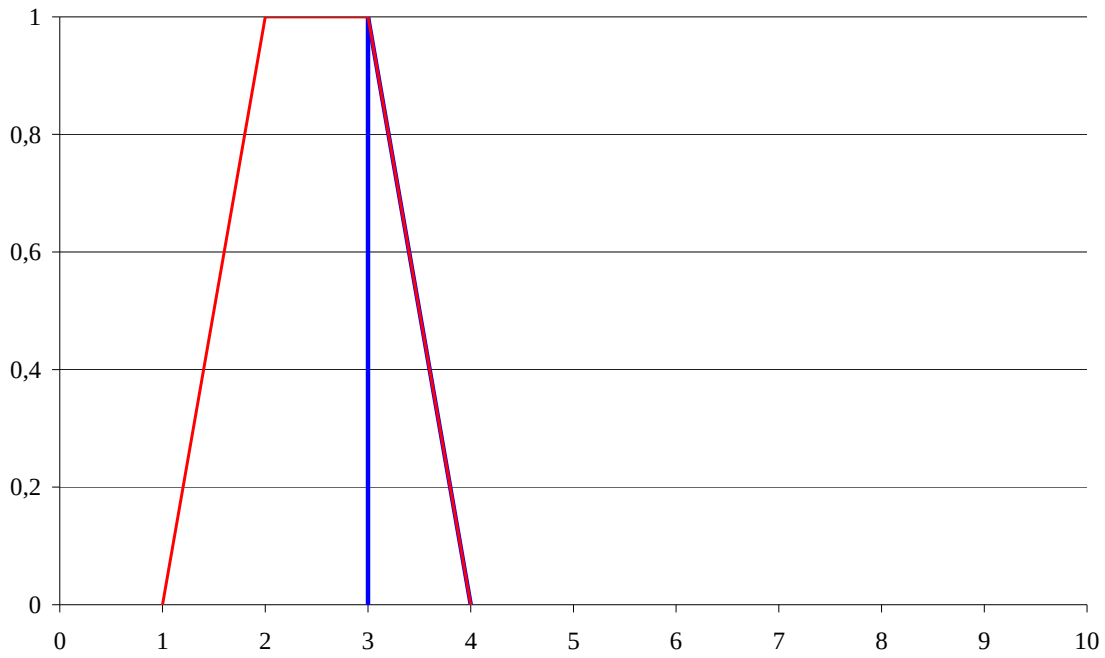


Figure 52 : Réduction de l'imprécision sur les données d'entrée – en rouge, donnée de base, en bleu, donnée traitée

Partie 4
Discussion

Chapitre 1 - Apports et perspectives méthodologiques

Chapitre 2 - Apports et perspectives opérationnels

Dans cette dernière Partie, nous synthétisons les apports méthodologiques et opérationnels de ce mémoire sur les aspects

- d'évaluation de la performance du barrage ;
- de développement d'une base de connaissances des phénomènes de vieillissement des barrages en remblai ;
- de détermination des origines des imperfections des données d'entrée ;
- de prise en compte et de propagation de ces imperfections.

Nous y abordons également les perspectives que nous avons dégagées de ces travaux.

Chapitre 1 - Apports et perspectives méthodologiques

Nous présentons tout d'abord les apports des travaux avant de passer aux perspectives. La Figure 53 et la Figure 54 en font la synthèse.

1. Evaluation de la performance du barrage

1.1 Apports méthodologiques

Notre contribution est la proposition et la mise en œuvre d'une méthodologie de recueil et formalisation de connaissances nécessaires à l'évaluation de la performance et de la conformité aux règles de l'art, ici d'un ouvrage hydraulique. Cette méthodologie devrait pouvoir être utilisée pour d'autres ouvrages du génie civil compte tenu du fait que les quatre types de données utilisées le sont classiquement dans le génie civil.

Nos travaux ont abouti à :

- un format de description des différentes données sous la forme d'indicateurs. Trois types ont été décrits : les indicateurs directs qui renseignent sur une défaillance, les indicateurs qui informent sur une dégradation et les indicateurs qui témoignent d'une dégradation ou d'une défaillance ;
- un modèle quantitatif de détermination de la performance et de la conformité aux règles de l'art par agrégation des indicateurs. Les modèles comportent deux niveaux d'abstraction : le niveau des fonctions du barrage et le niveau des modes de rupture ;
- une procédure de validation de la démarche et des résultats.

Au-delà des aspects d'aide à l'évaluation, les développements permettent une capitalisation et un regroupement des connaissances, très importants pour leur pérennisation et leur transmission à de nouveaux ingénieurs. Le retour des experts sur les séances de travail met aussi en avant des effets positifs : échange d'expériences, partage d'une culture commune, classification méthodologique dans l'évaluation de la sécurité, vocabulaire commun…

Nous avons confronté notre approche à une méthode actuellement opérationnelle d'évaluation de la performance des barrages, en l'occurrence la méthode des indices de condition développée par Hydro-Québec. Nous avons montré que les connaissances et données utilisées et intégrées dans les deux méthodes sont identiques même si les objectifs sont différents.

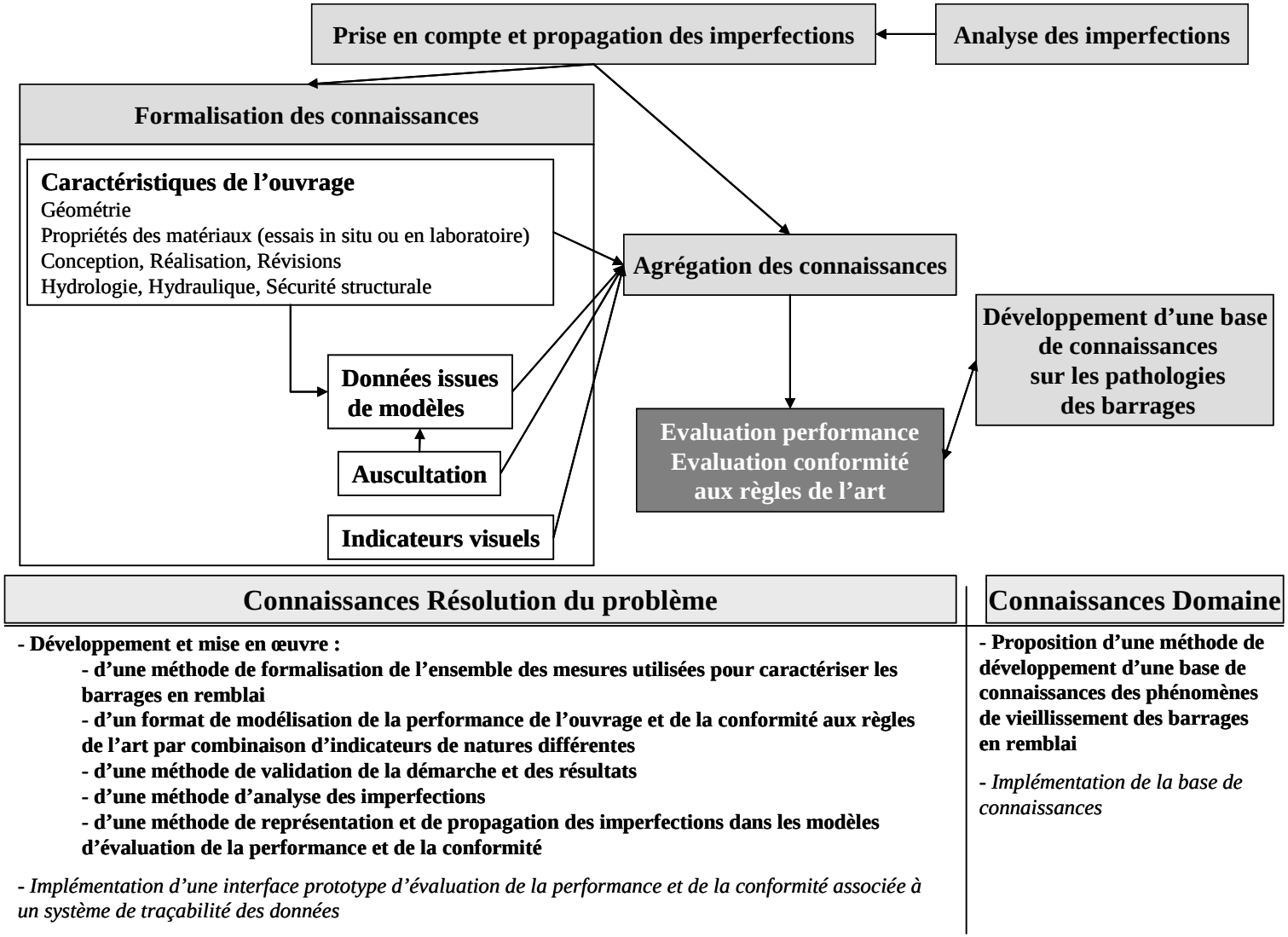


Figure 53 : Apports méthodologiques et opérationnels de la thèse – Apports méthodologiques en gras et apports opérationnels en italique

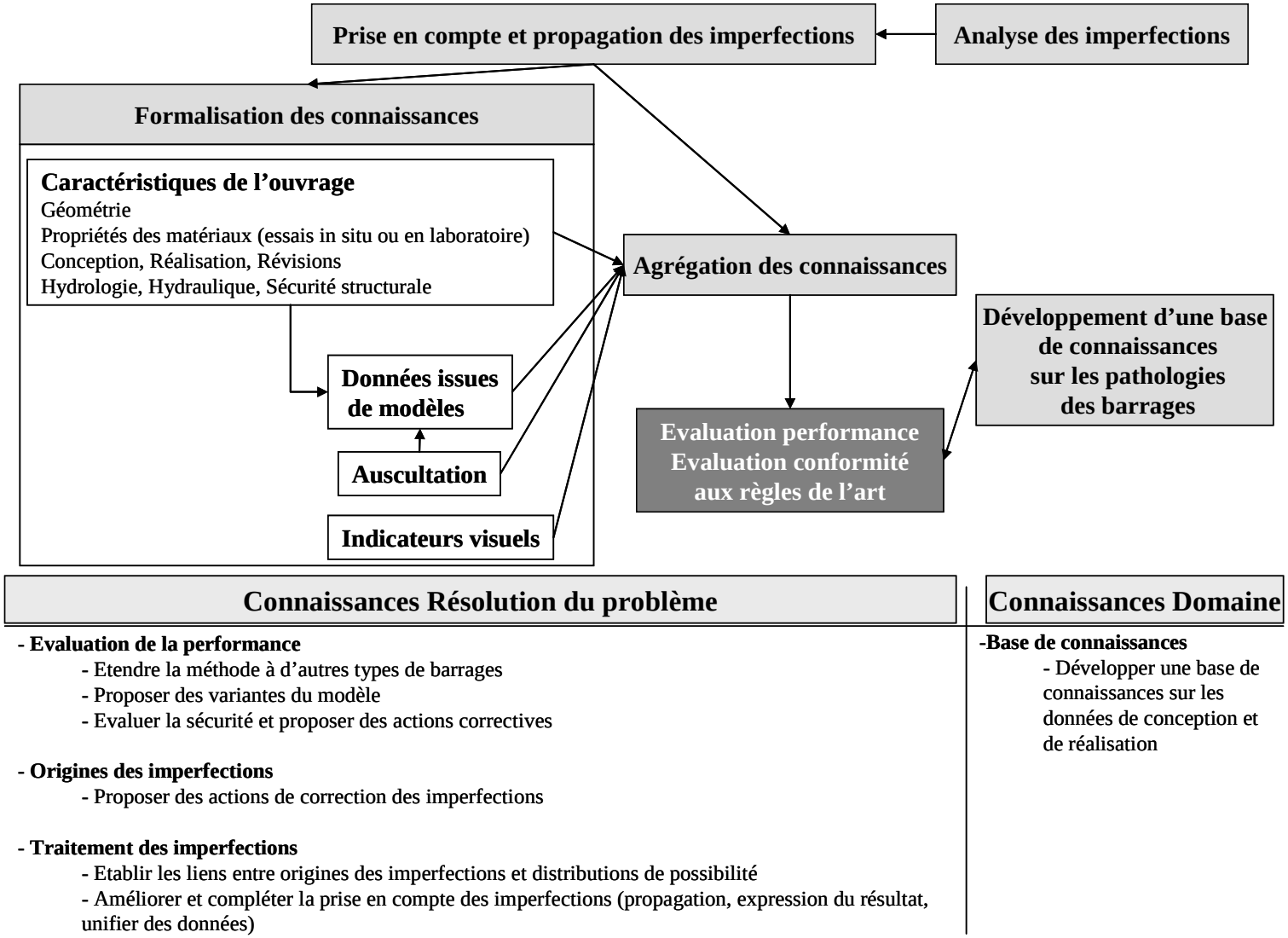


Figure 54 : Perspectives méthodologiques de la thèse

Enfin, nous avons testé la méthode pour le suivi de la performance d'un barrage dans le temps mais également pour l'analyse d'un barrage pour différents scénarios (érosion interne dans le remblai, érosion interne liée à un ouvrage traversant, glissement) : l'expert qui a réalisé la notation a validé l'ensemble des notes fournies par le modèle.

La méthodologie que nous avons déployée est basée sur le recueil et la formalisation de connaissances. Elle ne requiert pas de moyens lourds, expérimentaux par exemple. Par contre, la principale ressource est le temps passé à la préparation des séances, aux séances proprement dites puis au traitement des informations.

Nous avons chiffré le temps consacré aux séances de recueil en fonction du mode de rupture considéré (cf. Figure 55). Trente et une heures ont été nécessaires pour la formalisation de l'ensemble des modes de rupture affectant le remblai proprement dit. Pour les fondations, quatre séances de deux heures ont permis de décrire des modes de rupture et de vieillissement : pour les fondations meubles, un seul mode de rupture est considéré, l'érosion interne et pour les fondations rocheuses, seuls des scénarios de vieillissement ont été formalisés car il est considéré qu'une fondation rocheuse, dans le cas d'ouvrages en remblai, ne peut pas subir de ruptures. La proportion de ce temps n'est pas affectée de façon uniforme à chacun de ces modes de rupture : le mode le plus consommateur a été l'érosion interne et le moins consommateur, le cisaillement des fondations meubles. Ce déséquilibre peut s'expliquer de deux manières :

- l'érosion interne dans le remblai a été le premier cas traité. Des raffinements de la méthode ont été réalisés au cours des premières séances ce qui a conduit à « ralentir » la formalisation de ce mode de rupture ;
- le cisaillement des fondations meubles est un mode de dégradation et n'est donc pas aussi complexe qu'un mécanisme de rupture.

En outre, le glissement du remblai (et/ou de la fondation) a requis peu d'heures en séances. Ceci est probablement lié au fait que le début des scénarios d'érosion interne dans le remblai et de glissement du remblai sont identiques : sont concernées les fonctions d'étanchéité et de drainage. Ils diffèrent seulement ensuite. La formalisation était donc déjà disponible pour ces deux fonctions lorsque le groupe a abordé le cas du glissement.

Ont été impliqués en moyenne quatre experts par séance, le groupe ne pouvant que rarement se réunir au complet. Les résultats de la séance sont en tout état de cause, complétés directement avec le ou les experts qui n'ont pas pu participer à la séance ou encore repris en début de séance suivante.

Le schéma de la Figure 55 ne représente, par contre, que la partie visible de l'iceberg. Ne sont comptabilisées que les heures passées en séance avec le groupe d'experts. N'y figure aucunement le temps passé à la préparation des recueils et aux formalisations post-séances qui ne concernent principalement que la personne chargée du recueil. De même n'est pas compté le temps passé pour la validation qui a mobilisé un ingénieur en génie civil pour l'élaboration des dossiers, les experts pour la réalisation des tests puis la personne chargée du recueil pour le traitement des données.

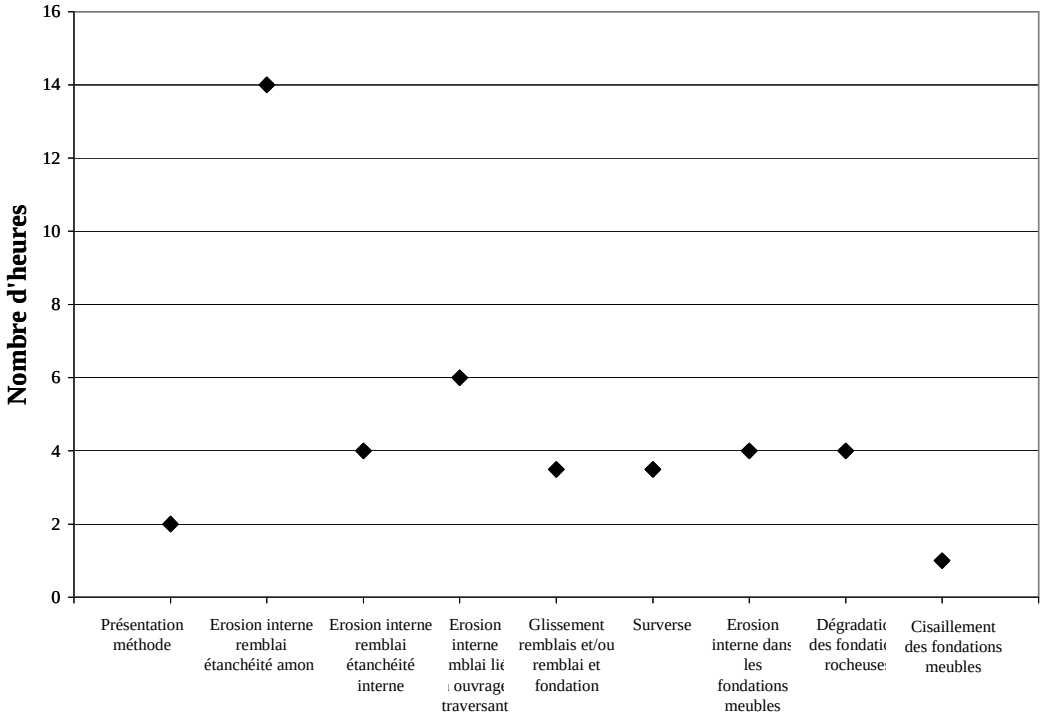


Figure 55 : Nombre d'heures passées par le groupe d'experts par type de scénario

1.2 Perspectives méthodologiques

1.2.1 Etablir des variantes du modèle

Le modèle d'évaluation de la performance présenté dans ce mémoire est destiné aux experts du domaine pour des situations de revues décennales ou d'analyses approfondies de l'ouvrage. Or, le modèle d'évaluation de la performance pourrait être modifié afin d'être employé dans d'autres situations. Nous en avons identifié deux.

L'évaluation d'un parc d'ouvrages important, constitué de plusieurs centaines de barrages. S'il n'est pas concevable, pour des raisons de temps et de moyens, de conduire une expertise détaillée sur chacun de ces ouvrages, il faut toutefois fournir une note pertinente permettant par exemple leur classement en différentes catégories ou leur hiérarchisation par rapport à des travaux de maintenance, de confortement... Un modèle simplifié devrait être mis en œuvre :

- les agrégations devraient être revues : l'objectif serait de déterminer la performance par rapport à chacun des modes de rupture, voire la performance globale du barrage intégrant l'ensemble des modes de rupture. On rejoindrait en ce sens la démarche des indices de condition d'Hydro-Québec ;
- dans un deuxième temps, on pourrait imaginer conduire des inspections plus détaillées sur les ouvrages les plus dégradés ou situés en amont de zones présentant la plus forte vulnérabilité… ;

L'évaluation des ouvrages au cours des visites annuelles par les services de contrôle. Ces visites sont basées sur trois éléments : (i) l'inspection des parties visibles non noyées, (ii) le contrôle de l'état des organes d'évacuation des eaux et des dispositifs d'auscultation et (iii) la vérification des missions de surveillance et d'entretien à la charge du propriétaire. Là aussi un modèle dégradé pourrait être mis en œuvre avec en entrées uniquement des données issues de l'inspection visuelle. Cette évaluation pourrait être complétée par l'affectation d'une note aux dispositifs d'auscultation, note établie à partir de la grille d'évaluation de la qualité des informations que nous avons proposée.

1.2.2 Maîtrise de la sécurité

Nous avons montré que le modèle d'évaluation de la performance pouvait être utilisé pour le suivi des barrages dans le temps : en le mettant en œuvre au cours de la vie du barrage, nous pouvons suivre son comportement. Nous pensons qu'il est essentiel d'aller plus loin dans l'intégration de l'aspect temporel dans le modèle en traitant les aspects prédictifs. Sur cette base, il devrait alors être possible de proposer des actions de correction du comportement afin de rétablir l'ouvrage dans un état de fonctionnement nominal. Ces actions correctives peuvent être de différentes natures : actions de réparations, actions de maintenance, mise en place d'inspections plus fréquentes… Pour chacune d'elles, une échéance devra être associée.

Cette recherche se heurte à un verrou important : à l'heure actuelle, la cinétique des phénomènes affectant les barrages est encore, de manière générale, mal connue. Ceci pose un problème conséquent pour la prédiction du comportement du barrage. Par contre, un expert est capable d'évaluer la sécurité d'un barrage grâce à des modèles implicites mettant en jeu différentes connaissances et informations dont des modèles mécaniques existants. Partant de cette hypothèse, des travaux visant à proposer un modèle prédictif du comportement du barrage ont débuté fin 2006 au travers d'une thèse menée dans l'équipe Secure par Emilie Masse. Ces travaux sont encadrés par le LSIS (Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes) de Marseille.

L'approche développée dans la thèse d'Emilie Masse est issue des travaux du LSIS (Le Goc, 2004 ; Zanni *et al.*, 2006). Elle est basée sur une modélisation selon trois modèles génériques (Masse *et al.*, 2007) :

- le modèle structurel contenant les connaissances relatives aux composants et à leur interconnexion (par exemple, masque amont, système d'étanchéité) ;
- le modèle comportemental contenant les connaissances définissant les états et les événements (observations datées) qui provoquent des transitions d'état (par exemple, passage d'un état du système de drainage de « totalement libre » à « partiellement obstrué ») ;
- le modèle fonctionnel contenant les connaissances définissant les variables et les fonctions mathématiques liant entre elles les valeurs de ces variables. Les différents indicateurs définis dans notre travail constituent ces différentes variables.

L'approche multi-modèles présente l'avantage de simplifier la représentation des connaissances et leurs manipulations par le raisonnement. Ceci est particulièrement important pour des systèmes complexes comme les barrages.

Les modèles développés nous permettront d'accéder à l'évaluation de la sécurité de l'ouvrage, dans le temps par des aspects prédictifs, et de développer une base de données d'historiques de vieillissement à partir d'études de cas que l'expert pourrait utiliser comme des cas références. Enfin il est prévu dans la recherche de proposer, le cas échéant, des actions correctives pertinentes, à un pas de temps adapté. Pour ce dernier point, des approches multicritères d'aide à la décision pourraient être engagées : elles permettent de synthétiser des informations traduisant des aspects différents voire antagonistes (maximiser la sécurité, minimiser les coûts, respecter des délais…) et de trouver le meilleur compromis.

2. Développement d'une base de connaissances

2.1 Apports méthodologiques

Le développement d'une base de connaissances sur les phénomènes de dégradation des barrages a été proposé. Nous l'avons appliquée aux barrages en remblai. Au-delà de l'apport pédagogique, un point essentiel à noter est l'introduction d'un vocabulaire commun et accepté de manière consensuelle par les experts du groupe. Ainsi, les experts se réfèrent à ce vocabulaire lors des séances ultérieures de recueil de la connaissance ; ceci évite les ambiguïtés qui pourraient exister du fait de l'utilisation de termes différents. En outre, l'intérêt d'un tel outil est de rassembler un certain nombre de connaissances existantes mais dispersées dans des manuels techniques, des articles de revues scientifiques, des photothèques, des rapports d'expertise… La structure de cet outil est généralisable à d'autres ouvrages du génie civil.

La notion de complétude est importante pour la qualité de la base de connaissances. Le travail décrit dans ce mémoire n'y prétend pas : il s'agit plus d'une faisabilité avec renseignement d'un certain nombre de champs. Certains d'entre eux restent à compléter, la validation est à poursuivre et des champs comme les aspects cinétiques des phénomènes sont à introduire et à renseigner. Toutefois, dans ce dernier cas, peu d'informations sont actuellement disponibles mais des recherches sont en cours notamment sur le mécanisme d'érosion interne[15]. De la même manière, un champ « référence bibliographique » présentant les ouvrages de référence nous paraît un champ pertinent à intégrer et instancier. Ces ajouts doivent être faits de manière consensuelle.

2.2 Perspectives méthodologiques

Le développement d'une base de connaissances sur les données de conception et de réalisation des barrages, selon le même principe méthodologique est une autre perspective à ce travail de thèse. Elle permettrait de regrouper des connaissances concernant les composants des barrages : les matériaux mis en œuvre, les matériels utilisés pour la réalisation, les tests et essais de contrôles, les conditions de mise en œuvre… De la même manière que pour la base sur les phénomènes de dégradation, nous pensons qu'il est important d'illustrer les différents champs qui seront retenus.

Certaines règles de l'art sont actuellement mal définies : un outil de ce type peut permettre de mettre en évidence les hétérogénéités existantes pour certains paramètres de conception ou de réalisation.

3. Analyse des imperfections

3.1 Apports méthodologiques

[15] Le projet Erinoh (Erosion Interne dans les sols des Ouvrages Hydrauliques), financé par l'ANR en 2005, se déroule de 2006 à 2009. L'axe I de ce projet porte la caractérisation au laboratoire des lois d'érosion et regroupe cinq laboratoires français (Cemagref, Gem, LIRIGM, LMPG, LCPC). Il devrait apporter des éléments intéressants pour enrichir la base de connaissances.

Une méthodologie d'analyse des origines des imperfections a été présentée. Elle s'inspire des méthodes d'analyse du risque, notamment de l'AMDE ainsi que de travaux menés dans le génie civil pour évaluer la durabilité des produits du bâtiment. Elle a abouti à la proposition :

- de caractéristiques de qualité associées à chacun des types d'indicateurs (visuels, auscultés, calculés, de conception ou de réalisation) ;
- d'une grille de notation de chacune de ces caractéristiques ;
- d'une formule d'agrégation permettant d'obtenir la masse de qualité d'un indicateur.

Ce travail est important pour deux aspects. En effet, la notation pour un indicateur donné des différentes caractéristiques et le calcul de la masse de qualité résultante :

- constituent une voie de compréhension du format de représentation adopté par les experts pour représenter ces imperfections. Ceci est particulièrement important pour le transfert de savoir-faire ;
- peuvent mettre en évidence des faiblesses dans le système de mesure, le système de traitement des données ou la politique de surveillance. Ceci est particulièrement intéressant pour l'amélioration ou la maintenance de ces systèmes.

3.2 Perspectives méthodologiques

L'approche de quantification des origines des imperfections que nous avons proposée sera d'autant plus pertinente qu'elle sera menée au niveau des différents types de dispositifs d'auscultation : pendules, mesures topographiques, cellules de mesure de pressions interstitielles, piézomètres, mesures de débit… La suite des recherches va consister à adapter la grille de notation globale à chacun de ces types de dispositifs d'auscultation. Cette adaptation mènera peut-être également à revoir la formule d'agrégation des différentes caractéristiques de qualité qui est actuellement une moyenne de ces caractéristiques. L'introduction d'une pondération entre ces caractéristiques est l'une des voies à explorer afin d'obtenir une masse de qualité plus pertinente.

En outre, il est important de signaler qu'il est recommandé d'avoir « des recoupements entre types de capteurs différents, pour conforter les conclusions et enrichir le diagnostic » (Poupard et Royet, 2001). Cet aspect d'interaction entre les mesures issues des différents dispositifs n'est pas pris en compte dans la grille de définition des caractéristiques de qualité des différents dispositifs car chacun d'eux est traité isolément. Une réflexion devra être menée sur ce point précis.

Les résultats sur les origines des imperfections constituent une aide pour déterminer à terme, pour un barrage donné, des actions de correction de ces facteurs d'imperfections : par exemple, déplacer un capteur mal positionné, réaliser des reconnaissances et essais car des données sont absentes dans le dossier du barrage ce qui va conduire à réduire l'incertitude, mettre en place une action de maintenance (fauchage du remblai aval)... Une échéance pourrait être associée à ces recommandations : installer un nouvel instrument à court terme, faucher le talus à court terme, réaliser des essais à moyen terme… Ceci va dans le sens d'un meilleur suivi de l'ouvrage : ceci participe à une meilleure maîtrise du risque. Hydro-Québec a mené un travail similaire en déclinant la méthode des indices de condition sur les systèmes de surveillance (Hydro-Québec, 2005). Elle constitue le pendant pour tous les dispositifs de surveillance visuels et d'auscultation de la méthode sur les systèmes de défense (cf. Chapitre 1 de la Partie 3).

Comme dans le cas de l'évaluation de la performance, nous sommes face à un problème multicritère. Si on décide pour compléter les informations de faire par exemple des essais, différents critères devront être pris en compte : type d'essais, fiabilité, informativité, coût, durée… Ces différents critères peuvent être conflictuels.

4. Traitement des imperfections

4.1 Apports méthodologiques

Notre apport est ici la proposition d'une méthodologie :

- de représentation des imperfections attachées aux indicateurs ;
- de propagation des données imparfaites dans le modèle d'évaluation de la performance ;
- d'obtention d'une donnée précise en sortie ;
- de comparaison des résultats déclarés par plusieurs experts.

Ces travaux sont importants car ils permettent de mieux représenter la réalité que ne le ferait une notation précise : le score obtenu pour la performance et les décisions d'actions qui en découlent sont plus pertinents.

Là encore, ces méthodologies devraient pouvoir être étendues vers d'autres ouvrages de génie civil. Un des avantages de la méthodologie est que la représentation des notations sous la forme de distributions de possibilité est assez intuitive et l'apprentissage est très rapide. Ce formalisme a très vite été adopté par les experts comme en témoigne le graphique ci-dessous (Figure 56). En outre, le rôle de l'animateur diminue au cours de la séance : après avoir noté quelques indicateurs, les experts proposent directement des notes floues.

Le temps minimum d'analyse est de 1 min (I5 – E3 et I14 – E1) et le temps maximum de 10min (I8 et I10 – E2). La durée de notation ne montre pas spécialement de tendance à la diminution avec l'augmentation de cas traités. Le temps mis pour l'analyse dépend plutôt de la découverte d'un nouvel ouvrage (les cinq premiers indicateurs appartiennent par exemple au même barrage et donc la lecture des fiches est simplifiée) ou à la longueur de la description ou encore à la difficulté d'analyse du texte.

Enfin, nous souhaitons souligner que les courbes d'analyse pour les trois experts présentent une même tendance même si E2 a eu tendance à prendre plus de temps pour faire la notation (mais cela vient également du « rodage » de la démarche puisque E2 est le premier expert à avoir testé cette notation sous forme de distributions). On remarque que les temps les plus élevés pour noter les indicateurs et les temps les plus faibles sont globalement les mêmes pour les trois experts.

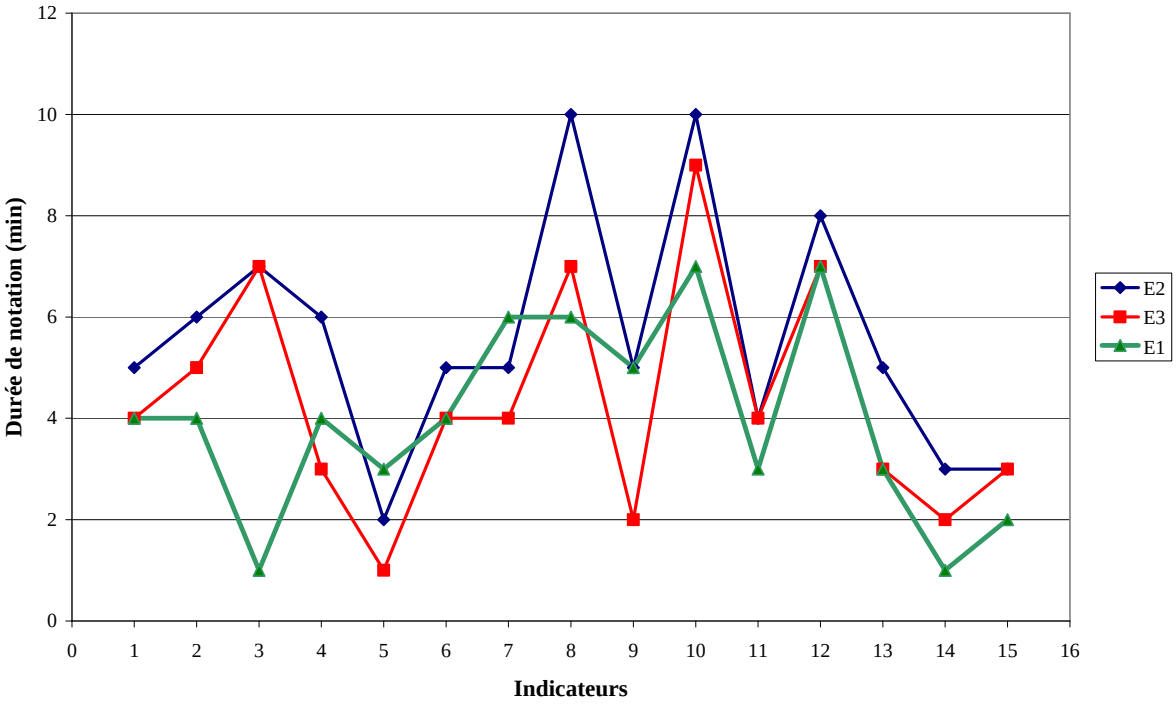


Figure 56 : Temps mis par trois experts pour noter les indicateurs sous forme floue

Une démarche de fusion des données issues de plusieurs experts a été proposée. La donnée consensuelle obtenue à l'issue de ce processus peut ensuite être utilisée comme variable d'entrée du modèle d'évaluation de la performance. Cette approche pourra être utilisée par exemple dans le cas de l'analyse collective d'un ouvrage.

Une analyse de sensibilité a permis de mettre en évidence l'influence des variables d'entrée sur la performance de l'ouvrage. Cette étude a mis en évidence l'importance du soin à apporter à la notation des indicateurs directs.

4.2 Perspectives méthodologiques

4.2.1 Liens entre les origines des imperfections et la représentation sous la forme de distributions de possibilité

Les travaux présentés dans ce mémoire sur le domaine de l'analyse des origines des imperfections constituent un support pour comprendre le format de représentation des imperfections adopté par les experts. Ceci est très important si l'on souhaite pouvoir transmettre ce savoir à de nouveaux ingénieurs qui seraient amenés à conduire des expertises. En effet, la détermination du type de la distribution de possibilité (par exemple un trapèze) et le paramétrage de cette forme (valeurs possibles = [2, 7] et valeurs vraisemblables = [4, 5]) sont faits par l'expert sur la base des imperfections qui entachent les données. Les liens sont actuellement implicites (représentés sur la Figure 57 par les flèches en pointillés) : ils sont mis en œuvre par l'expert lors de sa notation sous forme floue.

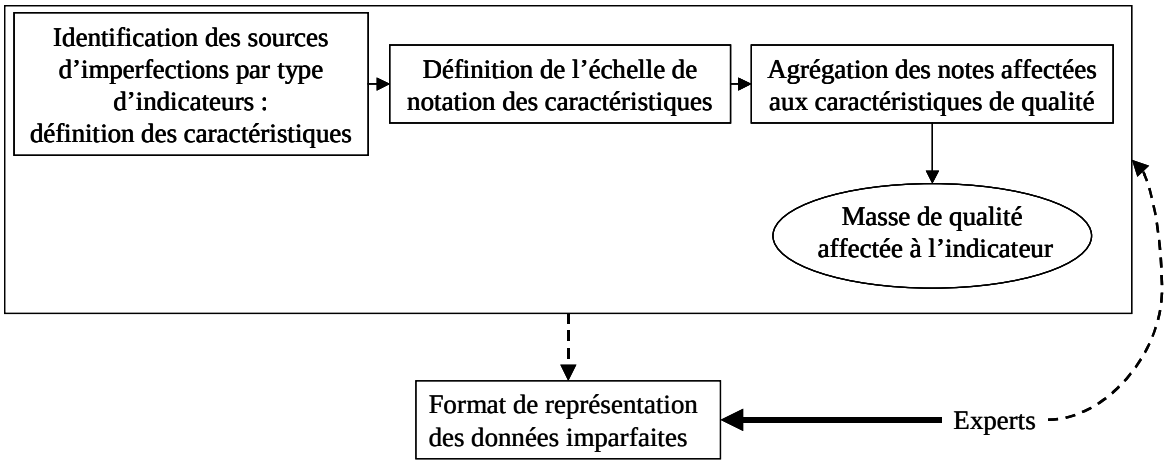


Figure 57 : Lien entre distribution de possibilité et origines des imperfections

Il serait intéressant d'expliciter les liens entre ces deux items (distribution de possibilité d'une part et masse de qualité d'autre part) pour deux raisons :

- ceci devrait permettre d'acquérir des connaissances sur la représentation des imperfections telle que pratiquée par les experts ;
- ceci devrait faciliter la transmission des savoirs : un ingénieur débutant des actions d'expertise ne saura pas a priori représenter de manière pertinente les imperfections des mesures si on ne lui donne pas des clés explicites pour le faire. Il pourra hésiter entre une distribution de possibilité de forme trapézoïdale, triangulaire, etc. et sur les intervalles des valeurs possibles et des valeurs les plus vraisemblables. L'objectif est ici d'expliciter ces clés afin de faciliter son apprentissage.

4.2.2 Amélioration et compléments à la prise en compte des imperfections

4.2.2.1 Propagation des imperfections dans le modèle d'évaluation de la performance

Actuellement, pour obtenir la sortie du modèle, nous sommes amenés à poser des hypothèses simplificatrices concernant la propagation des imperfections des données d'entrée. Ceci est dû à la non monotonie de la base de règles. Considérons la base de règles suivante :

- **(R1) SI** Fuite > 2 **OU** si Piézométrie > 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = MAX (Fuite, Piézométrie)
- **(R2) SI** Fuite ≤ 2 **ET SI** Piézométrie ≤ 2 **ET SI** Performance Fonction Etanchéité ≤ 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = Performance Fonction Etanchéité
- **(R3) SI** Fuite ≤ 2 **ET SI** Piézométrie ≤ 2 **ET SI** Performance Fonction Etanchéité > 2 **ALORS** Phénomène Infiltration = Performance Fonction Drainage

Supposons que Performance Fonction Etanchéité soit un intervalle flou dont le support contient la valeur 2. Cette situation pose un problème car les règles R2 et R3 vont être activées. Or, ces règles mènent à deux conclusions : Phénomène Infiltration est évalué par la Performance de la Fonction Etanchéité dans le cas de R2 (cas 1) et par la Performance de la Fonction Drainage dans le cas de R3 (cas 2). Pour faciliter la compréhension, nous avons traité un cas théorique sur la Figure 58.

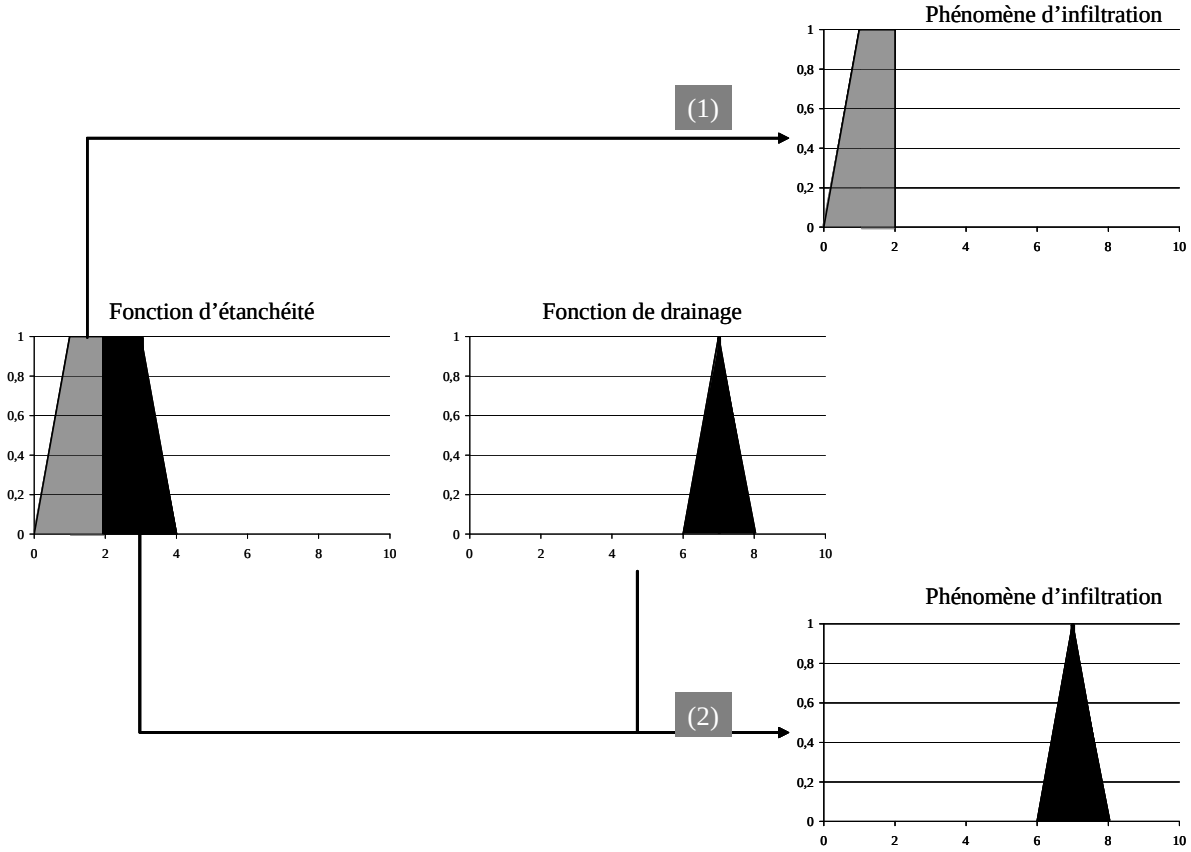


Figure 58 : Illustration de la non monotonie de la base de règles

Actuellement, nous faisons une hypothèse permettant de contourner ce problème : nous nous plaçons dans le cas le pire c'est-à-dire que nous ne considérons que les valeurs supérieures à 2 (Cas n°2 de la Figure 58). Cette hypothèse permet d'apporter de premières réponses mais restreint l'intérêt de la propagation des imperfections. L'élimination de ces hypothèses simplificatrices présente un enjeu scientifique et opérationnel important afin d'encore mieux représenter la réalité. Le développement de méthodes permettant de prendre en compte les imperfections associées à la propagation des données d'entrée dans le modèle nous paraît être une question scientifique intéressante.

4.2.2.2 Defuzzification

L'introduction des imperfections et leur propagation dans le modèle entraînent une sortie qui se présentera sous une forme floue. Dans un but opérationnel de prise de décision, une note précise doit être extraite de l'intervalle obtenu (processus de défuzzification). Différentes méthodes existent pour réaliser ce processus. Actuellement, nous utilisons la méthode de défuzzification par la méthode du maximum qui est l'une des méthodes les plus couramment utilisées. Or cette méthode n'est pas forcément optimale c'est-à-dire ne reflète pas forcément la note que donnerait l'expert. Une perspective est d'établir une méthode de défuzzification pertinente qui conditionne une décision d'actions correctives ultérieures pertinente.

Il faut avoir à l'esprit que le processus de défuzzification fait perdre de l'information que nous possédons sur la donnée : la Figure 59 montre que deux sous-ensembles flous différents défuzzifiés ici par la méthode du maximum mènent à la même note même si l'incertitude qui leur est attachée est totalement différente. Ceci est également vrai pour d'autres distributions défuzzifiées par la méthode du centre de gravité par exemple. La proposition d'une note de dispersion attachée à la valeur défuzzifiée qui peut être vue comme une valeur moyenne nous paraît également une voie de recherche importante.

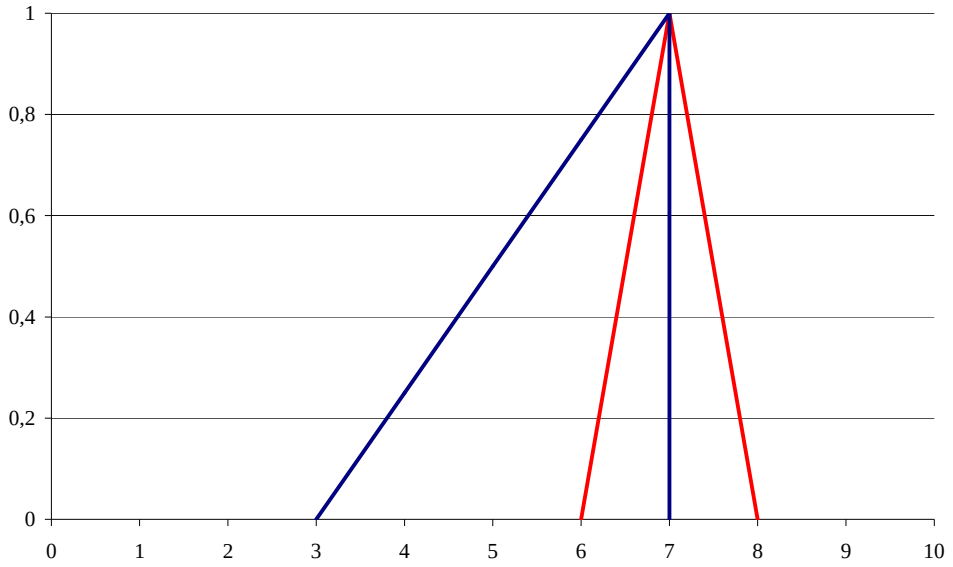


Figure 59 : Distributions différentes menant à la même note précise de 7 par utilisation de la méthode du maximum

4.2.2.3 Traitement du résultat par comparaison à un objectif

Le résultat obtenu est une note de performance de l'ouvrage vis-à-vis de modes de rupture. Dans le cadre de l'aide à la décision, cette performance peut être comparée à un objectif qui correspond par exemple à la performance minimale tolérée par le service de contrôle. Les paragraphes suivants traitent le cas de la comparaison à un objectif exprimé sous la forme d'un seuil (déterministe) puis sous la forme d'un sous-ensemble flou.

4.2.2.3.1 Cas où l'objectif est déterministe

Les mesures de possibilité et de nécessité définies par la théorie des possibilités pourraient être utilisées pour conclure sur la performance de l'ouvrage dans le cas où un seuil précis serait imposé. Nécessité et possibilité sont liées par la relation suivante :

$$N(A) = 1 - \Pi(A^c) \qquad \text{(Equation 23)}$$

où A^c est le complément de A (Bouchon-Meunier, 1999) :

- le degré de possibilité d'un événement A est noté Π(A). Il mesure le degré avec lequel l'événement est susceptible de se réaliser ;
- la nécessité indique le degré de certitude que l'on peut attribuer à cette réalisation. La réalisation de l'événement A est certaine (N(A) = 1) si et seulement si celle de son complémentaire A^c est impossible $\Pi(A^c) = 0$ donc Π(A)=1.

Plus un événement A est affecté d'une grande nécessité, moins l'événement complémentaire est possible, donc plus on est certain de la réalisation de A.

L'utilisation de ces deux mesures duales nous permettrait de fournir des éléments de décision par comparaison à un seuil de performance fixé. Soient :

- $\mu_A(x)$ la distribution de possibilité représentant le résultat final de l'évaluation (évaluation de la performance par rapport à l'érosion interne par exemple – cf. Figure 31) ;
- F un seuil de performance déterminé par exemple par les services de contrôle.

La distribution de possibilité de la performance est directement comparée à ce seuil en employant les termes de nécessité et possibilité par les formules suivantes :

$$\Pi(A < F) = \mathrm{Sup}_{x<F}\mu_A(x) \qquad \text{(Equation 24)}$$

$$N(A < F) = 1 - \mathrm{Sup}_{x\geq F}\mu_A(x) \qquad \text{(Equation 25)}$$

La Figure 60 illustre ce traitement.

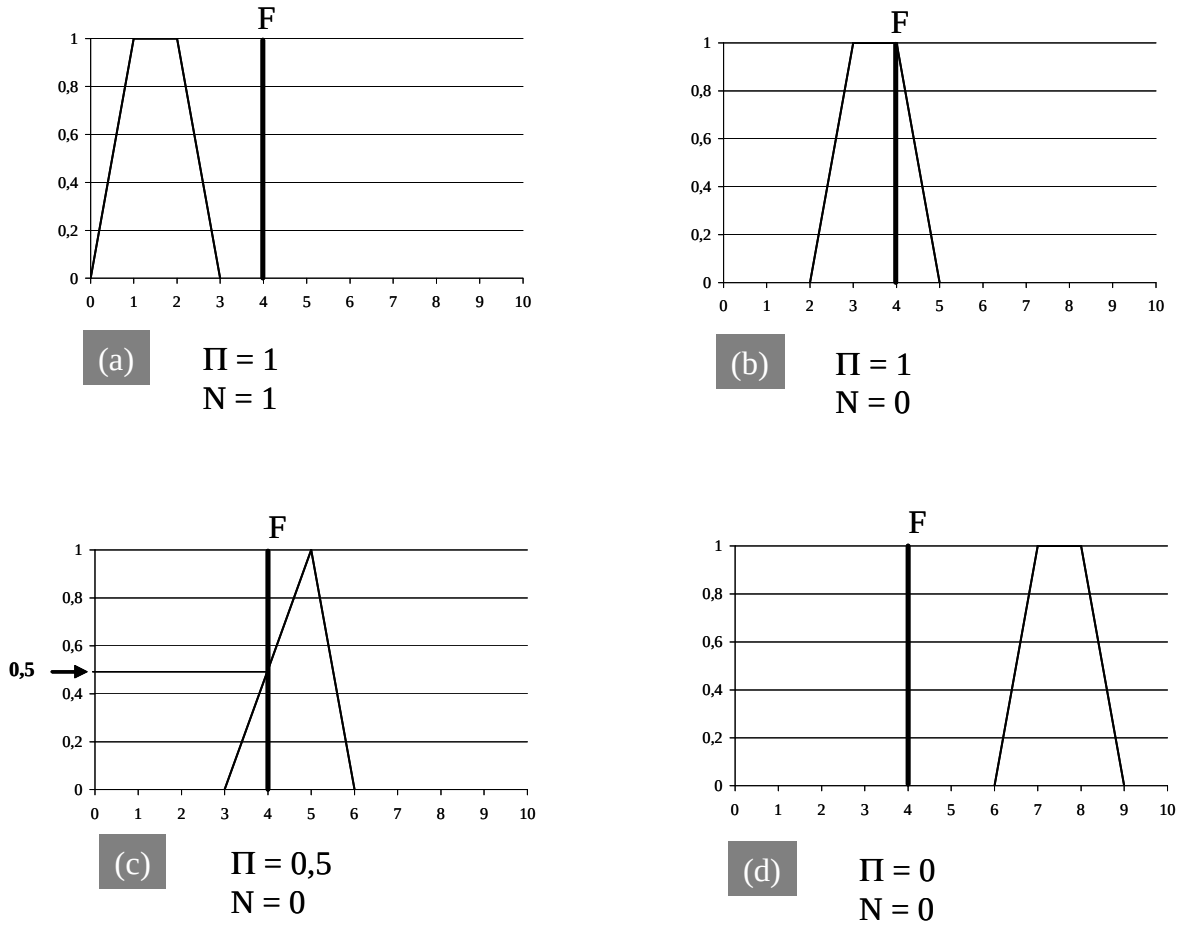


Figure 60 : Degré de possibilité et de nécessité de dépasser un seuil F

Pour le cas (a), il est possible et nécessairement vrai que l'évaluation est inférieure au seuil F fixé ($\Pi = N = 1$). Pour le cas (b), il est tout à fait possible mais pas nécessairement vrai que l'évaluation soit inférieure au seuil F (($\Pi = 1$ et $N = 0$). Pour le cas (c), le degré de possibilité que l'évaluation soit inférieure au seuil F est de 0,5 et enfin, pour le cas (d), il n'est pas possible (($\Pi = N = 0$) que l'évaluation soit inférieure à F.

La comparaison a été effectuée ici par rapport à une valeur précise de seuil F mais F pourrait être exprimée sous la forme d'un sous-ensemble flou.

Les conclusions peuvent alors être prises à partir de Π et N :

- si on prend une approche optimiste, on considèrera Π ;
- si on prend une approche pessimiste, on considèrera N ;
- une solution alternative consiste à considérer une approche intermédiaire comme par exemple la moyenne arithmétique entre Π et N.

4.2.2.3.2 Cas où l'objectif est flou

Dans le cas où l'objectif est défini de manière floue, la décision peut être prise à partir de la détermination de la possibilité et de la nécessité en généralisant l'approche présentée dans le paragraphe précédent. Elle peut également être prise à partir de la détermination d'un profil de compatibilité qui revient à faire une comparaison entre deux sous-ensembles flous. Il s'agit de savoir pour chaque valeur possible de la performance quelle est la satisfaction de l'objectif. Le résultat est un profil de compatibilité. Cette approche a été utilisée dans le cas du tassement d'une fondation superficielle (Boissier *et al.*, 1995). L'intérêt de cette approche est d'introduire une gradualité dans l'objectif et ne pas considérer un objectif précis pouvant être très drastique par exemple.

Le principe est le suivant : pour différentes alpha-coupes de l'objectif, on obtient deux valeurs a_α et b_α. Pour ces deux valeurs, on détermine les degrés d'appartenance respectifs $\alpha_{a\alpha}$ et $\alpha_{b\alpha}$ de la performance à l'objectif. La valeur maximale de $\alpha_{a\alpha}$ et $\alpha_{b\alpha}$ donne le degré d'appartenance du profil de compatibilité.

La Figure 61 présente une illustration de ce traitement. Dans cet exemple, on a $\alpha_{a\alpha} = 0$ et $b_\alpha = 3{,}25$ pour $\alpha = 0{,}4$. Les degrés d'appartenance respectifs de la performance à l'objectif sont alors $\alpha_{a\alpha} = 0$ et $\alpha_{b\alpha} = 0{,}6$. Le degré d'appartenance est donc 0,6. En procédant ainsi pour différentes alpha-coupes, on construit le profil de compatibilité présenté sur la Figure 61. Ce profil peut ensuite être défuzzifié : dans cet exemple, la défuzzification par le calcul du maximun donne un degré de compatibilité de 0,75.

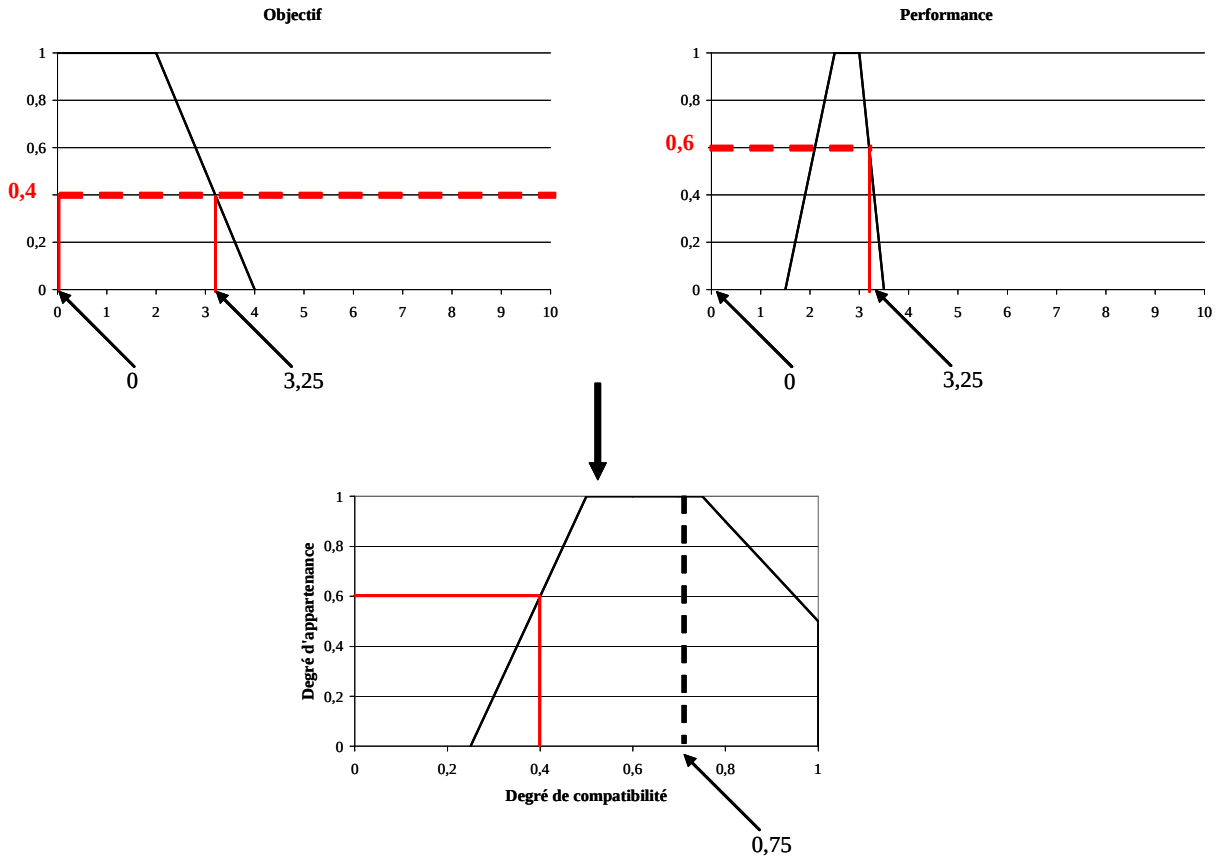


Figure 61 : Comparaison d'une performance évaluée de manière floue à un objectif défini de manière floue

5. Transmission des connaissances

Comme nous l'avons mentionné au cours de ce mémoire, la pérennisation des connaissances est une première étape qui ne prend réellement tout son intérêt que si elle est suivie d'une transmission de ces connaissances. Nous pensons que des méthodes spécifiques de transfert doivent être mises en place. Nous avions développé des méthodes spécifiques de transfert du « savoir-mesurer » dans le cadre du génie des procédés. Ces méthodes pourraient être réutilisées pour partie. Cette transmission permettrait à un ingénieur d'acquérir plus rapidement des connaissances utiles pour ses actions d'expertise et de partager le vocabulaire du groupe d'experts.

Chapitre 2 – Apports et perspectives opérationnels

Par apports opérationnels nous entendons ceux liés à un développement informatique. Nous présentons rapidement les trois outils que nous avons développés en soulignant que ce sont actuellement des outils de recherche, à l'état de prototype.

1. Evaluation de la performance du barrage

1.1 Apports opérationnels

Les apports opérationnels sont au nombre de deux :

- un outil d'aide à l'évaluation de la performance des barrages. Cet outil a été employé à deux titres :

  ⇒ au titre de la recherche pour les tests de validation de l'évaluation de la performance, pour le suivi d'un barrage au cours du temps et pour la validation de la méthodologie de notation des imperfections ;

  ⇒ à titre opérationnel : l'outil commence à être utilisé dans le cadre de l'analyse d'ouvrages menée par les experts. Ceci permet de le valider par des exemples réels. Deux cas ont d'ores et déjà été traités ;

- une base de données associée à l'outil d'aide à la décision qui permet l'enregistrement des données renseignées par l'utilisateur. Elle permettra à terme de pouvoir réaliser un suivi des barrages au cours du temps, d'effectuer des statistiques lorsque la base sera suffisamment renseignée… Toutefois plusieurs années seront nécessaires pour obtenir une base conséquente.

Nous tenons à souligner que l'expert reste maître de son jugement : si l'évaluation fournie par l'algorithme ne lui convient pas, il est en mesure de formuler une autre note, en la justifiant. Ceci permettra, le cas échéant, d'affiner le modèle ou des indicateurs pour corriger cet écart entre l'utilisateur et le modèle. Ainsi, ces outils doivent pouvoir évoluer. Il est important d'assurer la maintenance des connaissances si par exemple un nouvel indicateur peut être intégré au système.

1.2 Perspectives opérationnelles

Les perspectives portent ici sur la poursuite de l'implémentation des différents modes de rupture et de dégradation à la fois pour le remblai (à étanchéité interne et à étanchéité amont) et pour les fondations (rocheuses et meubles).

En outre, le travail a été mené ici sur un type particulier de barrages : les barrages en remblai. Les modes de rupture et les dégradations des fondations meubles et rocheuses ont également été étudiés. La suite des travaux vise à appliquer et, le cas échéant, adapter la méthode de formalisation aux autres types de barrages, barrages poids et barrages voûtes. Seront recueillis et formalisés l'ensemble des indicateurs pertinents pour l'évaluation de la performance des différentes fonctions et de la performance par rapport aux modes de rupture, ainsi que les modèles d'agrégation.

Une extension intéressante consisterait à mieux traiter les aspects de fiabilité humaine qu'ils ne le sont actuellement comme par exemple l'affichage d'un récapitulatif des indicateurs notés pour limiter les erreurs ou les oublis de notation.

2. Développement d'une base de connaissances

2.1 Apports opérationnels

La base de connaissances structurée pour les phénomènes de vieillissement des barrages a été implémentée à des fins de recherche, en utilisant le logiciel Access.

Les tables des fonctions, des phénomènes et des composants ont été renseignées. Elles contiennent toutes les données organisées. Des formulaires permettent la visualisation d'informations contenues dans une ou plusieurs tables à la fois.

L'interface avec l'utilisateur se fait par le biais de deux formulaires :

- le formulaire des phénomènes qui décrit pour chaque couple (phénomène, composant) pertinent (cf. Figure 62a) :
  - ⇒ la définition et les origines du phénomène ;
  - ⇒ la fonction concernée : drainage, résistance au glissement, étanchéité… ;
  - ⇒ les indicateurs permettant l'évaluation du phénomène : par exemple, piézométrie évaluée par cellules de pression, indicateur « fissuration des dalles » évalué par inspection visuelle… ;
  - ⇒ actions correctives : mise en place d'une recharge sur le remblai aval, entretien des exutoires de drain… avec des illustrations ;
  - ⇒ des cas de barrages ayant subi ce phénomène.
- le formulaire des fonctions qui matérialise le lien futur entre l'outil de calcul de la performance et la base de connaissances (cf. Figure 62b) ;

Au total, sont consultables (Antoine, 2006 ; Curt et Boissier, 2007) :

- soixante-trois fiches correspondant chacune à un couple (phénomène, composant) pour les remblais à étanchéité interne ;
- quarante-trois pour les remblais à étanchéité amont.

La base de connaissances peut être employée directement comme support documentaire ou de formation ou en complément de l'outil d'évaluation de la performance des barrages, pour des renseignements spécifiques dans le cadre de l'analyse d'un barrage.

En mode documentaire, la consultation des fiches peut se faire de deux manières :

- soit l'utilisateur fait défiler fiche par fiche l'intégralité du formulaire afin de prendre connaissance de toutes les défaillances de fonction possibles ainsi que les liens avec les phénomènes de dégradation. Pour ce faire, il utilisera les flèches situées dans la barre de tâche au bas de l'écran d'affichage. Ce moyen de consultation ne permet pas de restreindre la recherche à une fonction bien précise, sur un composant particulier. Il oblige l'utilisateur à consulter l'intégralité de la base de connaissances ;
- soit l'utilisateur utilise la commande « filtrage par formulaire » présente dans le logiciel Access. Il peut ainsi cibler et restreindre sa recherche aux fiches qui l'intéressent.

La Figure 62 fournit un exemple d'utilisation combinée des deux outils : le barrage étudié présente une dégradation de la fonction de protection (Figure 62c) puisque le score de cette fonction est de 10 (« médiocre »). L'utilisateur peut alors souhaiter obtenir plus de renseignements sur les phénomènes qui entraînent une dégradation de cette fonction. La mise en œuvre de la base de connaissances autorise l'accès à ces phénomènes via le formulaire des fonctions (Figure 62b) puis celui des phénomènes (Figure 62a) qui présente le phénomène de déformation de la protection du dispositif d'étanchéité amont selon les différents champs : composant concerné, définition et origines, illustration du phénomène, indicateurs, actions correctives avec illustrations, cas de barrages, fonction concernée.

(a)

(b)

(c)

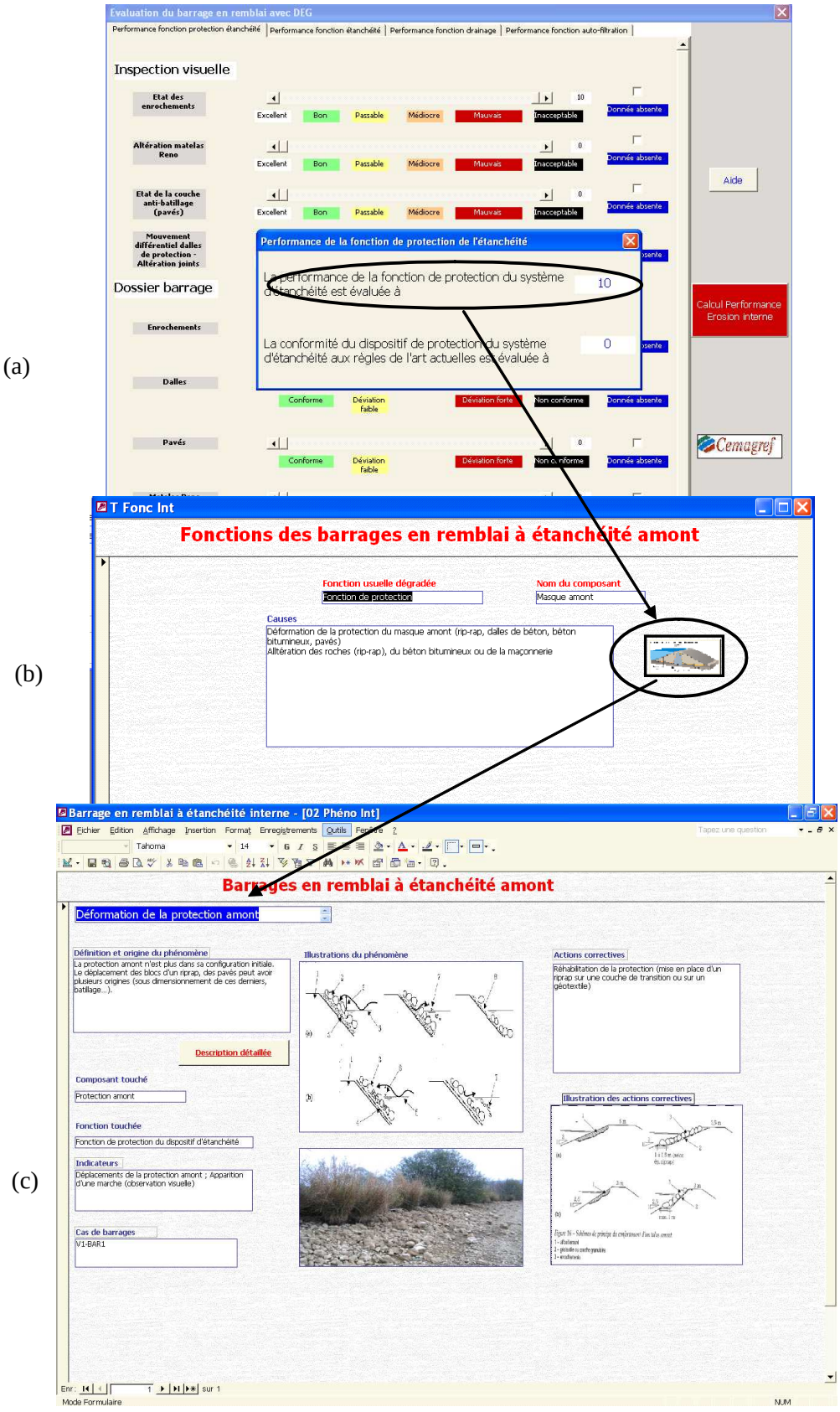


Figure 62 : Exemple d'utilisation conjointe des deux outils

2.2 Perspectives opérationnelles

La base de connaissances sur les phénomènes de dégradation des barrages doit être améliorée selon plusieurs angles :

- apporter des compléments sur les champs déjà identifiés ;
- rajouter de nouveaux champs tels que les données de cinétiques des phénomènes, importantes dans le cadre de l'évaluation de la sécurité du barrage (aspect prédictif) mais également sur la pathologie des indicateurs à partir de l'analyse des imperfections ;
- finir et poursuivre la validation ;
- faire vivre et actualiser la base : de nouveaux types d'actions correctives ou d'appareils d'auscultation verront sûrement le jour dans un avenir plus ou moins proche. Ces nouvelles technologies devront être décrites et intégrées à la base. Le travail de mise à jour de la base de connaissances est assez lourd mais est important pour en assurer sa pertinence.

Il est également prévu de renseigner la base pour les autres types de barrages, poids et voûtes, voire de l'étendre à l'ensemble des ouvrages hydrauliques en rajoutant les digues.

La base de connaissances sur les informations de conception et de réalisation devra elle aussi être implémentée une fois structurée et renseignée.

Conclusion

Cette thèse a porté sur le développement de méthodes et d'outils permettant l'évaluation de la performance des barrages en service. Parmi les voies possibles – modélisation numérique, analyses d'historiques, analyses statistiques, approches de la sûreté de fonctionnement, approches basées sur le recueil et la formalisation des connaissances – c'est cette dernière qui a été explorée. Au-delà des résultats en terme d'évaluation de la performance, notre recherche a eu pour objets de produire méthodologies et outils destinés aux experts du domaine afin :

- de capitaliser les connaissances, théoriques et heuristiques ;
- de rassembler et structurer les savoirs ;
- de pouvoir les transmettre à de nouveaux ingénieurs amenés à conduire des expertises ;
- d'unifier les notations des ingénieurs.

Les apports ont été faits sur quatre champs.

Les premiers résultats portent sur l'évaluation de la performance du barrage à partir d'une méthodologie de recueil et formalisation de connaissances. Les travaux ont abouti à la proposition d'un format de description des différentes données sous la forme d'indicateurs, à un modèle générique d'évaluation de la performance et à une procédure de validation.

Le développement d'une base de connaissances sur les phénomènes de vieillissement des barrages complète les méthodes d'évaluation proposées ci-dessus. Il s'agit ici de la formalisation de connaissances du domaine par opposition aux méthodes précédentes qui sont dans la lignée de la formalisation des connaissances pour la résolution du problème, c'est-à-dire l'évaluation de la performance du barrage. Cette base de connaissances présente plusieurs intérêts : faciliter la communication entre les acteurs du domaine, capitaliser les connaissances et les rassembler en un outil unique avec un objectif double de formation et/ou de documentation.

Une méthodologie de détermination des origines des imperfections des indicateurs a été proposée. Elle s'inspire des méthodes d'analyse du risque, notamment de l'AMDE ainsi que de travaux développés dans le domaine du bâtiment pour évaluer la qualité des données de durabilité. Elle permet d'affecter à un indicateur donné, une masse de qualité grâce à la lecture d'une grille de notation.

L'utilisation de la théorie des possibilités et de la logique floue nous a permis de définir une approche de représentation et de propagation des imperfections qui entachent les indicateurs. Une méthodologie de comparaison des notes données par plusieurs experts a également été décrite. Une analyse de sensibilité a été établie et illustrée.

Ces différentes méthodes ont conduit à trois outils informatiques : une interface d'aide à l'évaluation de la performance, un système de traçabilité des données et une base de connaissances sur les phénomènes de dégradation.

Les travaux ont été développés pour les barrages en remblai. Les différents modes de rupture et de dégradation ont été décrits pour le remblai proprement dit et les fondations. Dans ce mémoire, les illustrations ont cependant été principalement faites sur un type de mode de rupture, l'érosion interne dans le remblai, l'ensemble des scénarios n'étant pas encore totalement validé.

Ces différentes méthodologies ont été développées pour les barrages en remblai mais leur application à d'autres ouvrages du génie civil doit être possible. En effet, nous avons essayé dans la Partie 2 de travailler indépendamment du domaine applicatif. Pour appuyer ce propos de généricité, nous souhaitons également souligner que les différentes méthodologies ont été très bien acceptées par les différents experts membres du groupe.

En terme de perspectives, nous proposons à la fois des perspectives méthodologiques sur chacun des quatre aspects de la recherche mais également en terme opérationnel :

Au niveau méthodologique, les pistes sont les suivantes :

- pour l'évaluation de la performance :

  $\Rightarrow$ établir des variantes du modèle ;

  $\Rightarrow$ développer des méthodes allant vers la maîtrise de la sécurité ;

- pour la base de connaissances :

  $\Rightarrow$ développer une base de connaissances sur les données de conception et de réalisation des barrages ;

- pour la détermination des origines des imperfections :

  $\Rightarrow$ proposer des actions de correction des facteurs d'imperfections ;

- pour le traitement des imperfections :

  $\Rightarrow$ établir des liens entre les origines des imperfections et la représentation sous la forme de distributions de possibilité ;

  $\Rightarrow$ améliorer et apporter des compléments à la prise en compte des imperfections.

Nous souhaitons souligner que les perspectives méthodologiques les plus fortes résident sûrement sur l'analyse des imperfections et sur leur prise en compte.

Au niveau opérationnel, les pistes concernent :

- la suite de l'implémentation de l'évaluation de la performance vis-à-vis des différents modes de rupture et de dégradation à la fois pour le remblai (à étanchéité interne et à étanchéité amont), pour les fondations (rocheuses et meubles) et déployer la méthode sur d'autres types de barrages ;
- la prise en compte les aspects de fiabilité humaine dans les interfaces implémentées ;
- l'amélioration de la base de connaissances des phénomènes de dégradation des barrages.

Certaines des perspectives méthodologiques sont déjà initiées puisqu'une thèse a démarré fin 2006 sur la thématique de maîtrise de la sécurité des barrages et qu'un travail de post-doctorat a débuté en septembre 2007 sur la prise en compte et le traitement des imperfections.

Bibliographie

A

Abraham D. M., Wirahadikusumah R., Short T. J. & Shahbahrami S. (1998). Optimization modeling for sewer network management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124, 402-410.

AFNOR, (1994). Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie. 59 pages.

AFNOR, (1996). Vocabulaire de management de la valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle - Partie 1 : analyse de la valeur et analyse fonctionnelle. 24 pages.

Algusair A. M. & Al-Qudrah A. A. (1998). Artificial neural network approach for pavement maintenance. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 12, 249-255.

Andersen G. R. & Torrey V. H. (1995). Function-based Condition Index for embankment dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121, 579-588.

Andersen G. R., Chouinard L. E., Bouvier C. & Back W. E. (1999). Ranking procedure on maintenance tasks for monitoring of embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironnemental Engineering*, 125, 247-259.

Andersen G. R., Chouinard L. E., Hover W. H. & Cox C. W. (2001). Risk indexing tool to assist in prioritizing impovement embankment dam inventories. *Journal of Geotechnical and Geoenvironnemental Engineering*, 127, 325-334.

Antoine A. (2006). Développement d'une base de connaissances des pathologies des barrages. Rapport CUST-Cemagref Aix-en-Provence.

Aufleger M., Strobl T. & Dornstädter J. (2000). Fibre optic temperature measurements on dam monitoring - four years of experience. In *Proceedings of 20th Congress on Large Dams*, Beijing, China.

B

Bailey D. M., Brotherson D. E. & Tobiasson W. K., A. (1989). ROOFER: an engineered management system (EMS) for bituminous built-up roofs. U.S. Army Corps of Engineers.

Bandara N. & Gunaratne M. (2001). Current and future pavement maintenance prioritization based on rapid visual condition evaluation. *Journal of Transportation Engineering*, 127, 116-123.

Ben Armor S. & Martel J. M. (2004). Le choix d'un langage de modélisation des imperfections de l'information en aide à la décision. In *Proceedings of Congrès de l'ASAC*, Québec, Canada.

Benahmed N. & Bonelli S. (2007). Etude expérimentale de l'érosion interne d'une kaolinite. In *Proceedings of XXVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Bordeaux, France.

Boissier D., Al-Hajjar J. & Mammeri H. (1995). Fiabilité et possibilité en mécanique des sols. In *Proceedings of 12e Congrès français de mécanique*, Strasbourg, France.

Boissier D. & Alhajjar J. (1997). Probabilistic and fuzzy approaches for foundations reliability. In *Proceedings of ICOSSAR'97*, Kyoto, Japan.

Boissier D., Boulemia C. & Semaan I. (1998). Traitement de l'incertain dans une base de connaissances sur le sol. In *Proceedings of 1ère Conférence Internationale sur les nouvelles technologies de l'information pour l'aide à la décision dans le domaine du génie civil*, Montréal, Canada.

Boissier D. & Zatar A. (1998). Approche multicritère pour l'aide au choix d'une solution de plan de masse bâtiment en présence d'informations floues. In *Proceedings of 1ère Conférence Internationale sur les nouvelles technologies de l'information pour l'aide à la décision dans le domaine du génie civil*, Montréal, Canada.

Boissier D. (2000). Décision et incomplétude. *Revue Française de Géotechnique*, 93, 81-92.

Bonelli S., Félix H. & Tourment R. (1998). Interprétation des mesures d'auscultation des barrages par régression linéaire multiple 'HST'. In *Proceedings of 2ème conférence nationale JN-FIAB'98 sur la fiabilité des matériaux et des structures*, Marne la Vallée, France.

Bonelli S. (2001). Ouvrages hydraulique en remblai : un regard transversal sur l'action de l'eau. *Ingénieries*, 26, 49-58.

Bonelli S., Brivois O., Borghi R. & Benahmed N. (2006). On the modelling of piping erosion. *Comptes Rendus Mécanique*, 334, 555-559.
Bouchon-Meunier B. (1999). La logique floue. Presses Universitaires de France. 128 pages.
Bouchon-Meunier B. & Marsala C. (Eds) (2003). *Logique floue, principes, aide à la décision*. Hermès, Paris.
Bourdarot E., Carrère A., Mei L. & Hoonakker M. (2000). Apports combinés de l'auscultation et de la modélisation pour l'analyse et la compréhension du comportement des barrages. In *Proceedings of 20th Congress on Large Dams*, Beijing, China.
Brenner R. P., Krumdieck M. A. & Seid-Karbasi S. M. (1994). Geotechnical aspects in the safety assessment of embankment dams. In *Proceedings of 18th International Congress on Large Dams*, Durban.
Brown A. & Gosden J. D. (2006). Early detection of progressive internal erosion. In *Proceedings of 22nd Congress on Large Dams*, Barcelone, Spain.
Brown and Roots & Building Research Establishment (2002). DEFRA - Reservoir Safety - Floods and Reservoir Safety Integration - Final Report.
Bullock R. & Foltz S. D. (1995). REMR Management Systems-Navigation and reservoir structures condition rating procedures for concrete in gravity dams, retaining walls, and spillways. US Army Corps of Engineers.

C

Carrère A., Colson M., Goguel B. & Noret C. (2000). La modélisation : outil d'aide à l'interprétation des mesures. In *Proceedings of 20th Congress on Large Dams*, Beijing, China.
Carrère A. (1994). Barrages. In *Traité Construction*.
Catanach R. B., Hall R. B., James R. L., O'Neill A. L. & Von Thun J. L. (1991). Quail creek dike failure, failure mechanisms, redesign and construction. In *Proceedings of 17th International Congress on Large Dams*, Vienne, Austria.
Cathala F., Mériaux P. & Royet P. (1998). Développement d'une base de données sur les scénarios de vieillissement des barrages. *Ingénierie EAT*, n° spécial, 69-76.
Cattan J. & Mohammadi J. (1997). Analysis of bridge condition rating data using neural networks. *Microcomputers in Civil Engineering*, 12, 419-429.
CFGB (1997). Internal erosion: typology, detection, repair. Comité Français des Grands Barrages. 126 pages.
Charlet J., Bachimont B. & Troncy R. (2004). Ontologies pour le Web sémantique. Revue i3.
Cheng M. Y. & Ko C. H. (2003). Automated safety monitoring and diagnosis system for unstable slopes. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18, 64-77.
Chiang W., Liu K. & Lee J. (2000). Bridge damage assessment through fuzzy Petri Net based expert system. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14, 141-149.
Chou S. A., Chen C. C., Wang J., Chen K. C. & Chen L. M. (2001). A knowledge-based system for dam safety assessment in Taiwan. In *Proceedings of Symposium report on the 2nd Worldwide ECCE Symposium "Information and Communication Technology in the Practice of Building and Civil Engineering"*, Espoo, Finland.
CIGB (1994). Bulletin 93 - Ageing of dams and appurtenant works - Review and recommendations. CIGB. 235 pages.
CIGB (1995). Ruptures de barrages - Analyse statistique. CIGB. 73 pages.
Curt C., Trystram G. & Hossenlopp J. (2001). Formalisation of at-line human evaluations to monitor product changes during processing. Integration of human decision in the dry sausage ripening process. *Sciences des Aliments*, 21, 663-681.
Curt C., Allais I., Perrot N., Leblanc V. & Trystram G. (2004). Optimisation of the meat emulsification process using at-line human evaluations and the Simplex method. *Journal of Food Engineering*, 64, 33-41.
Curt C. & Boissier D. (2007). Pathologie des barrages : développement d'une base de connaissances et application aux ouvrages en remblai. In *Proceedings of XXVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Bordeaux, France.

D

Daly F., De la Personne C. & Chapital L. (2004). Etat des lieux patrimonial des digues de canaux de navigation en France. In *Proceedings of Sécurité des digues fluviales de navigation*, Orléans, France.
De Brito J., Branco F. A., Thoft-Christensen P. & Sorensen J. D. (1997). An expert system for concrete bridge management. *Engineering Structures*, 19, 519-526.
De Laleu V., Reverchon B., Cault J. B. & Lefranc M. (2000). La politique de maintenance des ouvrages et matériels de production hydroélectrique d'Electricité de France. Une expérience d'analyse de risque simplifiée, appliquée à l'optimisation de la maintenance d'un grand canal. In *Proceedings of Vingtième Congrès des grands Barrages*, Beijing, Chine.
Degoutte G. & Royet P. (1993). Sécurité des barrages en service. Cemagref Editions. 241 pages.
Dempster A. P. (1967). Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics*, 38, 325-339.
Dieng R., Corby O., Giboin A. & Ribière M. (1998). Methods and tools for corporate Knowledge Management. INRIA.
Dubois D. & Prade H. (1980). Fuzzy sets and Systems: Theory and Applications. Academic Press Inc. pages.

E

EDF-CEMAGREF (1998). Vigie-Barrages. CD-Rom V1.
Ekholm A. (1996). A conceptual framework for classification of construction works. *ITcon*, 1, 1-25.
El-Baroudy I. & Simonovic S. P. (2006). Application of the fuzzy performance measures to the City of London water supply system. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 255-265.
El-Diraby T. E. & Kashif K. F. (2005). Distributed ontolgy architecture for knowledge management in Highway construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131, 591-603.
El-Shayeb Y. & Verdel T. (1998). Overcoming uncertainties in geotechnical risk analysis : the discrete, simulation, and fuzzy logic approaches. In *Proceedings of Computer simulation in risk analysis and hazard mitigation (Risk Analysis 98)*, Valencia, Spain.
Ermine J. L. (2001). Capitaliser et partager les connaissances avec la méthode MASK. In *Ingénierie et capitalisation des connaissances*. Hermes Science Europe Ltd, 67-105.
Essa R., Diab Y. & Morand D. (2006). L'application de la théorie des possibilités dans l'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments. In *Proceedings of XXIVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*, La Grande Motte, France.
Euzenat J. (2001). Construction collaborative de bases de connaissances et de documents pour la capitalisation. In *Ingénierie et capitalisation des connaissances*. Hermes Science Europe Ltd, 25-48.

F

Fell R. (1996). Estimating the probability of failure of embankment dams under normal operating conditions. In *Repair and upgrading of dams*. 567-576.
Figeac N. (2003). Ecriture des scénarios de vieillissement des barrages en remblai à partir d'une méthodologie basée sur la modélisation fonctionnelle et de l'analyse d'expertise. CUST-Université Blaise Pascal-Clermont II.
Flintsch G. W. & Chen C. (2004). Soft computing applications in infrastructure management. *Journal of Infrastructure Systems*, 10, 157-166.
Foo H. C. & Akhras G. (1995). Prototype knowledge-based system for corrective maintenance of pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 121, 517-523.
Foster M. & Fell R. (2000). Use of event trees to estimate the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping. In *Proceedings of 20th Congress on Large Dams*, Beijing, China.
Foster M., Fell R. & Spannagle M. (2000a). A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 1025-1061.
Foster M., Fell R. & Spannagle M. (2000b). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 1000-1024.
Fry J. J. (2007). Context and framework of the report of the European working group on internal erosion. *Wasserbau und Wasserwirtschaft*, 1-12.

Furuta H. & Hirokane M. (1998). Rough-set-based knowledge acquisition from cases or integrity assessment of bridge structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13, 265-273.

G - H

Gattulli V. & Chiaramonte L. (2005). Condition assessment by visual inspection for a bridge management system. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20, 95-107.
Gomez-Pérez A. (1999). Développements récents en matière de conception, de maintenance et d'utilisation des ontologies. In *Proceedings of Colloques Terminologie et Intelligence Artificielle*, Nantes, France.
Groupe de travail "Barrages poids" (2005). Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids, propositions de recommandations. Comité Français des Barrages et Réservoirs.
Grundstein M. & Barthès J. P. A. (1996). An industrial view of the process of capitalizing knowledge. In *Proceedings of ISMICK 4*, RotterdamErlong Verlag.
Guarino N. (1997). Understanding, building, and using ontologies. *International Journal of Human-Computers Studies*, 46, 293-310.
Hahn M., Palmer R. N. & Merrill P. E. (1999). Prioritizing sewer line inspection with an expert system. In *Proceedings of 29th Annual Water Resources, Planning and Management Conference*, Tempe, USA.
Hahn M., Palmer R. N., Merrill P. E. & Lukas A. (2002). Expert system for priorizing the inspection of sewers knowledge base formulation and evaluation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121-129.
Hawk H. (1999). BRIDGIT: User-friendly approach to bridge management. In *Proceedings of 8th International Bridge Management Conference*, Denver, Colorado, USA.
Headquarters Department of the Army (1982). Pavement Maintenance Management. Headquarters Department of the Army.
Herabat P. & Songchitruksa P. (2003). A decision support system for flexible pavement treatment selection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18, 147-160.
Hossenlopp J. (1995). L'évaluation sensorielle appliquée aux produits laitiers. CIDIL. 127 pages.
Hydro-Québec (2005). Guide d'implantation des indices de condition - Barrages en remblai (document interne).

I - J - K

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. In *Proceedings of XXVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Bordeaux, France.
IREX (2003). Revue bibliographique sur l'érosion interne. Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil.
Jones D., Bench-Capon T. & Visser P. (2002). Methodologies for ontology development. Midterm Rapid Knowledge Formation evaluation project.
Kaetzel L. J., Clifton J. R. & Snyder K. (1994). Users Guide to the Highways Concrete (HWYCON) Expert System. Strategic Highway research Program, National Council, Washington, DC.
Karnib A., Al-Hajjar J. & Boissier D. (2002). An expert system to evaluate the sensitivity of urban areas to the functioning failure of storm drainage networks. *Urban Water*, 4, 43-51.
Kreuzer H. (2000). The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. In *Proceedings of 20th International Congress on Large Dams*, Beijing, China.
Kushida M., Miyamoto A. & Kinoshita K. (1997). Development of concrete bridge rating prototype expert system with machine learning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 11, 238-247.

L - M

Lair J. (2000). Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment. Spécialité génie civil. Université Blaise Pascal Clermont II.
Le Goc M. (2004). SACHEM, a real time intelligent diagnosis system based on the discrete event paradigm. *Simulation*, 80, 591-617.

Ludescher H. & Hajdin R. (1999). Distinctive features of the Swiss road structures management structure. In *Proceedings of 8th International Bridge Management Conference* Denver, Colorado, USA.
Makar J. M. (1999). Diagnostic techniques for sewer systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 69-78.
Masse E., Curt C. & Le Goc M. (2007). Développement d'une méthode pour la maîtrise de la sécurité des barrages - Méthode basée sur le diagnostic multi modèles appliqué à un barrage en remblai. In *Proceedings of XXVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Bordeaux, France.
Mauris G., Benoit E. & Foulloy L. (1994). Fuzzy symbolic sensors - from concept to applications. *Measurement*, 12, 357-384.
McKay D. T., Rens K. L., Reinmann L. F. & Stecker J. H. (1999). Condition Index assessement for U.S. Army Corps of Engineers civil works. *Journal of Infrastructure Systems*, 5, 52-60.
Miyamoto A., Kawamura K. & Nakamura H. (2001). Development of a bridge management system for existing bridges. *Advances in Engineering Software*, 32, 821-833.
Moodi F. & Knapton J. (2003). Research into a management system for diagnosis, maintenance, and repair of concrete structures. *Journal of Construction Engineering and Management*, 555-561.
Moselhi O. & Shehab-Eldeen T. (2000). Classification of defects in sewer pipes using neural networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 97-104.
Moura P., Barraud S. & Baptista M. (2006). Procédure multicritère pour la conception et le suivi des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales. In *Proceedings of XXIVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*, La Grande Motte, France.
Murlidharan T. L., Balaji Rao K., Durgaprasad J. & Appa Rao T. V. S. R. (1999). Handling uncertainties in knowledge modeling and acquisition for the developement of a knowledge-based system. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 14, 141-154.

N - O - P

Najjaran H., Sadiq R. & Rajani B. (2006). Fuzzy expert system to assess corrosion of cast/ductile pipes from backfill properties. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21, 67-77.
Noy N. F. & McGuinness D. L. (2001). Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology Université de Stanford.
Obaidat M. T., Al-Suleiman T. I. & Ghuzlan K. A. (1998). A stereomatric knowledge-based system for maintenance of street networks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25, 220-231.
Oussalah M. (2002). On the compatibility between defuzzification and fuzzy arithmetic operations. *Fuzzy Sets and Systems*, 128, 247-260.
Peyras L. (2003). Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages - Développement de méthodes d'aide à l'expertise. Spécialité Génie civil. Université Blaise Pascal - Clermont II.
Peyras L., Royet P. & Boissier D. (2006). Dam ageing diagnosis and risk analysis: Development of methods to support expert judgement. *Canadian Geotechnical Journal*, 43, 169-186.
Pierra G. (2002). Un modèle formel d'ontologie pour l'ingénierie, le commerce électronique et le Web sémantique : le modèle de dictionnaire sémantique PLIB. In *Proceedings of Journées scientifiques WEB SEMANTIQUE*, Paris, France.
Pomian J. (1996). Mémoire d'entreprise - techniques et outils de la gestion du savoir. Les Editions Sapientia. 233 pages pages.
Poupard M. & Royet P. (2001). La surveillance des barrages. In *Proceedings of CFGB Colloque Technique*, Aix-en-Provence, France.

R - S

Revelli R. & Ridolfi L. (2002). Fuzzy approach for analysis of pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 93-101.
Royet P. (1994). La surveillance et l'entretien des petits barrages - guide pratique. Cemagref Editions 87 pages.
Sasmal S., Ramanjaneyulu K., Gopalakrishnan S. & Lakshmanan N. (2006). Fuzzy logic based condition rating of existing reinforced concrete bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20, 261-273.

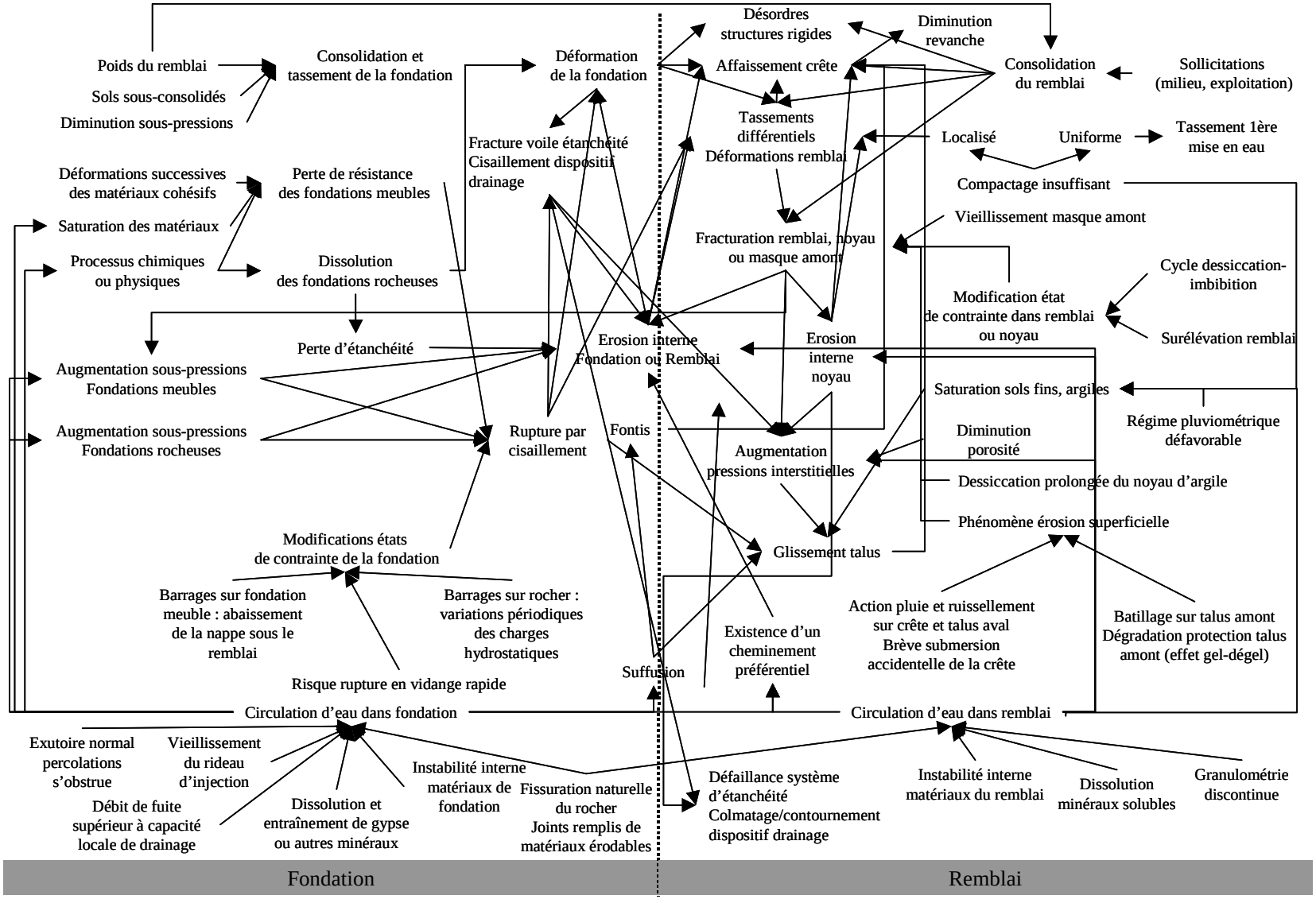
Semaan I., Boissier D. & Boulemia C. (1999). Possibilistic modelling of data in a soil campaign. In *Proceedings of 8th ICASP*, Sydney, Australie.
Serre D. (2005). Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations - Modélisation de critères de décision dans un système d'information géographique. Spécialité Sciences de l'Information Géographique. Marne-la-Vallée.
Serre D., Curt C., Peyras L., Boissier D. & Diab Y. (2005). Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques de génie civil. In *Proceedings of XXIII èmes Rencontres AUGC*, Grenoble, France.
Serre D., Peyras L., Tourment R. & Diab Y. (2006). Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. *Revue Française de Géotechnique*, 115, 57-70.
Shafer G. (1976). A mathematical theory of evidence. Chichester, Princeton University Press. 297 pages.
Shah A., Tighe S. & Stewart A. (2004). Development of a unique deterioration index, prioritization methodology and foreign object damage evaluation models for canadian airfield pavement management. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31, 608-618.
Shahin M. Y. & Kohn S. D. (1979). Developement of a pavement condition rating procedure for roads, streets, and parking lots. U.S. Army - Construction Engineering Research Laboratory.
Simek M. (1997). Bila Desna dam failure 80th anniversary. In *Proceedings of 19th Congress on Large Dams*, Florance, Italy.
Sinha S. K. & Knight M. A. (2004). Intelligent system for condition monitoring of underground pipelines. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19, 42-53.
St-Arnaud G. (1995). The high pore pressures within embankment dams: an unsaturated soil approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 32, 892-898.
Stevens R., Gonle C. A. & Bechhofer S. (2002). Ontology-based knowledge representation for bioinformatics Midterm Rapid Knowledge Formation (RKF) evaluation project.
Studer R., Benjamins V. R. & Fensel D. (1998). Knowledge engineering: principles and methods. *Data and Knowledge Engineering*, 25, 161-197.

T - V - W - Z

Talon A. (2006). Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction. Spécialité Génie civil. Université Blaise Pascal - Clermont II.
Tesfamariam S., Rajani B. & Sadiq R. (2006). Possibilistic approach for consideration of uncertainties to estimate structural capacity of ageing cast iron water mains. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33, 1050-1064.
Tratapel G. (2004). Etat du patrimoine des digues du Rhône. In *Proceedings of Sécurité des digues fluviales et de navigation*, Orléans, France.
Villemeur A. (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Editions Eyrolles. 798 pages.
Wagner W. P., Najdawi M. K. & Chung Q. B. (2001). Selection of knowledge acquisition techniques based upon the problem domain characteristics of production and operations management expert systems. *Expert Systems*, 18, 76-87.
Wang K. & Liu F. (1997). Fuzzy set-based and performance-oriented pavement network optimization system. *Journal of Infrastructure Systems*, 3, 154-159.
Wirahadikusumah R., Abraham D. & Iseley T. (2001). Challenging issues in modeling deterioration of combined sewers. *Journal of Infrastructure Systems*, 7, 77-84.
Zadeh L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353.
Zadeh L. (1975). The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 8, 199-249.
Zadeh L. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 3-28.
Zanni C., Le Goc M. & Frydman C. (2006). A conceptual framework for the analysis, classification and choice of knowledge-based diagnosis systems. *International Journal of Knowledge-Based & Intelligent Engineering Systems (KES Journal)*, 10, 113-138.
Zhao Z. & Chen C. (2001). Concrete bridge deterioration diagnosis using fuzzy inference system. *Advances in Engineering Software*, 32, 317-325.
Zwingelstein G. (1995). Diagnostic des défaillances - Théorie et pratique pour les systèmes industriels. Hermès. 601 pages.

Annexes

Annexe 1 – Phénomènes de vieillissement



FigureA1-1 : Phénomènes pouvant se dérouler durant le vieillissement d'un barrage en remblai

Annexe 2 – Catégories d'informations utilisées dans des systèmes d'évaluation et de contrôle d'ouvrages de génie civil

Ouvrages	Auteurs	Type de publications S : scientifique T : Technique	Mesures visuelles	Mesures instrumentales	Caractéristiques de l'ouvrage / Données issues de modèles
Ponts	(Chiang et al., 2000)	S	X		
	(Zhao et Chen, 2001)	S	X		
	(Miyamoto et al., 2001)	S	X		X
	(Kushida et al., 1997)	S	X		
	(Gattulli et Chiaramonte, 2005)	S	X	X	X
	(De Brito et al., 1997)	S			
	(Furuta et Hirokane, 1998)	S	X		
	(Cattan et Mohammadi, 1997)	S			X
Chaussées	(Foo et Akhras, 1995)	S	X	X	
	(Wang et Liu, 1997)	S	X	X	
	(Obaidat et al., 1998)	S		X	
	(Herabat et Songchitruksa, 2003)	S	X	X	
	(Bandara et Gunaratne, 2001)	S	X		
	(Algusair et Al-Qudrah, 1998)	S	X		
	(Shah et al., 2004)	S	X	X	
	(Ludescher et Hajdin, 1999)	S	X		
	(Shahin et Kohn, 1979) (Headquarters Department of the Army, 1982)	T	X		
Réseaux assainissement	(Moselhi et Shehab-Eldeen, 2000)	S		X	
	(Makar, 1999)	S		X	
	(Wirahadikusumah et al., 2001)	S	X		X
	(Sinha et Knight, 2004)	S			
	(Ibrahim *et al.*, 2007)	S	X		
Ouvrages hydrauliques	(Andersen et al., 2001)	S	X	X	
	(Serre et al., 2005)	S	X		X
	(Hydro-Québec, 2005)	T	X	X	X
Béton	(Moodi et Knapton, 2003)	S			
Béton (revêtement routier – ouvrages hydrauliques)	(Kaetzel et al., 1994)	T	X		
	(Bullock et Foltz, 1995)	T	X		

Tableau A2-1 : Catégories d'informations utilisées pour les systèmes d'évaluation, de diagnostic et de contrôle des ouvrages de génie civil

Annexe 3 – Exemple de dossier de validation

Barrage V1-BAR1

1. Description de l'ouvrage

Le barrage V1-BAR1 est un petit ouvrage dont la première mise en eau date de 1979. Il est fondé sur des matériaux alluvionnaires. Il est constitué d'un remblai de 8 mètres de hauteur étanché par un masque amont réalisé par géomembrane confinée. Les fruits amont et aval sont respectivement de 2,5 et 2. Le volume retenu est de 350 000 m3.

Le remblai a été réalisé avec des matériaux plutôt hétérogènes, constitués de limons argileux et de graves argileuses, issus des alluvions et colluvions superficielles du fond de la vallée au droit du site.

L'étanchéité amont du remblai est obtenue par membrane Colétanche, confinée sous une couche de 2 m de graves type tout-venant et rip-rap en enrochements jusqu'à la cote RN.

Le talus au-dessus du Rip-Rap est enherbé.

Le dispositif de drainage est constitué :

- drain sous la membrane (matériaux 8-20)
- drain tapis sous l'ensemble du remblai (matériaux 15-25)
- butée de pied drainante (matériaux 20-60).

Il n'y a pas de dispositif de collecte.

La conduite de vidange est de diamètre 1200 mm (en béton armé). Elle a été enrobée dans un massif de béton coffré et de section carrée. Le compactage du remblai a été fait manuellement à proximité du massif de béton. Les planches photos du chantier confirment ces éléments.

2. Inspection visuelle

L'inspection s'est déroulée à l'automne 2004 ; la retenue était vide.

2.1 Parement amont

La partie habituellement immergée du parement amont est en bon état, sans déformation, ni singularité ou défaut visible à l'inspection visuelle.

Le Rip Rap est formé de petits enrochements, qui se sont déplacés vers le bas par rapport à leur position originelle, sous l'effet du batillage. Cette couche de Rip Rap est maintenant fortement dégradée. Nous remarquons ainsi une marche d'érosion externe dans la zone de marnage (autour de la cote RN). Cette marche est assez importante et atteint quelques décimètres.

Dans la zone enherbée au-desssus de la cote RN, nous observons des arbustes et arbres de taille moyenne à grande, et ce quasiment jusqu'à la crête.

2.2 Crête

Le couronnement du barrage est en bon état. Il ne présente pas de déformations particulières et la végétation (herbe basse) est bien entretenue.

2.3 Parement aval

Le parement aval est mal entretenu et est le siège, sur une grande partie de sa surface, de végétations importantes : herbes hautes, broussailles, arbustes et arbres. Cette végétation empêche une inspection détaillée du parement aval.

En pied de parement aval, la butée de pied drainante apparaît à de nombreux endroits (au centre de l'ouvrage et en rive droite) complètement recouverte de terre et/ou de végétation dense, empêchant toute inspection visuelle et obstruant l'exutoire du tapis drainant. Par ailleurs, il semblerait que des matériaux aient été déposés sur certains secteurs de la rive droite.

On observe en aval du pied de la butée drainante plusieurs anomalies :

- une zone humide de plusieurs m², placée au centre de l'ouvrage et qui donnerait, d'après les informations recueillies sur place, un écoulement permanent lorsque la retenue est pleine ;
- plusieurs petites dépressions en rive droite, semblant correspondre à des petits fontis. Ces singularités sont saturées en eau.

2.4 Dispositif de drainage

On observe que le dispositif de drainage est actuellement obstrué par des dépôts de terre et que de petits fontis se sont formés en pied du parement aval.

3. Résultats de l'auscultation

Le barrage n'est équipé d'aucun dispositif d'auscultation

4. Dossier Photo



Etat Rip Rap amont



Présence de zones humides sur le talus aval



Présence de zones humides sur le talus aval



Présence de végétation sur le parement aval

Annexe 4 – Etapes de la construction de la base de connaissances

La construction de la base de connaissances comporte quatre étapes principales détaillées dans les paragraphes suivants.

1. Structuration des connaissances

Afin de structurer les connaissances, nous avons exploré deux types d'approches : d'une part, le concept d'ontologie et d'autre part, les bases de données relationnelles.

En informatique, **le concept d'ontologie**[16] est défini par Pierra (Pierra, 2002) par « une collection de descriptions explicites, complètes et consensuelles de l'ensemble des concepts d'un domaine ». Le terme « consensuel » est un qualificatif très important : la base doit exprimer le consensus d'une communauté. Cette dernière est dans un premier temps constituée par le groupe d'experts de l'équipe Secure du Cemagref d'Aix-en-Provence mais pourrait être étendue à d'autres groupes d'utilisateurs. Le consensus devra alors être obtenu pour cette nouvelle communauté. En outre, la base doit être cohérente et bien sûr intelligible par ses utilisateurs (Euzenat, 2001).

Une ontologie fournit le vocabulaire commun d'un domaine et définit de façon plus ou moins formelle, le sens des termes et les relations entre ces derniers (Gomez-Pérez, 1999). Les connaissances sont formalisées en mettant en jeu les principaux composants suivants (Noy et McGuinness, 2001 ; Stevens *et al.*, 2002 ; Charlet *et al.*, 2004) :

- les classes ou concepts : par exemple, nous pouvons définir le concept « individu », « emploi », « lien familial », « type d'habitation »… Ces concepts définissent les champs (colonnes) de la base de connaissances ;
- les relations entre les classes : les classes sont habituellement organisées en taxonomies par la relation « is-a » ; les autres relations unissent les concepts ensemble pour construire des représentations conceptuelles complexes qui vont être autant de connaissances nécessaires au système à base de connaissances que l'on construit. Par exemple, les concepts « père » et « soeur » sont liés au concept « lien familial » par une relation « is-a ». Le concept « individu » est lié au concept « emploi » par la relation « travaille en tant que » ;
- les axiomes : ce sont des règles d'inférence qui établissent des liens entre les relations du type « SI Y est frère de X et X est père de Z ALORS Y est oncle de Z » pour le concept « lien familial ».

Il faut noter que l'ontologie est une représentation choisie par son concepteur. Elle est construite pour une tâche précise (Charlet et al., 2004) et à une granularité donnée (Guarino, 1997). Cela peut rendre difficile sa réutilisation : un moyen de palier ce problème est de tendre vers une présentation sous forme de modules que l'on pourra réutiliser.

On retrouve globalement ces trois étapes clés dans la construction des **bases de données relationnelles.** Conçues en 1970, elles visent :

[16] L'Ontologie est une notion philosophique qui signifie Science ou théorie de l'être, c'est-à-dire l'étude des propriétés générales de ce qui existe. Ce concept renvoie à la « théorie de l'existence » qui est la théorie qui tente d'expliquer les concepts qui existent dans le monde et comment ces concepts s'imbriquent et s'organisent. L'ontologie définie en informatique reprend les notions de concepts et de leur organisation. Pour distinguer cette notion de la notion d'ontologie en sciences cognitives, la convention suivante est prise : la notation Ontologie (O majuscule) renvoie à la notion philosophique tandis que la notation ontologie renvoie à l'ingénierie des connaissances.

- à organiser les données dans des tables. Chaque table possède un certain nombre d'attributs (colonnes) qui sont des champs de la base de connaissances et qui définissent une information élémentaire ;
- puis à établir des relations entre les tables :

  ⇒ par des relations « 1-1 » c'est-à-dire univoque, comme par exemple « Nom-Prénom ». En général, on place dans la même table des données qui sont en relation « 1-1 » entre elles ;

  ⇒ par des relations « 1-n » soit « un à plusieurs » : une entreprise peut avoir par exemple plusieurs clients. En général, lorsqu'on rencontre une relation « 1-n », on génère une nouvelle table et on crée une relation entre les tables « Clients » et « Entreprises » ;

  ⇒ par des relations « n-n » c'est-à-dire des relations « plusieurs-plusieurs » (des clients se fournissent auprès de plusieurs entreprises). Des tables de jonction sont alors établies pour scinder les relations « n-n » en relations « 1-n ».

Dans ces deux approches, nous retrouvons donc l'importance d'une structuration de la base et de l'instauration de relations entre ses champs. L'ontologie va nous permettre de définir des relations d'ordre sémantique entre les champs tandis que la méthodologie des bases de données relationnelles va nous être utile dans le cadre de l'implémentation de la base de connaissances sous la forme d'un outil informatique.

2. Instanciation des champs

Une fois la structuration réalisée, les différents champs définis par l'étape de structuration doivent être renseignés par des instances afin de générer la base de connaissances proprement dite. En fonction des auteurs, la séparation entre ontologie et base de connaissances n'est pas toujours nette. Pour certains d'entre eux, l'ontologie renvoie uniquement aux concepts et aux relations qui les unissent tandis que pour d'autres, l'ontologie est constituée des concepts, des relations et des instances. Nous nous avons pris le parti de présenter séparément la structuration de l'instanciation des champs.

Dans notre exemple précédent, les instances sont par exemple, « Thomas », « Emilie », « Ugo » pour le concept « individu ».

En fonction des champs, nous pouvons avoir des descriptions littérales, des figures, des données numériques, des photographies. Le format sera adapté au champ considéré.

3. Validation de la base de connaissances

La validation de la base de connaissances doit porter d'une part, sur l'adéquation des concepts et des instances aux besoins attendus par l'utilisateur et d'autre part, sur le contenu des instances.

4. Implémentation

La structuration de la base en vue de son implémentation est présentée sur la Figure A4-1. Afin d'établir des relations « 1-n », trois tables sont définies : la table des fonctions, la table des composants et la table des phénomènes. Le but est de séparer les informations de manière à éviter les doublons et les redondances et d'empêcher la perte de qualité d'informations : par exemple, le nom d'un phénomène est modifié sur une seule ligne de la table « Phénomènes de dégradation » et non sur un ensemble de lignes dans le cas où les informations n'auraient pas été réparties dans plusieurs tables.

La table « Fonctions » comporte deux champs, la table « Composants », trois et la table « Phénomènes de dégradation », huit.

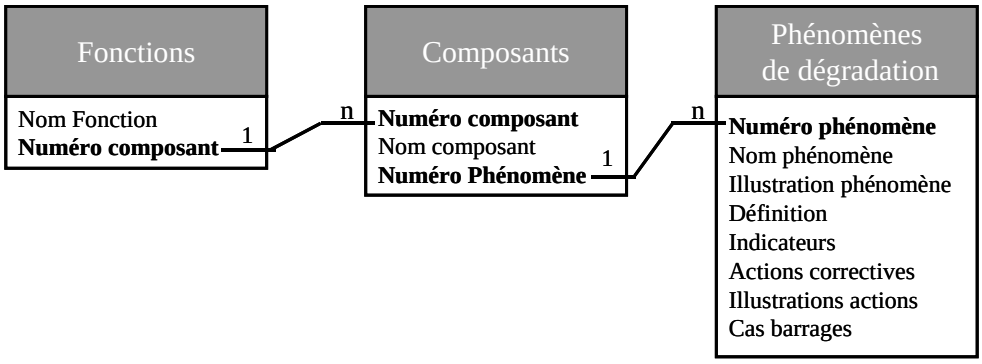


Figure A4-1 : Organisation de la base pour son implémentation

Annexe 5 - Notation des barrages par les experts lors de la validation interne et tableaux de résultats associés

Barrages	Experts	Performance Fonction Protection Etanchéité	Performance Fonction Etanchéité	Performance Fonction Drainage	Performance Fonction Autofiltration	Performance vis-à-vis de l'Erosion Interne
1	1	6	0	8	7	6
	2	6	7	8	7	8
	3	6	0	8	3	3
	4	6	0	8	8	6,5
	5	7	0	7	5,5	7
2	1	4	10	7	7	7
	2	3	6	8	8	8
	3	3	7	7	9	7
	4	7	7	7	0	6
	5	8	10	6	9	9
3	1	7	10	8	7	8
	2	7	9	9	8	9
	3	3	7	8	9	8
	4	7	8	10	8	8
	5	10	10	10	10	10
4	1	4	7	1	0	0
	2	4	5	2	0	2
	3	3	5	2	0	2
	4	3	5	1	0	2
	5	3	10	0	0	5
5	1	3	3	2	0	0
	2	3	2	2	0	1
	3	3	5	0	0	2
	4	4	3	0	0	2
	5	3	5	0	0	3
6	1	8	6	7	3	6
	2	10	0	10	8	9
	3	7	7	3	3	6
	4	7	0	8	3	7
	5	7	7	7	0	7
7	1	4	6	1	1	1
	2	7	7	2	4	3
	3	7	6	3	3	3
	4	8	6	3	3	7
	5	10	10	5	7	5
8	1	7	8	4	0	4
	2	7	8	0	0	8
	3	7	7	0	0	7
	4	7	9	8	3	7
	5	7	7	0	0	10

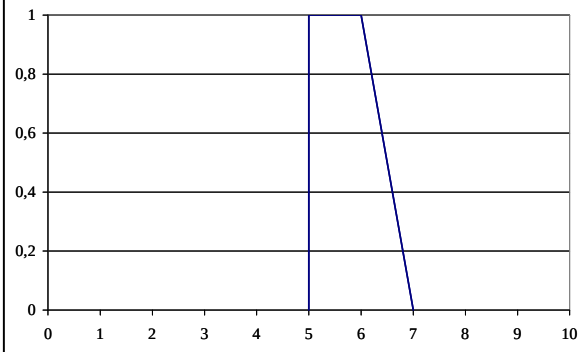
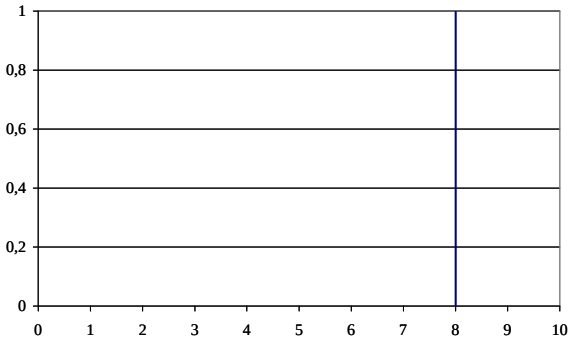
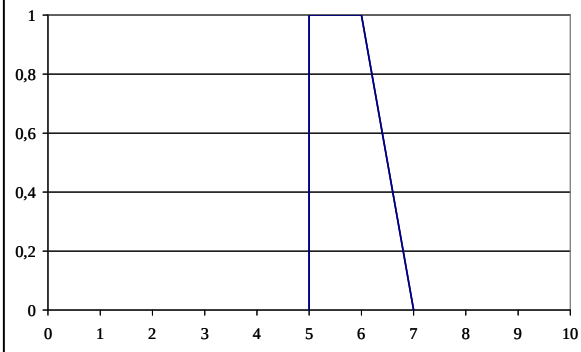
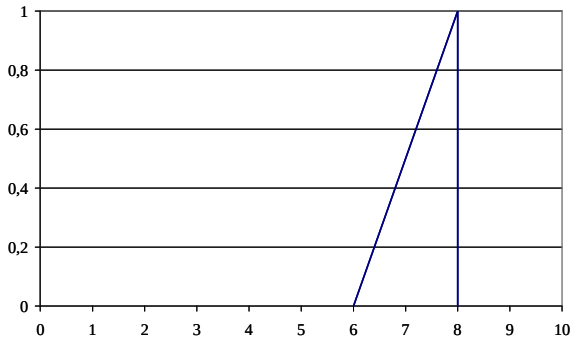
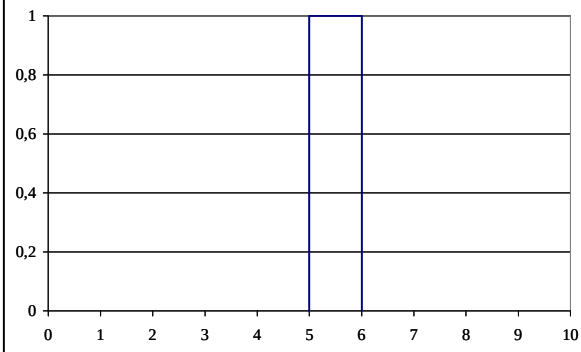
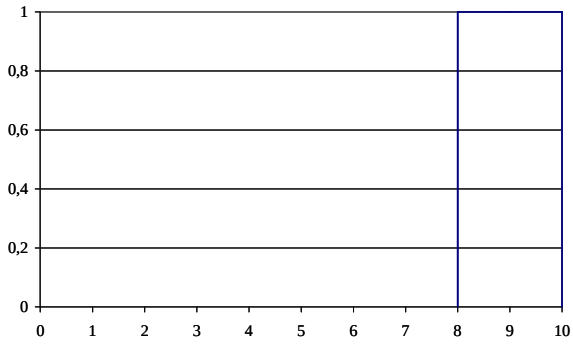
Tableau A5-1 : Tableau des notations faites par les experts sur huit dossiers simplifiés de barrage

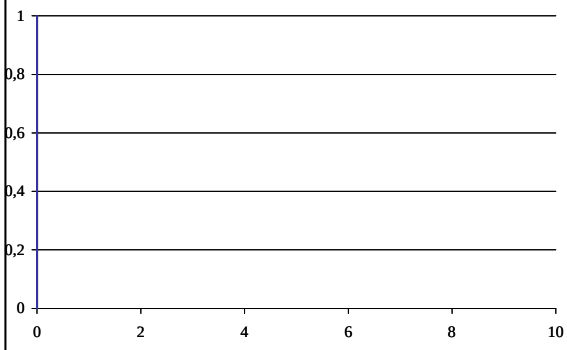
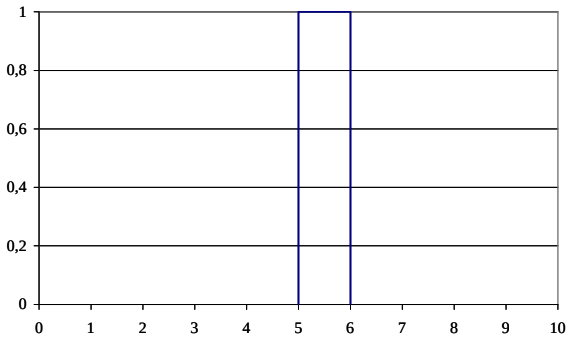
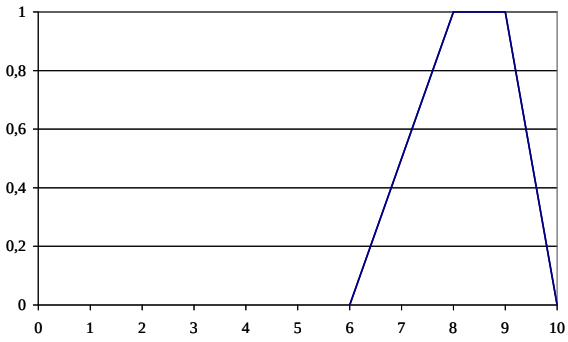
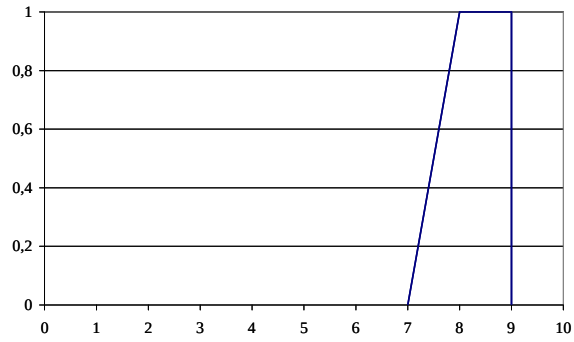
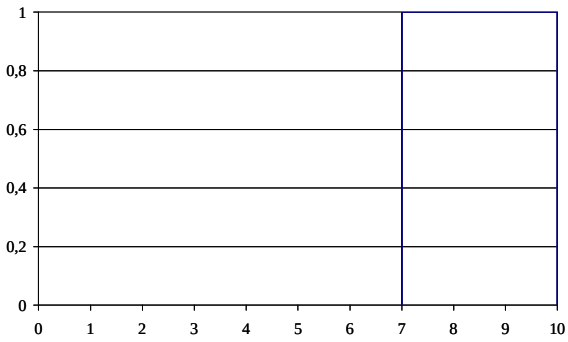
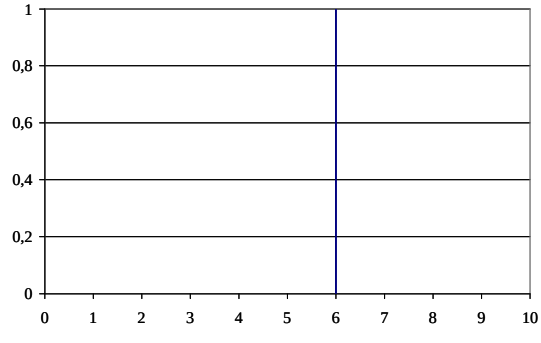
Barrages	Comparaison	p (t-Test)
1	E1-E2	0,26
1	E1-E3	0,18
1	E1-E4	0,21
1	E1-E5	0,85
1	E2-E3	0,08
1	E2-E4	0,36
1	E2-E5	0,23
1	E3-E4	0,19
1	E3-E5	0,22
1	E4-E5	0,55
2	E1-E2	0,70
2	E1-E3	0,65
2	E1-E4	0,39
2	E1-E5	0,18
2	E2-E3	1,00
2	E2-E4	0,58
2	E2-E5	0,22
2	E3-E4	0,60
2	E3-E5	0,17
2	E4-E5	0,15
3	E1-E2	0,37
3	E1-E3	0,41
3	E1-E4	0,78
3	E1-E5	0,02
3	E2-E3	0,16
3	E2-E4	0,62
3	E2-E5	0,01
3	E3-E4	0,24
3	E3-E5	0,05
3	E4-E5	0,02
4	E1-E2	0,78
4	E1-E3	1,00
4	E1-E4	0,78
4	E1-E5	0,37
4	E2-E3	0,37
4	E2-E4	0,18
4	E2-E5	0,49
4	E3-E4	0,37
4	E3-E5	0,39
4	E4-E5	0,28

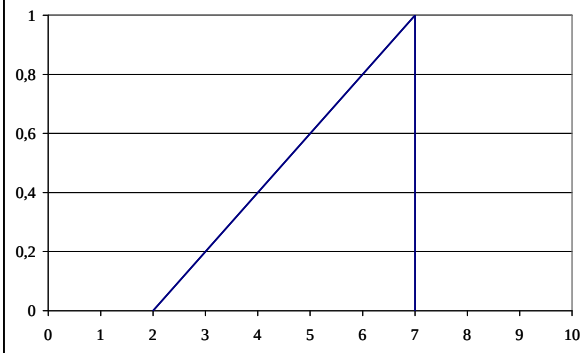
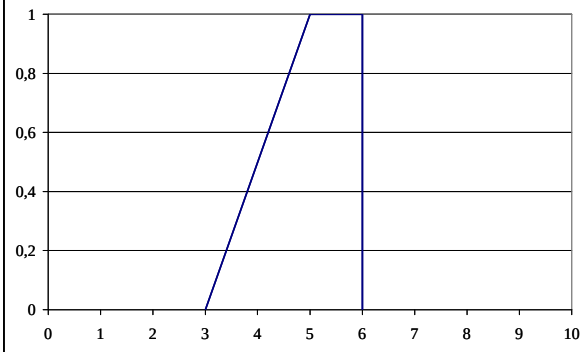
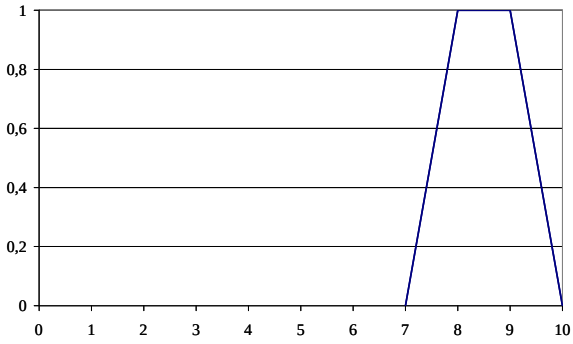
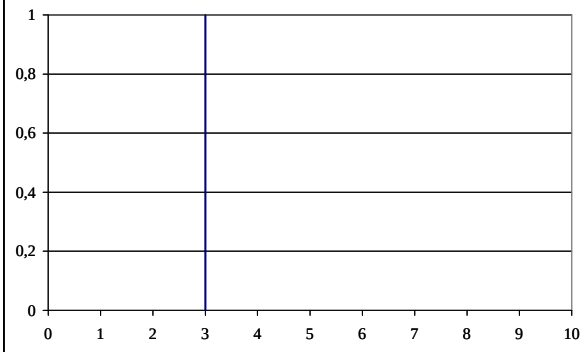
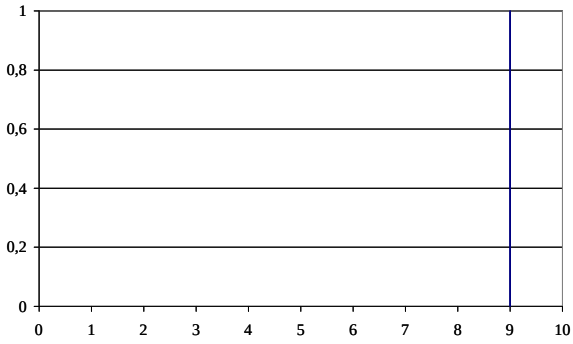
Barrages	Comparaison	p (p-Test)
5	E1-E2	1,00
5	E1-E3	0,62
5	E1-E4	0,78
5	E1-E5	1,00
5	E2-E3	0,65
5	E2-E4	0,75
5	E2-E5	0,82
5	E3-E4	0,70
5	E3-E5	
5	E4-E5	0,72
6	E1-E2	0,50
6	E1-E3	0,41
6	E1-E4	0,49
6	E1-E5	0,62
6	E2-E3	0,41
6	E2-E4	0,04
6	E2-E5	0,50
6	E3-E4	0,92
6	E3-E5	0,74
6	E4-E5	0,74
7	E1-E2	0,01
7	E1-E3	0,02
7	E1-E4	0,05
7	E1-E5	0,00
7	E2-E3	0,62
7	E2-E4	0,43
7	E2-E5	0,00
7	E3-E4	0,27
7	E3-E5	0,00
7	E4-E5	0,15
8	E1-E2	1,00
8	E1-E3	0,74
8	E1-E4	0,05
8	E1-E5	0,81
8	E2-E3	0,18
8	E2-E4	0,24
8	E2-E5	0,37
8	E3-E4	0,15
8	E3-E5	0,24
8	E4-E5	0,38

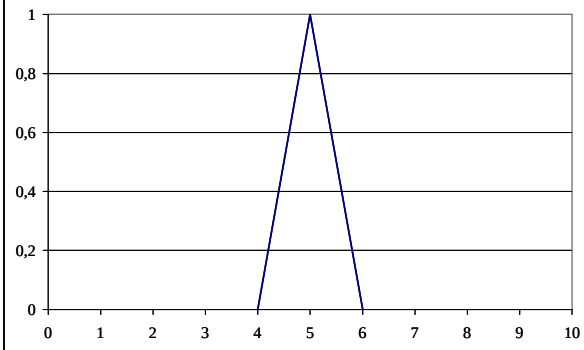
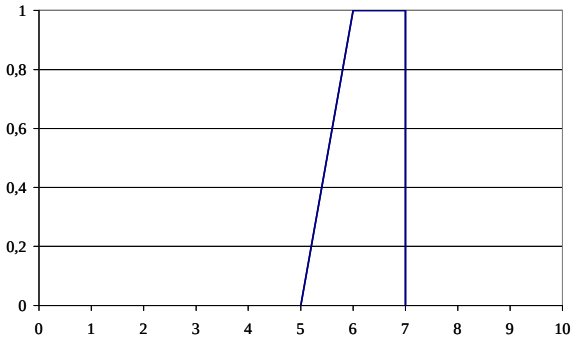
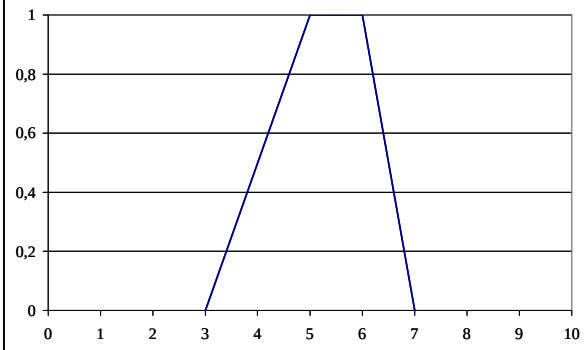
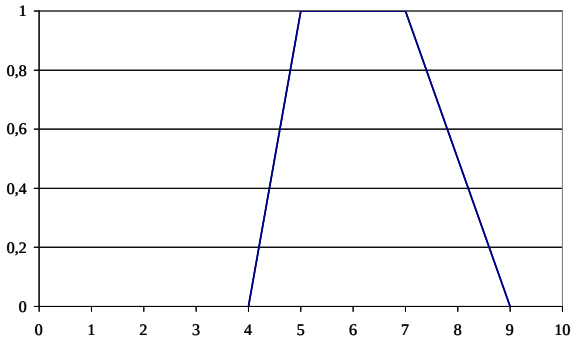
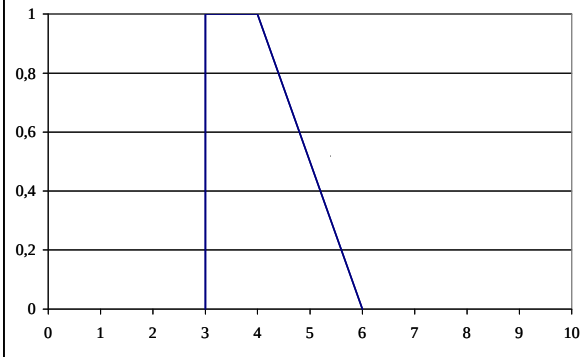
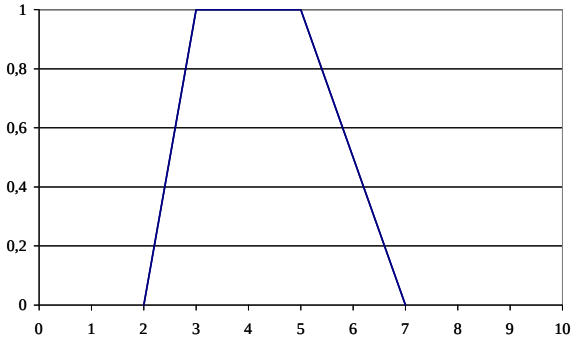
Tableau A5-2 : Tableau de données pour la comparaison d'échantillons appariés – Risque α = 5 % - Les cases en gris indiquent des différences significatives

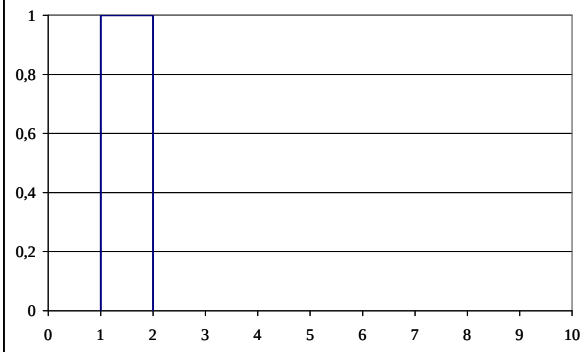
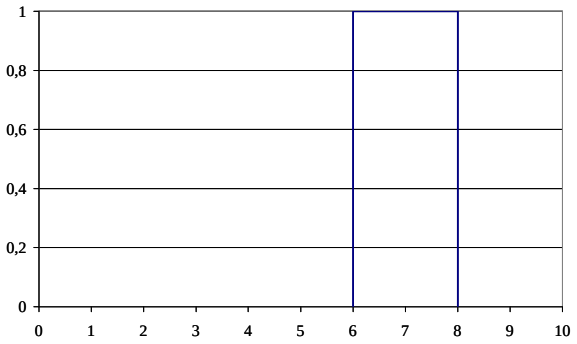
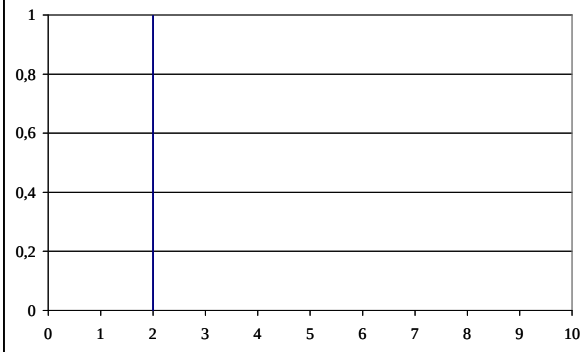
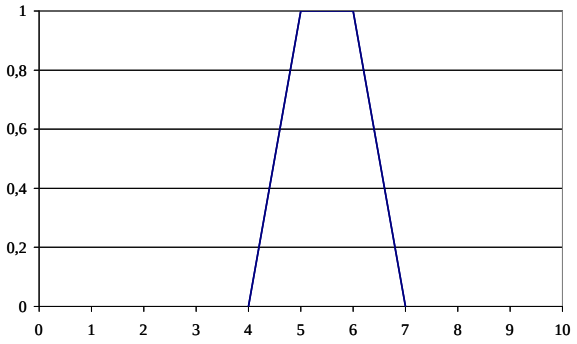
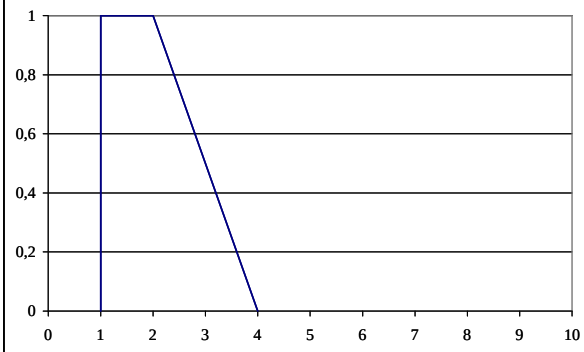
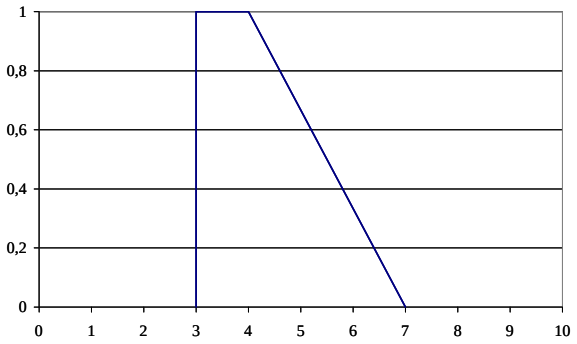
Annexe 6 – Distributions de possibilité données les experts E1, E2 et E3

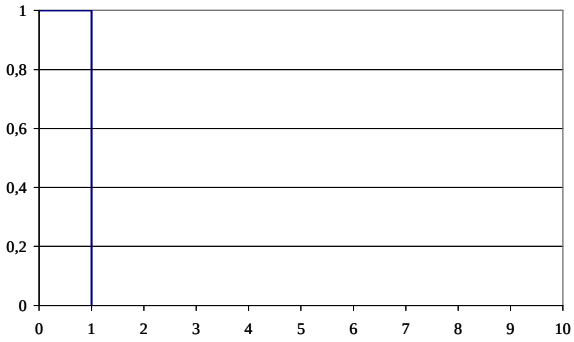
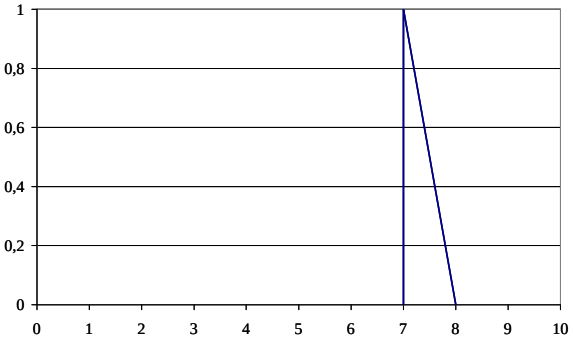
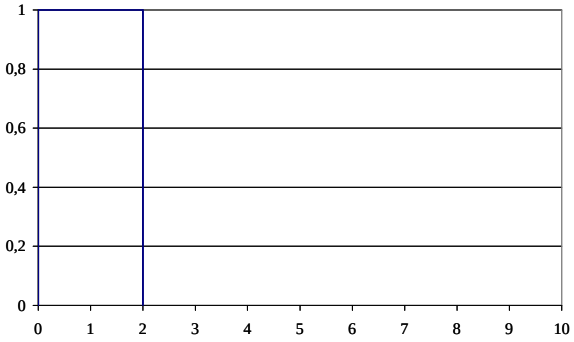
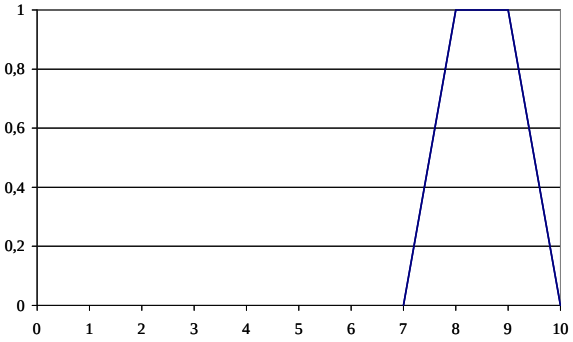
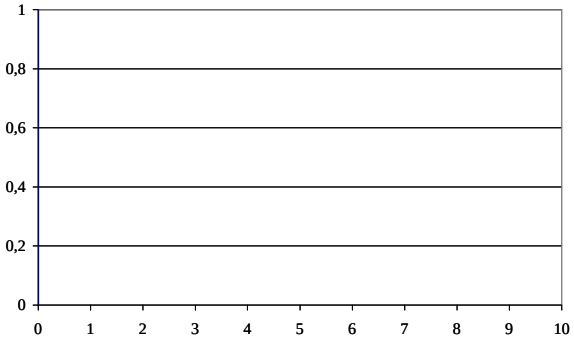
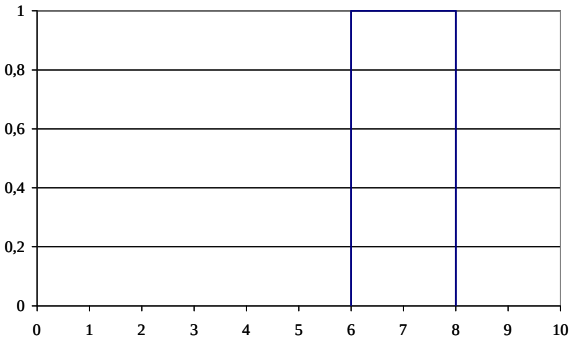
	Etat des enrochements	Etat visuel exutoire drain
E1		
E2		
E3		

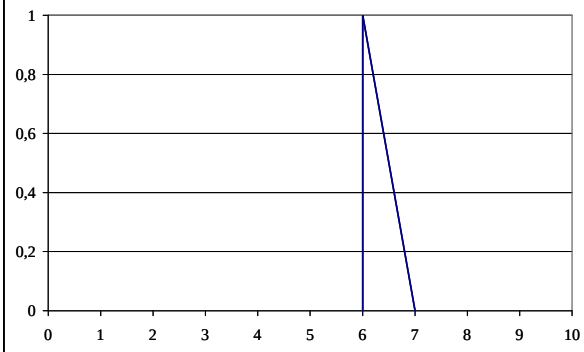
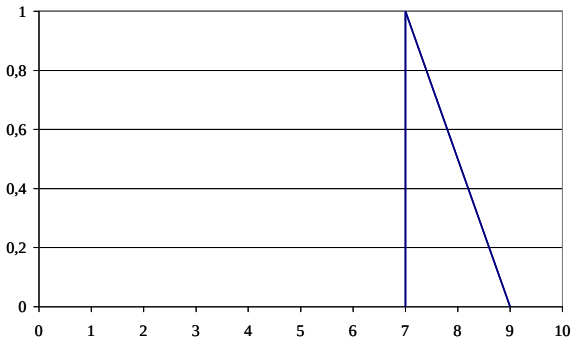
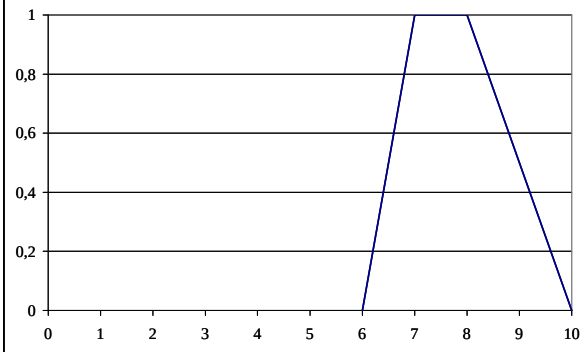
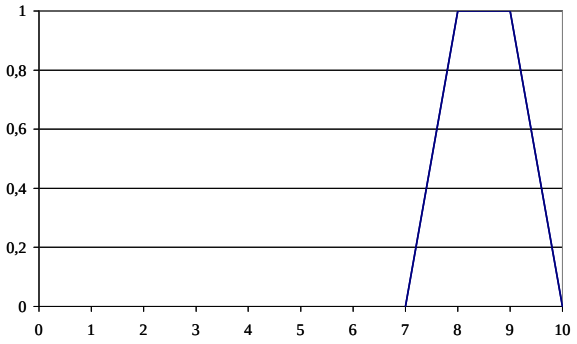
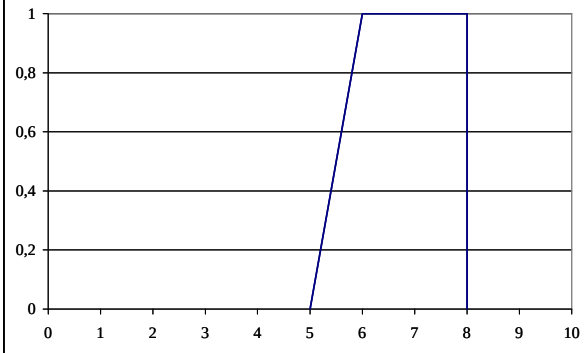
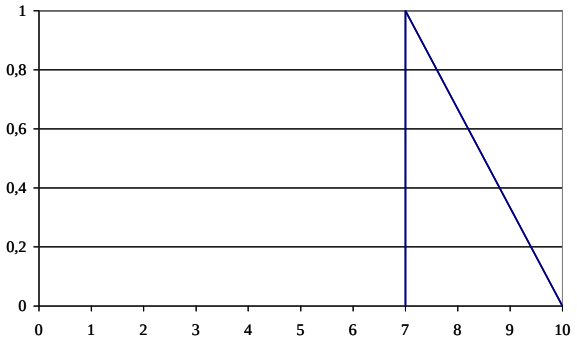
	Fuite d'eau Remblai aval	Présence végétation pied aval
E1		
E2		
E3		

	Végétation Remblai aval	Végétation remblai aval
E1		
E2		
E3		

	Qualité du béton	Fente due au fluage
E1		
E2		
E3		

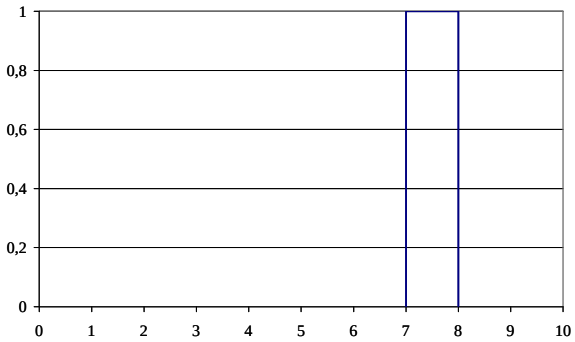
	Evolution du débit	Qualité du béton
E1		
E2		
E3		

	Evolution du débit	Mouvement des dalles de protection
E1		
E2		
E3		

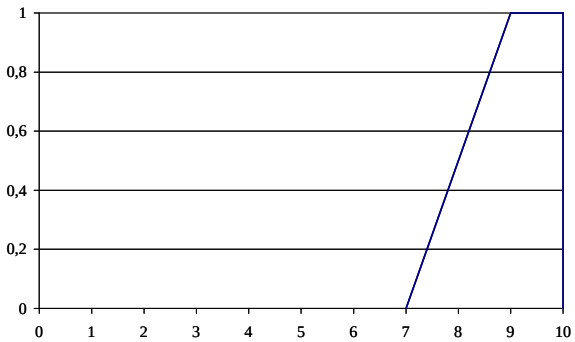
	Poinçonnements	Etat des pavés
E1		
E2		
E3		

Poinçonnements

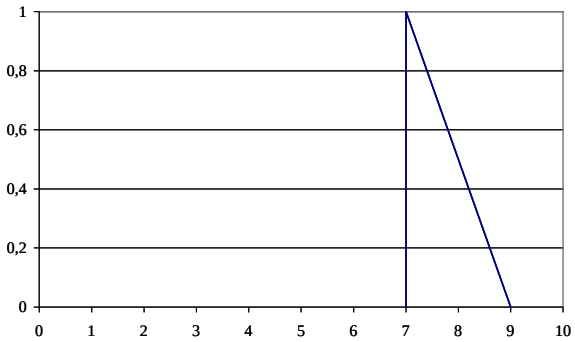
E1



E2



E3



Annexe 7 – Propagation des imperfections dans le modèle

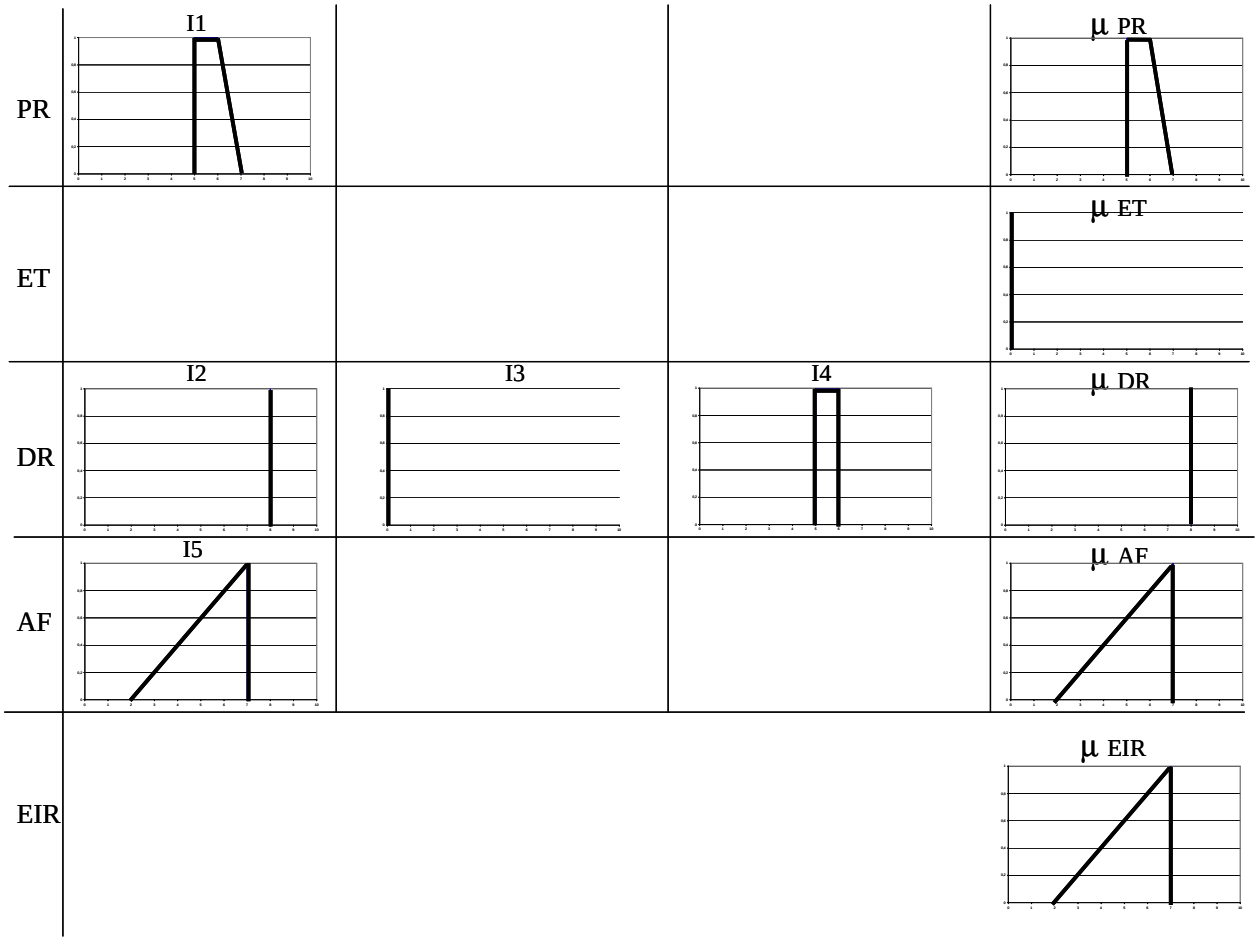


Figure A7-1 : Propagation des distributions de possibilité dans le modèle d'agrégation (E1 – V1-BAR1) – μPR : Performance Fonction de Protection – μET : Performance Fonction d'étanchéité – μDR : Performance Fonction de drainage – μAF : Performance Fonction d'auto-filtration – μEIR : Performance par rapport à l'érosion interne dans le remblai

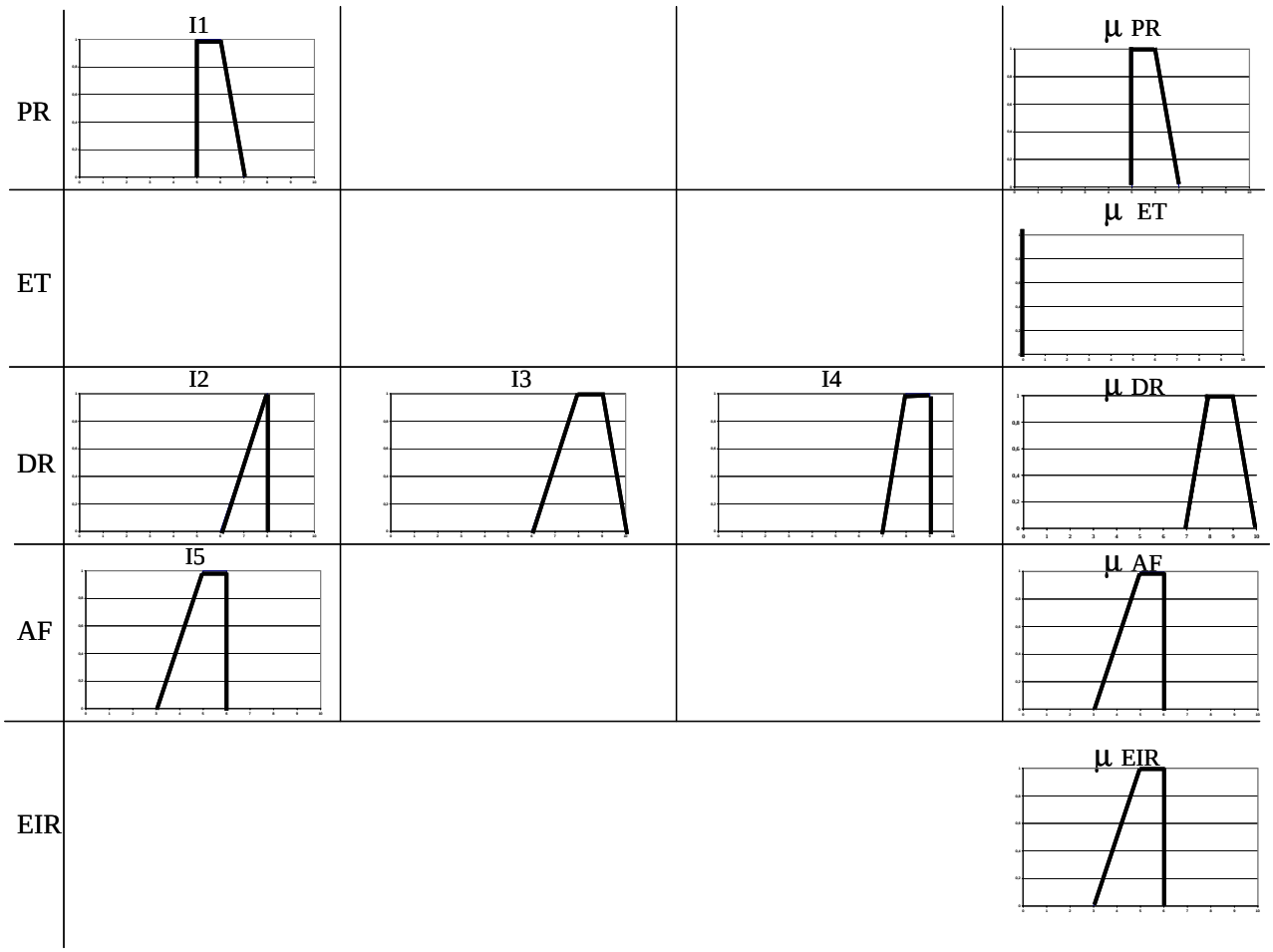


Figure A7-2 : Propagation des distributions de possibilité dans le modèle d'agrégation (E2 – V1-BAR1) – μPR : Performance Fonction de Protection – μET : Performance Fonction d'étanchéité – μDR : Performance Fonction de drainage – μAF : Performance Fonction d'auto-filtration – μEIR : Performance par rapport à l'érosion interne dans le remblai

Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances Application aux barrages en remblai

Le développement de méthodes et d'outils d'aide à l'évaluation de la performance et de la sécurité des ouvrages de génie civil représente un enjeu industriel important et une thématique de recherche forte. Un des verrous importants de cette thématique vient de ce que plusieurs types de connaissances et de données sont employés pour caractériser performance et sécurité et que seul, aucun n'est suffisant pour définir la performance ou la sécurité d'un ouvrage de la complexité d'un barrage. Dans ce mémoire, des approches contribuant à l'évaluation de la performance d'un barrage sont proposées. Elles ont été développées en forte connexion avec un groupe d'experts support des connaissances. Ces développements portent sur :

- une méthode d'évaluation déterministe de la performance des barrages par recueil, formalisation et agrégation de différentes sources de connaissances ;
- une base de connaissances sur les phénomènes de dégradation des barrages permettant la capitalisation des connaissances du domaine ;
- une méthode d'analyse des imperfections ;
- une méthode non déterministe d'évaluation de la performance qui procède par représentation des imperfections et leur propagation dans le modèle.

Ces différentes méthodes ont conduit à trois outils informatiques : une interface d'aide à l'évaluation de la performance, un système de traçabilité des données et une base de connaissances sur les phénomènes de dégradation.
Ces approches sont illustrées sur les barrages en remblai et plus spécifiquement le mécanisme d'érosion interne.

Mots clés :
Barrage – Phénomènes de dégradation – Performance – Formalisation de connaissances – Théorie des possibilités

Assessment of dam performance based on a knowledge formalisation and aggregation method Application to embankment dams

The development of tools and methods able to manage the performance and safety of civil structures represents a main industrial issue and an interesting way of research. One of the difficulties relies on the necessity to combine various kinds of knowledge and data to assess the performance and safety. In this Ph.D. thesis, approaches contributing to assess dam performance are proposed. They are based on knowledge collected among an expert panel. The developments concern:

- a deterministic method for the assessment of dam performance based on the collection, formalisation and aggregation of various kinds of knowledge;
- a knowledge base related to phenomena that lead to damages in embankment dams. This base allows domain knowledge capitalization;
- a method to analyse the origins of data imperfections;
- a non-deterministic method for the assessment of performance that proceeds by representation and propagation of data imperfections.

These methods lead to three user tools: a performance assessment interface, a data traceability system and a knowledge base concerning degradation phenomena.
These approaches are illustrated on embankment dams and more specifically on the internal erosion mechanism.

Keywords:
Dam — Degradation phenomenon – Performance – Knowledge formalisation – Theory of possibility