



HAL
open science

Élaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales

M. Vuillet

► **To cite this version:**

M. Vuillet. Élaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales. Sciences de l'environnement. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, École doctorale Ville, Transports et Territoires, 2012. Français. NNT: . tel-02598252

HAL Id: tel-02598252

<https://hal.inrae.fr/tel-02598252>

Submitted on 15 May 2020

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.

Ecole doctorale « *Ville, Transports et Territoires* »

THÈSE DE DOCTORAT

Discipline : Génie Urbain

Présentée par

Marc VUILLET

**Élaboration d'un modèle d'aide à la décision
basé sur une approche probabiliste
pour l'évaluation de la performance
des digues fluviales**

Thèse dirigée par Youssef DIAB

Soutenue publiquement le 30 novembre 2012

Jury :

Daniel BOISSIER	Professeur Émérite Université Blaise Pascal	Rapporteur
Pascal LE GAUFFRE	Maître de conférence –HDR, INSA Lyon	Rapporteur
Bernard ROY	Professeur Émérite Université Paris Dauphine	Président du jury
Youssef DIAB	Professeur Université Paris Est	Directeur de thèse
Laurent PEYRAS	Docteur –HDR, IRSTEA	Co-directeur de thèse
Damien SERRE	Docteur –HDR, EIVP	Examineur

Avant propos

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) réunissant la société G2C informatique du groupe Alteréo, l'unité de recherche Ouvrages hydrauliques et Hydrologie d'IRSTEA, et le Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains (LEESU) de l'Université Paris-Est.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma grande reconnaissance au Professeur Youssef DIAB, directeur de ma thèse, pour son implication, ses précieux conseils et la confiance témoignée lors de ces recherches.

J'exprime également ma profonde gratitude à Monsieur Laurent PEYRAS, Ingénieur des Ponts, des Eaux et des Forêts – HDR et co-directeur de thèse, pour son encadrement au quotidien, son attention et sa disponibilité bienveillante tout au long des travaux de recherche. Il m'a permis de trouver les clés pour avancer dans les moments difficiles, a également su me communiquer son enthousiasme et son exigence de rigueur scientifique.

Je remercie Monsieur Damien SERRE - HDR, de l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris pour sa disponibilité, ses conseils avisés et ses encouragements.

J'adresse toute ma reconnaissance au Professeur Bernard ROY, pour avoir accepté de présider mon jury de thèse, ainsi qu'au Professeur Daniel BOISSIER et à Pascal LE GAUFFRE, Maître de Conférences et HDR, qui m'ont fait le privilège d'être rapporteurs de mon travail.

Je remercie Messieurs Rémy TOURMENT et Claudio CARVAJAL d'IRSTEA pour leur contribution à mon travail et les échanges très enrichissants que nous avons pu avoir.

Je remercie Monsieur Jean-Christophe DE MASSIAC de G2C, pour son écoute et pour avoir permis que les travaux de thèse se déroulent dans les meilleures conditions.

Je suis très reconnaissant aux membres du comité expertise d'avoir suivi mes recherches : Messieurs Gérard DEGOUTTE, Daniel POULAIN d'IRSTEA, Madame Catherine CASTEIGST, Messieurs Robert CHAUVET, Christophe DELAUNAY et Daniel CHASSAGNEUX de la Société du Canal de Provence. Leur implication et leur bienveillance ayant eu un rôle important dans la réussite de ce travail. Je remercie Patrice MERIAUX pour son aide lors des études opérationnelles de digues conduites durant ma thèse.

Merci aussi à Thomas MAGGIORE et Gisèle BAMBARA, que j'ai encadré en tant que stagiaire et ingénieur d'études et dont le travail constitue une contribution importante.

Je tiens à exprimer ma sincère sympathie à tous ceux qui ont rendu agréable ces trois années de thèse à IRSTEA : Ismaïl, Fabienne, Bruno, Caroline, Mohamed, Yves, Nadia, Alain, Zhenzhen, Kien, Raphaël, Djibril, Stéphanie, Carole et à G2C : Pascal, Pauline, Mehdi, Amandine, Nolwenn, Camille, et Romain.

J'ai une pensée toute particulière pour mes parents, dont le soutien et les encouragements ont été précieux et sans qui rien n'aurait été possible. Je remercie également ma sœur et l'ensemble de ma famille.

Ma dernière pensée est pour Céline, ma compagne. Merci pour ton soutien et ta patience tout au long de ces trois années. Je te dédie ce mémoire.

Résumé

Lors d'une crue, la défaillance d'une digue fluviale est susceptible d'avoir des conséquences en vies humaines et économiques lourdes. Dans ce contexte, la réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques a récemment été renforcée (décret du 11 décembre 2007). Elle impose dorénavant aux gestionnaires la réalisation de diagnostics périodiques et encourage l'évaluation probabiliste de la sécurité des digues.

De par leur caractère à grand linéaire, la complexité de leurs mécanismes de rupture et la grande variété de données nécessaires à leur diagnostic, les digues induisent des problématiques de diagnostic particulières, nécessitant l'intervention d'un ingénieur expert. Celui-ci doit procéder à l'analyse spatiale de l'information, l'interprétation des données disponibles et la prise en compte de leurs incertitudes. Il procède ensuite, par expertise, à l'évaluation qualitative de la performance des ouvrages.

L'objectif de la thèse est l'élaboration d'un modèle d'aide à la décision probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues. Ce modèle a pour vocation d'être utilisé par un ingénieur spécialisé, en situation de diagnostic rapide ou approfondi et en valorisant toutes les données disponibles. Le modèle apporte une aide à l'ingénieur pour : identifier les tronçons homogènes d'un linéaire de digue, évaluer la performance des ouvrages pour les différents mécanismes de ruptures et préciser les niveaux d'incertitudes des résultats produits en fonction de l'imperfection des données disponibles. Notre démarche de recherche comporte trois étapes :

- le développement d'un modèle fonctionnel des mécanismes de rupture des digues, bâti à partir de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement et du Raisonnement Qualitatif ;
- le développement d'un modèle d'aide à la décision déterministe comprenant des indicateurs de performance pour chaque mécanisme de rupture des digues, suivant une méthode de construction de critères uniques de synthèse ;
- le développement d'un modèle d'évaluation probabiliste de la performance incluant une méthode de prise en compte des incertitudes des informations d'entrée et des résultats du modèle dans le cadre des probabilités subjectives.

Les résultats de nos recherches sont illustrés par des applications du modèle à des études de cas, sur des digues fluviales et torrentielles.

***Mots clés :** digue fluviale, analyse fonctionnelle, AMDE, indicateur de performance, aide à la décision, incertitude, probabilités subjectives.*

Summary

Levee risk control is crucial, as flood defense failures may seriously affect human life or economics issues. The regulation in France relating to the safety of the hydraulic structures is recently evolved (decree of December 11, 2007) and henceforth envisages for levees the realization of regular diagnoses and studies of dangers and encourages a probabilistic evaluation of levees safety.

A levee safety evaluation currently consists in appraising the work, including taking into account data stemming from various prior investigations: historical records, visual inspections, hydraulic modeling, geophysical explorations, geotechnical explorations, etc. Such investigations may be performed to a more or less comprehensive extent, according to the resources available. Levee diagnostic studies will first split the alignments into several homogenous construction and loading sections, then complete an expert quality assessment of their performance levels.

The goal of our research is to develop a probabilistic model for performance assessment of river levees, for a quick or comprehensive diagnosis. The model give support for engineer and make possible to determine how much an evaluation may be trusted and will help decide which levee sections should be primarily subjected to action or investigations. This will also facilitate the decision making process regarding technical actions to be taken to improve a levee section performance. Our approach contains three main steps:

- analyzing and modeling levees failure mechanisms with a functional model build up from risk analysis methods ;
- development of deterministic decision aid model including levees performance indicator, using unicriterion decision support methods ;
- development of a probabilistic-based model for evaluating levees performance. Such model taking into account the input data uncertainty by using subjective probabilities.

Our research results are illustrated by model application on cases studies.

Keys words: *river levee, functional analysis, FMEA, performance indicator, decision aid, uncertainty, subjective probability.*

Sommaire

Introduction.....	1
--------------------------	----------

Partie 1 Contexte de l'évaluation de la performance des digues fluviales

Chapitre 1 Évaluation de la performance des ouvrages en génie civil	6
1.1 Concepts liés à l'évaluation de la performance des ouvrages génie civil.....	6
1.2 Le diagnostic des ouvrages de génie civil	11
Chapitre 2 Les digues fluviales en France.....	17
2.1 Les digues fluviales en France.....	17
2.2 Les mécanismes de rupture de digues	21
2.3 La gestion des digues fluviales.....	26
2.4 Synthèse :.....	30
Chapitre 3 Evaluation de la performance des digues.....	31
3.1 Pratiques actuelles de l'ingénierie pour évaluer la performance des digues fluviales	31
3.2 Apports récents de la recherche.....	35
Chapitre 4 Questions scientifiques et démarche de la thèse	39
4.1 Contexte.....	39
4.2 Questions scientifiques	39
4.3 Proposition.....	40

Partie 2 Développement d'un modèle d'aide à la décision déterministe

Chapitre 5 Modélisation fonctionnelle des modes de rupture des digues	44
5.1 Méthodes de modélisation des systèmes complexes et du raisonnement qualitatif ..	44
5.2 Développement d'un modèle fonctionnel pour les mécanismes de rupture des digues	49
5.3 Synthèse.....	57
Chapitre 6 Modèle d'aide à la décision pour le diagnostic des digues fluviales.....	58
6.1 Introduction au problème d'aide à la décision des digues.....	58
6.2 L'aide multicritère à la décision	59

6.3	Indicateurs d'état, critères et indicateurs de performance pour les digues fluviales .	77
6.4	Formalisation du problème d'aide à la décision et choix de méthodes appropriées pour les digues fluviales	81
6.5	Mise en œuvre de méthodes multicritères pour l'évaluation de la performance des digues	86
6.6	Apports de la démarche et discussion.....	97

Partie 3 Développement d'un modèle d'évaluation probabiliste de la performance des digues

Chapitre 7 Imperfections des données utilisées pour le diagnostic des digues 104

7.1	Les données imparfaites	104
7.2	Imperfections des données utilisées pour l'évaluation des digues fluviales	106

Chapitre 8 Méthodes de prise en compte des données imparfaites 110

8.1	La théorie des probabilités.....	110
8.2	Les probabilités subjectives	114
8.3	La théorie des sous-ensembles flous	120
8.4	La théorie des possibilités.....	123
8.5	La théorie des masses de croyances	125
8.6	Proposition de démarche pour le traitement des imperfections des données des digues fluviales.....	127

Chapitre 9 Développement d'un modèle d'évaluation de la performance des digues basé sur les probabilités subjectives 130

9.1	Choix d'une démarche pour l'intervention experte et la construction de distributions de probabilité.....	130
9.2	Démarche proposée pour la réduction des biais	143
9.3	Propagation des incertitudes dans le modèle	146
9.4	Synthèse.....	152

Partie 4 Applications et valorisation

Chapitre 10 Validation du modèle par application à une étude de cas 154

10.1	Présentation de l'étude de cas et démarche d'application du modèle	154
10.2	Application du modèle pour un profil de l'étude de cas.....	156
10.3	Comparaison des résultats du modèle à l'étude de diagnostic	162
10.4	Synthèse.....	165

Chapitre 11 Valorisation : application dans la cadre d'une étude diagnostic opérationnelle	166
11.1 Présentation de la digue et démarche d'application du modèle.....	166
11.2 Application pour le tronçon n°4	170
11.3 Résultats et discussion	174
11.4 Synthèse.....	178
Conclusion.....	181
Bibliographie.....	185
Listes des tableaux et des figures.....	192

Annexes

Annexe A - Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement

Annexe B - Les blocs diagrammes fonctionnels des digues en remblai homogène

Annexe C - Les tableaux de l'analyse fonctionnelle des digues en remblai homogène

Annexe D - L'AMDE des digues en remblai homogène

Annexe E - Scénario de rupture des digues en remblai homogène

Annexe F - Critères et indicateurs d'état pour les digues en remblai homogène

Annexe G - Construction d'indicateurs de performance pour les digues en remblai homogène

Annexe H - Recensement des formes d'imperfections prises en compte dans le modèle

Annexe I - Manuel d'emploi des probabilités subjectives dans le modèle

Introduction

Les fleuves et les rivières ont de tous temps constitué des zones privilégiées pour le développement de l'activité humaine. Occupant d'abord les lieux à la topographie la plus favorable vis-à-vis de l'aléa inondation, l'homme a ensuite progressivement aménagé les zones plus basses, dans les lits d'expansion de crue des cours d'eau, se protégeant alors par la construction de digues (MEDD, 2011).

On compte en France aujourd'hui près de 10000 km de digues fluviales (Tourment, 2007). La construction de ces ouvrages s'est étalée dans le temps, au grès des choix de protection, des zones cultivées ou de l'extension des villes (Mériaux *et al.*, 2001). Une grande partie des digues sont des remblais dont la construction est antérieure au XX^{ème} siècle. Certaines d'entre elles, toujours en exploitation et rehaussées au cours du temps, datent du Moyen Age comme les digues de la Loire (Lino *et al.*, 2000), voire même de l'Antiquité comme certaines digues du Rhône (Mejean, 2007). Lors de ces dernières décennies, l'expansion urbaine et l'intensification des événements extrêmes ont considérablement augmenté leur importance stratégique (MEDD, 2011).

Bien qu'on note des améliorations récentes importantes, les digues restent encore des ouvrages souvent mal connus et mal entretenus par rapport à d'autres ouvrages linéaires ou aux barrages. Ainsi, il est rare de disposer de plan de construction des ouvrages et de documents relatifs à leur évolution au cours du temps (Fauchard et Mériaux, 2004).

En situation normale d'exploitation, une digue fluviale n'est pas en charge et il est possible qu'un tel ouvrage ne connaisse pas de sollicitations importantes pendant des décennies. Résistantes aux crues courantes saisonnières, il arrive, lors d'événements plus rares, qu'une digue rompe brutalement. Les mécanismes de rupture des digues sont nombreux et complexes ; ils impliquent plusieurs modes de défaillance et phénomènes en interaction (Lino *et al.*, 2000). Une rupture de digue peut aggraver sensiblement le risque inondation. En effet, alors que la montée des eaux d'une crue se fait progressivement, la rupture d'une digue est un risque technologique provoquant une vague de submersion. Les conséquences peuvent alors être dramatiques, comme en témoignent les catastrophes récentes : Yangzi Jiang en Chine, 1998 (bilan officiel de 3004 victimes et plusieurs dizaines de milliards d'euros de dégâts), Rhône en 2003 (7 victimes et 1 milliard d'euros de dégâts), ouragan Katrina en 2005 (1800 victimes et près de 100 milliards de dollars de dégâts), tempête Xynthia en 2010 (50 victimes et près de 3 milliards d'euros de dégâts).

Dans un objectif de réduction du risque, la réglementation française relative à la sûreté des ouvrages hydrauliques a récemment été renforcée (décret du 11 décembre 2007). Elle impose dorénavant aux gestionnaires de digues l'évaluation régulière de la performance de leurs ouvrages, au moyen de diagnostics réguliers, d'examens visuels périodiques et d'études de dangers nécessitant des évaluations probabilistes de la sécurité des digues, selon les mêmes principes que ceux mis en œuvre pour les installations à forts risques technologiques (barrages, usines CEVESO, centrales nucléaires).

Les méthodes d'évaluation de la performance des digues reposent sur des données issues d'investigations très diverses (Lino *et al.*, 2000; Fauchard et Mériaux, 2004) : archives historiques, examens visuels, levés topographiques, modélisations hydrauliques, reconnaissances géophysiques, reconnaissances géotechniques, etc. Les investigations conduites peuvent être réalisées de manière plus ou moins complète, en fonction des moyens déployés. La qualité et la quantité des données disponibles sur les digues peuvent ainsi être très variables du fait de la quantité et de la qualité des observations et investigations dont on dispose.

Par ailleurs, de par leur grand linéaire, les digues induisent des problématiques de diagnostic spécifiques. Les résultats obtenus lors d'investigations et l'apparition de désordres présentent

généralement une grande variabilité tout au long du linéaire. De plus, la performance d'une digue dépend étroitement de la performance de son profil le plus faible, l'ouverture d'une brèche d'un très court tronçon rendant défaillant l'ensemble de l'aménagement (Mériaux *et al.*, 2001).

Dans ces conditions, les études de diagnostic de digue procèdent par découpage des linéaires en tronçons de constitution et de sollicitation homogènes, puis par l'évaluation de la performance de chaque tronçon. Pour cela, l'ingénieur doit conduire un travail d'expertise complexe, de priorisation et de localisation des investigations à mener, puis de recouplement spatial des informations disponibles pour l'identification des tronçons homogènes et enfin, d'évaluation qualitative de la performance des digues (Royet et Lino, 2004).

Le diagnostic des digues pose plusieurs questions scientifiques majeures : Comment modéliser les mécanismes de rupture des digues et identifier des critères d'évaluation ? Peut-on construire un modèle d'aide au diagnostic des digues ? Peut-on proposer une démarche permettant d'identifier les tronçons homogènes d'une digue ? Comment modéliser et rendre compte de l'incertitude des évaluations produites ?

L'enjeu est de proposer un modèle d'évaluation de la performance des digues apportant une aide pour le diagnostic rapide ou approfondi, destiné aux ingénieurs des bureaux d'études et des services techniques des gestionnaires, et prenant en compte le caractère à grand linéaire des ouvrages et le contexte de qualité et de quantité de données variables.

Des travaux de recherches récents ont permis de construire des indicateurs de performance pour les digues fluviales (Serre, 2005). Dans ceux-ci, l'ingénieur intervient pour évaluer la performance des ouvrages selon des critères qualitatifs définis. Le raisonnement expert est ainsi formalisé par des indicateurs de performance. Ces travaux visent à apporter une aide à l'évaluation rapide et de premier ordre de grandeur des digues.

Il n'existe cependant pas de modèle permettant l'évaluation de la performance des digues dans le cadre d'un diagnostic approfondi, susceptible d'identifier les tronçons homogènes sur le linéaire de la digue, de prendre en compte la grande variété des informations nécessaires à l'évaluation et d'intégrer l'impact de la qualité et la quantité des données disponibles sur l'évaluation de la performance.

Dans d'autres domaines du génie civil, tels le nucléaire, les barrages (Peyras, 2003; Carvajal, 2009) ou les réseaux urbains (Diab, 2001; Le Gauffre *et al.*, 2004), des modèles d'aide à la décision ont été développés pour permettre l'évaluation de la performance d'ouvrages dans le cadre de diagnostic approfondi, parfois dans des contextes de données incertaines.

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est de construire un modèle d'évaluation de la performance des linéaires de digue à travers des indicateurs de performance et une prise en compte des incertitudes inhérentes à la quantité et la qualité des données disponibles. Face à cet objectif, nous visons à proposer une démarche scientifique pour traiter :

- *la modélisation des différents mécanismes de rupture des digues ;*
- *l'intégration de la grande variété des informations nécessaires à l'évaluation de la performance ;*
- *la variabilité des ouvrages tout le long de leur linéaire ;*
- *la prise en compte de la qualité et de la quantité de données disponibles qui déterminent l'incertitude sur les évaluations des ouvrages.*

Cette thèse, réalisée entre l'IRSTEA, le LEESU-Génie Urbain de l'université Paris Est Marne La Vallée, et G2C, dans le cadre d'une convention CIFRE s'inscrit clairement dans un environnement professionnel fort, à vocation de contrôle, diagnostic et suivi d'ouvrages

hydrauliques de génie civil. Par conséquent, elle est nécessairement menée en considérant les pratiques de la profession et présente une vocation applicative forte.

Le mémoire de thèse est organisé en quatre parties. Nous présentons en premier le contexte de nos recherches, en abordant successivement les concepts liés à l'évaluation de la performance des ouvrages de génie civil, les spécificités des digues, les problèmes posés pour l'évaluation de la performance des digues et les avancées récentes de la recherche dans ce domaine.

La deuxième partie est consacrée à l'identification des critères d'évaluation de la performance des digues fluviales et la construction d'indicateurs de performance pour chaque mécanisme de rupture. Ce travail, mené pour les digues en remblai homogène, fait appel aux méthodes de la sûreté de fonctionnement et aux méthodes de l'aide à la décision multicritère.

La troisième partie du mémoire traite de la prise en compte de l'incertitude des évaluations de performance des digues. Nous proposons d'abord une caractérisation des formes d'imperfections généralement présentes pour les données exploitées lors des évaluations expertes de la sécurité des ouvrages et nous développons un modèle fondé sur les probabilités subjectives.

Enfin, nous présentons dans une quatrième partie l'application du modèle d'évaluation de la performance des digues à des études de cas. Nous cherchons à vérifier la validité du modèle probabiliste d'évaluation de la performance développé par l'application à des profils de digue du Rhône pour lesquels nous disposons d'un diagnostic approfondi. Puis, nous présentons une valorisation de nos recherches par application du modèle pour le diagnostic d'une digue dans le cadre d'une étude opérationnelle.

Partie 1
Contexte de
l'évaluation de la
performance des
digues fluviales

Chapitre 1 Évaluation de la performance des ouvrages en génie civil

Dans ce chapitre, nous définissons les notions de performance, de gestion patrimoniale et de diagnostic des ouvrages de génie civil. Nous esquissons un panorama des méthodes mises en œuvre pour les ouvrages à grands linéaires.

1.1 Concepts liés à l'évaluation de la performance des ouvrages génie civil

1.1.1 Système de génie civil et performance des systèmes

Un *système de génie civil* (un ouvrage ou un ensemble d'ouvrages) se définit, d'une part à partir des éléments structurels (ou des sous-systèmes) qui le composent, d'autre part à partir des fonctions qu'il accomplit. A chaque niveau de décomposition du système, les éléments structurels remplissent à leur tour des fonctions qui contribuent à la réalisation des fonctions globales de l'infrastructure (Figure 1-1).

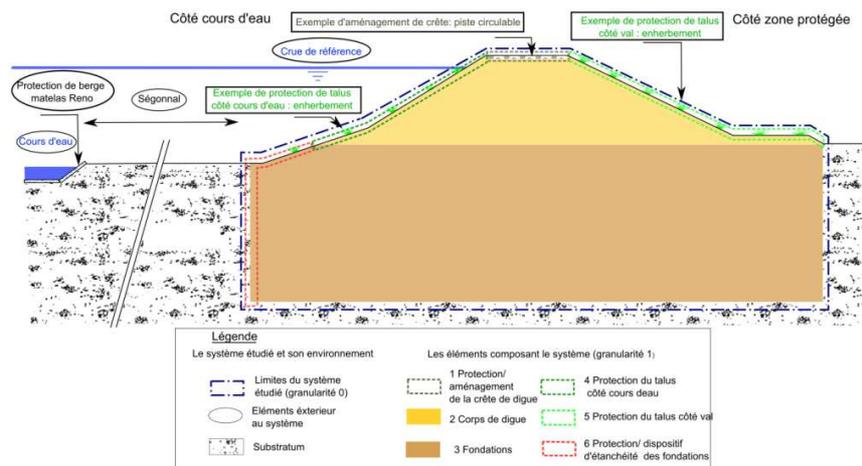


Figure 1-1 : Eléments et fonctions d'un système de génie civil particulier : une digue en remblai homogène

Ainsi, deux types d'analyse permettent de définir un système de génie civil, à savoir l'analyse structurelle et l'analyse fonctionnelle (Baroth *et al.*, 2011). L'aptitude d'une structure à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue est appelée la **performance**.

On considère deux catégories de perte de performance (Figure 1-2) :

- la **dégradation** qui est une diminution de la performance d'une fonction restant néanmoins supérieure au seuil fonctionnel ou à l'état-limite (état ou phénomène que l'on souhaite éviter)(Baroth *et al.*, 2011) ;
- la **défaillance** qui est l'altération ou la cession de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou (ses) fonction(s) requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques (norme NF X60-010). Dans ce cas, au moins une des performances est inférieure au seuil fonctionnel.

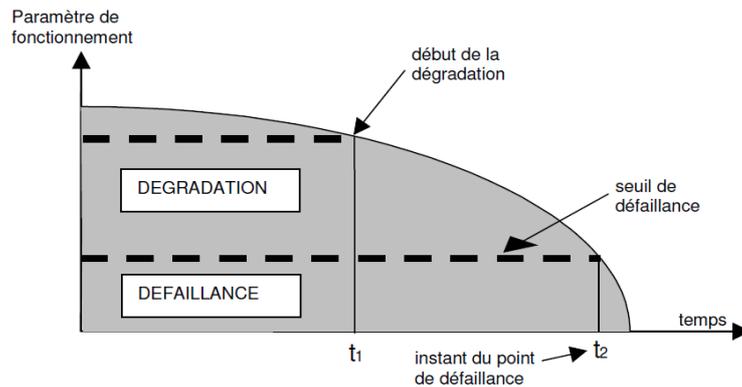


Figure 1-2 : Dégradation et défaillance (Zwingelstein, 1996)

L'évaluation de la performance d'un ouvrage de génie civil en service comprend une évaluation de son état, puis une évaluation de sa performance (Cremona, 2003). L'évaluation de l'état est une étape d'analyse où les dégradations de l'ouvrage et leur histoire sont recherchées ; la qualité des informations disponibles sur la structure y est fondamentale. L'évaluation de la performance est ensuite réalisée. Elle se base sur l'état structurel réel de l'ouvrage en cours d'exploitation.

La **maintenance** correspond à « toutes les activités destinées à maintenir ou rétablir un système dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management » (norme NF X60-010). La maintenance contribue à la performance d'un système de génie civil.

La pratique de la maintenance des ouvrages de génie civil consiste essentiellement en des mesures de **surveillance**, régies le plus souvent par la réglementation. La surveillance comprend des techniques d'**inspection** pour lesquelles on retrouve un cadre commun aux différents ouvrages de génie civil, à savoir :

- les inspections régulières visuelles réalisées plusieurs fois par an (détection des anomalies et maintenance préventive) ;
- les inspections détaillées effectuées avec une fréquence d'une ou quelques années (grosse maintenance) ;
- la haute surveillance en cas de sollicitations accidentelles, de dégradations évolutives ou de risques imminents. La surveillance inclut également l'auscultation des ouvrages et les mesures en continu.

1.1.2 Diagnostic et analyse de risques des ouvrages de génie civil

Le **diagnostic** d'un ouvrage de génie civil s'opère par « l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test » (AFNOR, 2001). On recherche dans le passé de l'ouvrage sur lequel on produit le diagnostic, les mécanismes de dégradation qui ont conduit à son état actuel au moment de son évaluation.

Le **risque** est « une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences » (Villemeur, 1988).

Pour un gestionnaire d'ouvrages, analyser les risques que peut représenter son parc d'ouvrage est primordial pour adapter les actions de maintenance à entreprendre. *L'analyse de risques* est l'activité qui consiste à répondre aux trois questions suivantes (Kaplan, 1997) :

- qu'est-ce qui peut conduire à des situations de danger ?
- quelles sont les chances que ces situations se produisent ?
- si elles se produisent, à quelles conséquences doit-on s'attendre ?

Ainsi, dans une étude d'analyse de risques d'un ouvrage, on cherche à évaluer sa sûreté de fonctionnement (2^{ème} question proposée par Kaplan).

La *Sûreté de Fonctionnement* est « la Science des Défaillances, incluant leur connaissance, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise » (Villemeur, 1988). Elle propose, depuis de nombreuses années dans le milieu industriel, des méthodes pour identifier, analyser, gérer et réduire les risques (Peyras, 2003). Ces méthodes vont permettre de réaliser le diagnostic, d'évaluer l'état, d'analyser la sûreté et les risques de défaillance d'un système. Elles commencent à être utilisées dans le contexte des ouvrages de génie civil.

La *sûreté de fonctionnement* correspond à l'aptitude d'une entité à accomplir une ou plusieurs fonctions requises, dans des conditions données. Elle est caractérisée par différents concepts, notamment la fiabilité et la durabilité, définis par la norme (AFNOR, 1988) :

- la *fiabilité*, qui correspond à l'aptitude de l'ouvrage à assurer ses fonctions, dans des conditions données, pendant une période de temps donnée ;
- la *durabilité*, qui correspond à l'aptitude à demeurer en état d'accomplir ses fonctions, dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint.

Les concepts de diagnostic, d'évaluation de l'état et de la performance, et d'analyse de risques sont synthétisés avec leur temporalité dans la Figure 1-3:

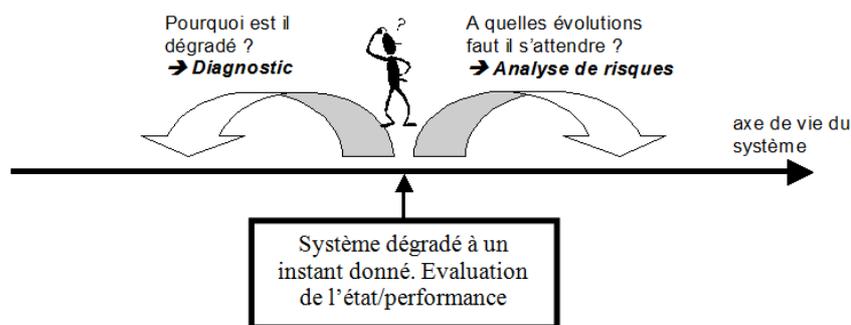


Figure 1-3 : Diagnostic, évaluation de l'état/performance et analyse de risque (Peyras, 2003)

1.1.3 Aide à la décision et gestion patrimoniale en génie civil

1.1.3.1 Les concepts de la gestion patrimoniale

Les parcs d'ouvrages de génie civil, tels les digues, les routes ou les réseaux d'eau potable et d'assainissement, constituent des patrimoines aux enjeux techniques et financiers colossaux, notamment en raison de leurs coûts de construction et de maintenance, leurs rôles stratégiques et leurs tailles.

La **gestion patrimoniale** se caractérise par la recherche de la maîtrise des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance. Elle comprend deux aspects intrinsèquement liés : la gestion technique et la gestion financière (Lair, 2000).

La gestion technique consiste à rechercher ou maintenir un niveau de performance requis pendant une durée de vie donnée. La gestion financière de l'ouvrage concerne tous les coûts engendrés au cours des phases du cycle de vie.

Dans les différents domaines du génie civil, la gestion patrimoniale est devenue essentielle et les différents parcs d'ouvrages font l'objet de dispositifs adaptés. Les activités scientifiques et techniques relatives à la gestion patrimoniale sont au cœur des préoccupations des différents gestionnaires et organismes de recherche (Serre, 2003). Deux missions principales peuvent être considérées :

- assurer la **sécurité** des parcs d'ouvrages : le dysfonctionnement des ouvrages et leur dégradation sont susceptibles de porter atteinte aux personnes et aux biens (riverains, usagers et personnel d'exploitation), ainsi qu'à l'environnement ;
- garantir la **pérennité** des parcs d'ouvrages : la problématique actuelle de la gestion patrimoniale s'inscrit essentiellement dans la gestion des parcs anciens et/vieillissants. Il s'agit donc de maintenir ou d'améliorer les patrimoines dans les meilleures conditions techniques et économiques.

La gestion patrimoniale d'un parc d'ouvrages (on parle aussi de politique **d'Inspection Maintenance Réparation, IMR**) a trois objectifs principaux : il assure que l'ouvrage remplisse ses fonctions requises, la sécurité des usagers et la protection de l'environnement et la conservation d'un patrimoine pour une durée déterminée, en se plaçant généralement sur du long terme.

Pour répondre à ces objectifs, le dispositif de **gestion patrimoniale** est mis en place. Il comprend les procédures destinées à assurer la maintenance. Il inclut :

- les méthodes et outils (surveillance, acquisition et traitement de données...) ;
- les modes d'organisation, les intervenants aux différents niveaux de qualification ;
- les bases de données (inspections, historique...) ;
- la réglementation.

Pour gérer un patrimoine, il faut tout d'abord le connaître, l'évaluer, planifier les actions de maintenance puis enregistrer toutes les informations relatives à ces actions afin de constituer un historique (Delfosse, 2001).

Nous remarquons que c'est rarement le cas des ouvrages à grands linéaires, la gestion patrimoniale de ces ouvrages n'étant alors généralement possible que dans un cadre incertain.

Connaître le patrimoine signifie disposer d'un inventaire précis du parc d'ouvrages à gérer. Au préalable, il est important de définir ce que l'on souhaite gérer et de déterminer un vocabulaire commun aux acteurs de la gestion.

Evaluer le patrimoine consiste à déterminer, à l'aide d'indicateurs, l'état, puis la performance des ouvrages à gérer.

Planifier consiste à définir des priorités d'interventions sur les ouvrages selon les objectifs en intégrant les coûts de ces interventions. Les indicateurs de performances constituent une aide précieuse à la planification. Les indicateurs de performance permettent au gestionnaire d'évaluer la performance de ses ouvrages et de suivre l'évolution de leur performance au cours du temps.

1.1.3.2 Les concepts de l'aide à la décision

La mise en place d'une stratégie de gestion patrimoniale est complexe et rend nécessaire le développement **d'outils d'aide à la décision** pour soutenir les choix des responsables des infrastructures (Barraqué et Isnard, 2010).

L'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part (Roy et Bouyssou, 1993).

L'objectif de **l'aide à la décision multicritère** est d'ordonner et trier différentes informations pour permettre une meilleure prise de décision. Elle peut-être définie comme une formalisation du bon sens pour les problèmes où il est trop difficile d'utiliser le bon sens de manière informelle (Keeney, 1982).

L'aide à la décision multicritère repose sur l'utilisation d'indicateurs et de critères permettant de mesurer l'intensité des préférences d'un décideur pour chaque option (ou action) considérée dans son problème de décision. Les méthodes d'aide à la décision multicritère proposent des procédures d'exploitation des scores des critères pour favoriser la décision parmi ces options.

Un **indicateur** est un paramètre ou une valeur calculée à partir de paramètres donnant des indications sur un phénomène, sur l'environnement... ou décrivant l'état d'un phénomène, de l'environnement ou d'une zone géographique, et d'une portée supérieure aux informations directement liées à la valeur d'un paramètre (OCDE, 1993).

D'après l'IFEN (Institut Français de l'ENvironnement), un **indicateur** est une donnée qui a été sélectionnée à partir d'un ensemble statistique plus important car elle possède une signification et une représentativité particulière. Par exemple, les émissions nationales de CO₂ (dioxyde de carbone) constituent un indicateur de la contribution de notre pays à l'effet de serre. Les indicateurs condensent ainsi l'information et simplifient l'approche de phénomènes, souvent complexes, ce qui en fait des outils de communication précieux et surtout d'aide à la décision indispensables.

Nous remarquons que selon cette définition, un indicateur peut-être un paramètre ou une synthèse de l'information de plusieurs paramètres. En cela il constitue un élément d'aide à la décision.

Un *indicateur de performance* est une information devant aider un acteur, individuel ou plus généralement collectif, à conduire le cours d'une action vers l'atteinte d'un objectif ou devant lui permettre d'en évaluer le résultat (Bonnefous et Courtois, 2001). Un indicateur de performance constitue donc en soi une aide à la décision. A titre d'illustration dans le domaine de l'entreprise, les indicateurs clés de performance, appelés aussi KPI (Key Performance Indicator), sont des indicateurs d'aide à la décision visant à générer des rapports détaillés sur l'évolution des facteurs de succès des activités.

Les indicateurs de performance sont de plus en plus utilisés dans le domaine du génie civil (Serre, 2005). Dans ce domaine, la performance correspond à l'aptitude d'un ouvrage (ou de ses composants) à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu. De fait, un indicateur de performance, en génie civil, renseigne sur cette aptitude (la performance de l'ouvrage). Même si certains indicateurs de performance sont déjà opérationnels, de nombreuses recherches sont en cours pour construire des indicateurs de performance, particulièrement pour les ouvrages linéaires (réseaux d'eaux et routes). Outre la performance d'un ouvrage, les indicateurs de performance visent alors à aider les gestionnaires dans le suivi de l'ouvrage et dans ses décisions de gestion.

Dans le cadre de l'aide à la décision multicritère, Vincke (1989), définit un *critère de décision (ou critère)* comme une fonction, qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné et qui représente les préférences du décideur selon un point de vue. Un critère de décision est donc nécessairement aussi un indicateur, sous la forme d'une mesure brute ou d'information synthétique.

1.1.4 Synthèse

Les ouvrages de génie civil constituent un patrimoine technique, financier et stratégique qu'il est nécessaire de maintenir dans un bon état de fonctionnement. De la performance de ces ouvrages dépendent une partie des capacités logistiques et la sécurité de la société civile. Le maintien de ces structures à un niveau de performance correct induit que les gestionnaires de parcs d'ouvrages, avec leurs budgets limités, trouvent des solutions pour donner des priorités à leurs interventions. Il s'agit d'orienter la maintenance vers une politique préventive efficace et économique (Diab, 2002).

Dans ce contexte, la démarche de gestion patrimoniale constitue une solution adaptée. Elle repose sur la connaissance des ouvrages et l'évaluation de leur performance au moyen d'indicateurs destinés à définir les priorités d'actions de maintenance (Serre, 2005). La construction de tels indicateurs repose sur une démarche de diagnostic adaptée aux ouvrages considérés. Nous dressons ci-après un panorama des démarches de diagnostic des ouvrages en génie civil.

1.2 Le diagnostic des ouvrages de génie civil

Pour établir le diagnostic d'un ouvrage de génie civil, évaluer son état et sa performance, ou encore analyser les risques et évaluer sa sûreté de fonctionnement, deux familles d'approches sont possibles (Peyras *et al.*, 2004), (Zwingelstein, 1995).

Les *méthodes internes* reposent sur la connaissance approfondie du système étudié (un ensemble de composants interconnectés dans l'industrie, un ouvrage de génie civil). A partir

de modélisations, il est alors possible d'analyser les mécanismes de dégradation et de rupture, de prévoir le comportement futur. Selon le type de modèle décrivant le système, on distingue deux types de modélisation, la *modélisation physique* et la *modélisation fonctionnelle*.

Les *méthodes externes* s'appliquent dans des contextes où la modélisation des mécanismes (physiques ou fonctionnels) n'est techniquement pas possible ou pas adaptée au niveau de préoccupation, compte tenu de sa complexité ou de son coût. En fonction des informations disponibles, on distingue deux familles de méthodes, *l'analyse statistique* et *l'expertise*.

1.2.1 La modélisation physique

La modélisation physique repose sur la représentation physique des processus continus ou discrets de dégradation du système, en prenant en compte les équations régissant les phénomènes internes. Elle implique une connaissance approfondie du système et de sa représentation sous la forme de modèles physiques et mathématiques, appuyés par la simulation numérique. Il convient de disposer des lois de comportement physique du système et de données abondantes sur les ouvrages modélisés.

1.2.2 La modélisation fonctionnelle

Le principe de la *modélisation fonctionnelle* est que les systèmes sont étudiés sous l'angle des fonctions qu'ils doivent remplir et pour lesquelles ils sont conçus. Le principe de la modélisation fonctionnelle consiste à déterminer les interactions entre les composants d'un système et son environnement, de façon à établir de manière formelle les liens entre les défaillances des fonctions, leurs causes et leurs effets. Une fois le modèle de fonctionnement établi, on cherche à évaluer des mesures de sûreté de fonctionnement qui peuvent être, selon le contexte et les données disponibles, déterministes ou probabilistes.

1.2.3 L'analyse statistique

L'approche statistique nécessite un retour d'expérience riche et parfaitement documenté, ce qui peut être le cas dans des parcs d'ouvrages homogènes ou pour les systèmes disposant de mesures abondantes. Les méthodes statistiques appliquées aux données du retour d'expérience (données statistiques au sein d'un parc homogène ou série de mesures chronologiques attachées à un système) permettent d'établir des corrélations entre les défaillances du système et d'anticiper ensuite ces comportements.

1.2.4 Expertise et système expert

En présence d'un nombre réduit (voire unique) d'ouvrages et en absence de modèles de comportements, l'expert humain est le seul potentiellement capable de prévoir l'évolution d'un système. L'expertise revêt une importance particulière en génie civil.

On définit l'expert comme une personne disposant d'un savoir et d'un savoir faire ; son raisonnement fait appel à ses connaissances théoriques (connaissances fines du système dont il est expert) et à la longue expérience dont il tire des précédents et son savoir faire (Zwengelstein, 1995). Dans une approche d'analyse des risques basée sur l'expertise, l'expert adopte un raisonnement par analogie : il cherche à prévoir les évolutions futures de

dégradations d'un ouvrage soumis à un mécanisme, en examinant le comportement d'ouvrages de même type déjà connus de lui.

1.2.5 Applications au diagnostic des ouvrages à grands linéaires

1.2.5.1 Modélisation physique pour la dégradation des chaussées

Plusieurs types de modèles physiques ont été développés pour évaluer les phénomènes de dégradation d'ouvrages de génie civil à grands linéaires, notamment pour les chaussées (Tran, 2004), (Ali, 2006).

Nous présentons un modèle pour l'étude du comportement mécanique des chaussées par la méthode des éléments finis (Ali, 2006). Dans cette étude, le modèle numérique utilisé pour l'analyse du comportement des chaussées s'appuie sur un modèle élastoplastique utilisant le critère de Mohr-Colomb pour déduire le comportement des couches inférieures de la chaussée et un modèle élasto-viscoplastique pour les couches de surface (Figure 1-4).

Le modèle développé, en 3 dimensions, permet l'analyse de la réponse de la chaussée sous différentes conditions d'essais.

Après l'étude paramétrique de l'influence des principaux facteurs (type de pneu, intensité de la charge, la température et type de trafic), le modèle est utilisé pour établir un diagnostic des chaussées et définir les stratégies de leur maintenance et réparation.

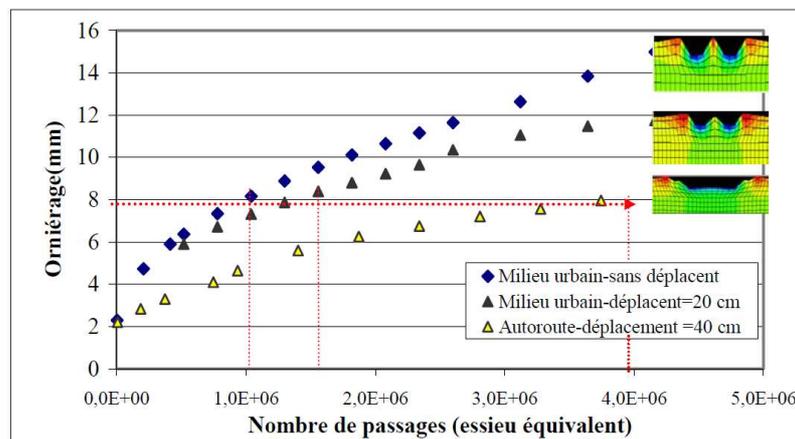


Figure 1-4 : Développement de l'orniérage dans la chaussée en milieu urbain en fonction du nombre de passages

1.2.5.2 Modélisation fonctionnelle des réseaux de distribution d'eau

Plusieurs approches de modélisations fonctionnelles ont été développées pour les ouvrages de génie civil à grands linéaires. Parmi celles-ci, citons les approches pour les réseaux de

distribution d'eau à l'intérieur des bâtiments (Correc, 2005), pour les digues à étanchéité amont (Serre, 2005) et pour les digues en charge permanente (Lepetit, 2002).

Nous présentons une approche possibiliste de prédiction des risques de dégradation des réseaux de distribution d'eau à l'intérieur des bâtiments (Correc, 2005).

Les réseaux de distribution d'eau à l'intérieur des bâtiments souffrent d'un certain nombre de pathologies débouchant sur des dysfonctionnements, pouvant se traduire par des percements ou bien encore l'encrassement de canalisations. Dans ce contexte, Correc (2005) a réalisé une analyse prévisionnelle des risques de dégradation des canalisations du réseau à partir des caractéristiques techniques de l'installation étudiée. La démarche a d'abord consisté à mener une analyse fonctionnelle et structurelle d'un réseau d'eau pour mieux formaliser et comprendre son fonctionnement. En second lieu, des outils comme l'AMDE ont été appliqués pour déterminer l'ensemble des modes de défaillance qui initient les phénomènes de dégradation et des arbres de défaillance pour représenter les mécanismes de dégradation des conduites (Figure 1-5). Enfin des cartes qualitatives de risques sont construites, moyennant des opérations basées sur les données de terrain et les connaissances théoriques des dégradations.

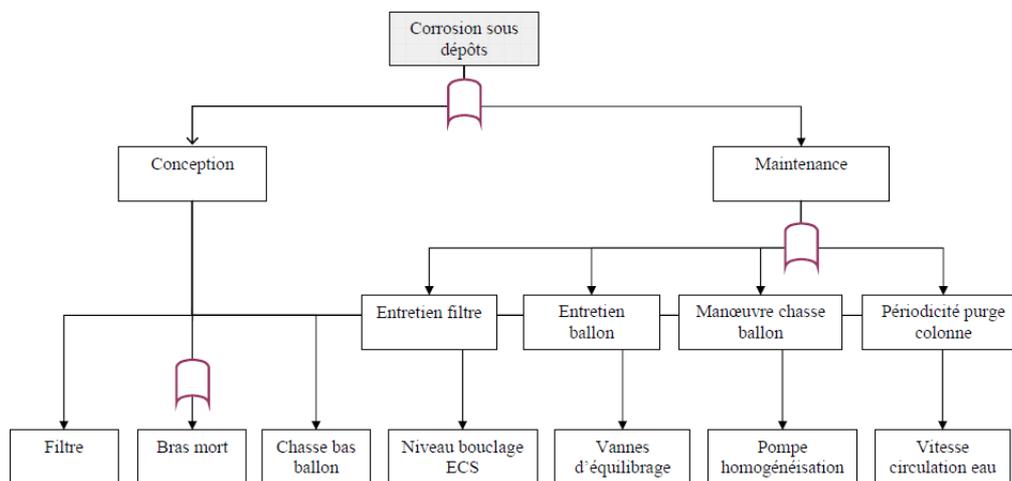


Figure 1-5 : Arbre de défaillance pour le phénomène « corrosion sous dépôts » (Correc, 2005)

1.2.5.3 Approche statistique pour la modélisation de la défaillance des réseaux d'eau potable

Plusieurs approches statistiques ont été développées pour les ouvrages de génie civil à grands linéaires, en particulier pour les réseaux d'eau potables. Les réseaux de distribution d'eau potable sont constitués de tuyaux et autres moyens de transports permettant de connecter les stations de traitement des eaux aux consommateurs. Ils représentent la grande majorité des infrastructures physiques de fournitures en eaux. Leur maintenance constitue un volume financier très important. Les réseaux de distribution d'eaux potables ont fait l'objet de nombreuses études basées sur l'application statistique (Rostum, 2000; Osman et Bainbridge, 2010; House-Peters, 2011).

Nous présentons une approche statistique pour la modélisation de la défaillance des réseaux d'eau (Asnaashari, 2007). La ville de Sanadaj, en Iran, dispose de riches séries de données sur son patrimoine de distribution d'eau potable. L'analyse statistique des modes de rupture

(Figure 1-6) a permis la détermination des principaux facteurs de défaillance des canalisations de distribution d'eau.

Failure Mode	Apply to water pipelines material & percentage			
	PE	AC	CI	DI
Circumferential	2 %	3 %	2 %	0 %
Longitudinal	13 %	7 %	4 %	1%
Explosion	3 %	1 %	0 %	0 %
Hole	6 %	1 %	4 %	2 %
Displacement at Joint	12 %	14 %	5 %	1 %
Ovality	7 %	0 %	0 %	0 %
Spiral cracking	0 %	0 %	13%	0 %

Figure 1-6 : Statistiques des modes de rupture de réseaux d'eau (Asnaashari, 2007)

Ces résultats ont permis d'élaborer un modèle de prévision fondé sur les Réseaux de Neurones Artificiels (RNAs), et le développement d'un modèle de survie, appliqué sur le réseau de distribution de Sanandaj.

L'analyse statistique a apporté d'une part une meilleure compréhension des mécanismes de défaillance des canalisations, permettant d'identifier les principaux facteurs de détérioration des conduites, comme l'âge, la longueur et le diamètre, des conduites. D'autre part, l'étude des corrélations entre les facteurs influents a permis l'identification des indicateurs de défaillance des canalisations d'eau les plus significatifs.

Ces résultats ont permis de construire plusieurs modèles de prévision du nombre de défaillances du réseau d'eau : des modèles de régression et un modèle basé sur les Réseaux de Neurones Artificiels. La mise en œuvre de ces modèles sur une période antérieure a permis de comparer leurs prédictions aux défaillances observées. Ils constituent ainsi des outils puissants pour l'aide à la gestion patrimoniale des conduites de distribution d'eau potable.

1.2.5.4 Approche experte

De nombreuses approches basées sur l'exploitation de l'expertise ont été développées pour l'évaluation de la performance d'ouvrages de génie civil à grands linéaires, dans les domaines de l'assainissement, avec les projets RERAU (Le Gauffre *et al.*, 2004), INDIGAU (Debères *et al.*, 2011) et CARE-S (Saegrov, 2006), de la distribution d'eau potable, projet CARE-W (Saegrov, 2005) et des chaussées (Lepert et Joubert, 1998).

Nous présentons le système expert ERASMUS (Lepert et Joubert, 1998) conçu à destination des maîtres d'œuvre qui souhaitent optimiser les travaux d'entretien et de réhabilitation des chaussées. Développé à partir de 1985 et toujours utilisé à l'heure actuelle, ERASMUS établit un diagnostic par analyse du comportement passé de la chaussée et l'identification des défauts constatés

Le système expert ERASMUS permet de décrire un tronçon de chaussée homogène : état de la surface, trafic poids-lourd, structure de la chaussée etc. Il permet ensuite de caractériser les problèmes rencontrés par les chaussées déficientes selon plusieurs termes: la fatigue de la couche de roulement ou l'adéquation structurelle de la chaussée au trafic (Figure 1-7).

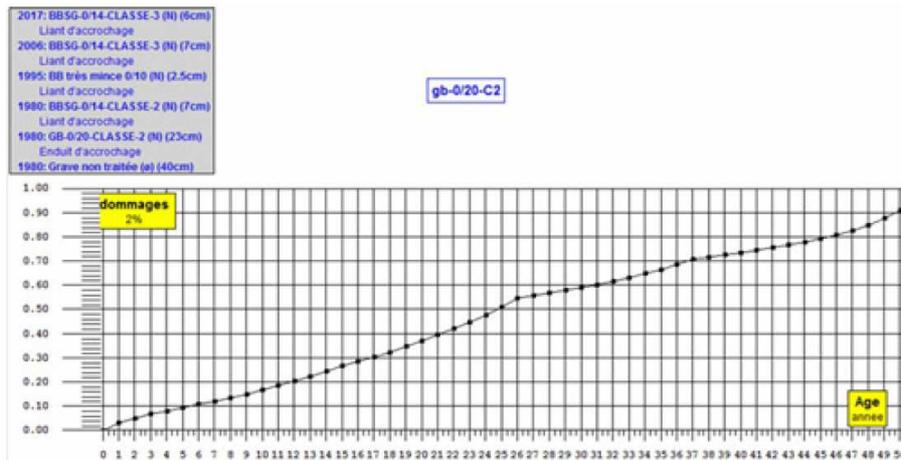


Figure 1-7 : Application ERASMUS, évolution des dommages intégrant l'entretien déjà réalisé et celui projeté jusqu'à la fin de la concession du tronçon (George et al., 2005)

1.2.6 Synthèse et discussion

Nous avons défini les concepts de performance, de diagnostic, d'aide à la décision et de gestion patrimoniale. Nous les avons déclinés aux ouvrages de génie civil à grand linéaire.

Nous avons vu également que le diagnostic d'un ouvrage génie civil repose sur une ou plusieurs familles de méthodes parmi la modélisation physique, la modélisation statistique, la modélisation fonctionnelle ou l'expertise. Le choix de la démarche dépend de la quantité de données disponibles et de la connaissance que l'on a de l'ouvrage et de ses modes de défaillance. Un ouvrage obéissant à des lois physiques connues et richement documenté pourra faire l'objet de modélisations physiques. La disponibilité de longues séries de données sur les facteurs de défaillances d'ouvrages permet de construire des modèles statistiques. Un ouvrage bien connu de l'ingénierie pourra faire l'objet d'une modélisation fonctionnelle. Enfin, en l'absence de ces éléments, le diagnostic de l'ouvrage ne pourra être établi que par expertise.

Chapitre 2 Les digues fluviales en France

Dans ce chapitre, nous présentons les digues fluviales qui constituent l'objet de nos recherches. Nous détaillons la situation du parc de digues français, les différents types d'ouvrages, la spécificité des risques qu'ils impliquent et la réglementation à charge des gestionnaires.

2.1 Les digues fluviales en France

2.1.1 Définition et typologie

2.1.1.1 Définition

Une **digue** est une construction établie dans le but de contenir les eaux ou de protéger de leurs effets (Kurtz, 1997). Il s'agit d'un ouvrage, généralement en terre, construit le long du lit mineur du cours d'eau ou le long d'un canal ou le long du trait de cote et destiné à protéger les parcelles riveraines des venues d'eau ou à surélever la ligne d'eau (navigation, hydroélectricité) (Degoutte *et al.*, 2012).

On distingue les digues fluviales des digues de canal.

Une **digue fluviale**, ou encore **digue de protection contre les inondations** (Figure 2-1), est une digue dont au moins une partie est construite en élévation au dessus du niveau du terrain naturel et destinée à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables (Mériaux *et al.*, 2004). Les digues fluviales sont des ouvrages de grande longueur, surélevés par rapport au terrain naturel, construits dans les lits majeurs des cours d'eau dans l'objectif de les mettre tout ou partie à l'abri des inondations (Degoutte *et al.*, 2012).

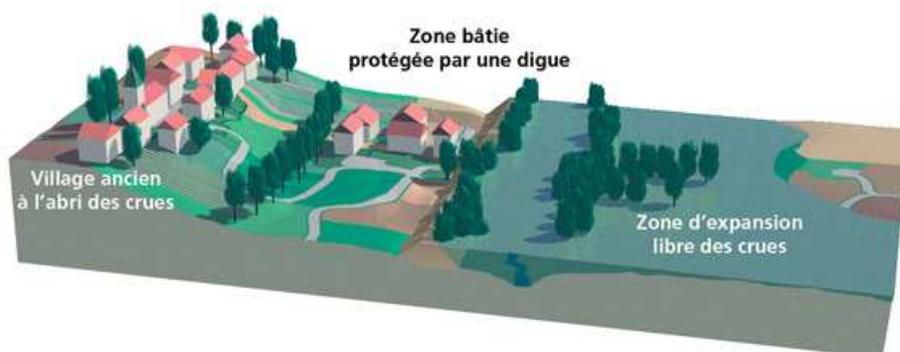


Figure 2-1 : Illustration d'une digue fluviale et zone protégée lors d'une crue

Les digues de canal, construites pour des systèmes hydrauliques où le débit est maîtrisé, sont en charge en permanence. Elles sont sollicitées de manière continue et constante, alors que les digues fluviales demeurent la plupart du temps « à sec » et ne sont sollicitées pleinement que lors d'événements de crue.



Figure 2-2 : A gauche, digue sur le canal de Provence, en charge permanente, à droite digue du Rhône, à sec en situation normale d'exploitation

Les digues fluviales sont des ouvrages à grands linéaires. On en recense près de 10 000 km en France (Mériaux, 2004).

2.1.1.2 Typologie des digues fluviales

Les digues fluviales peuvent être catégorisées selon trois grands types :

- (1) les digues en remblai homogène ;
- (2) les digues en remblai zoné ;
- (3) les digues de type murs poids.

Les **digues fluviales en remblai homogène** (1) sont construites dans un même matériau généralement pris sur place. Elles constituent la majeure partie du parc français et les digues anciennes relèvent de cette catégorie.

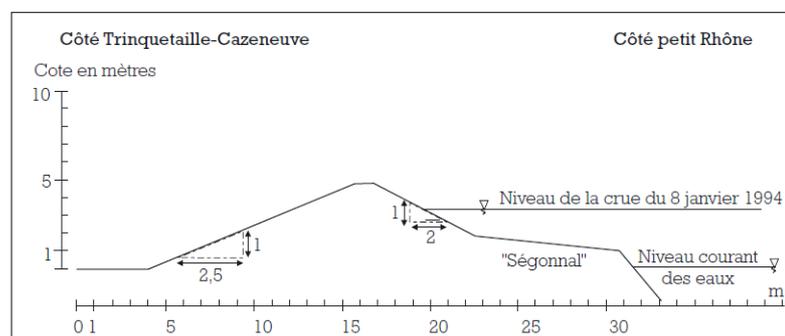


Figure 2-3 : Exemple de Digue en remblai homogène sur le Rhône (Mériaux et al., 2001)

Les digues en remblai homogène recourent une grande diversité de situations. Ces ouvrages peuvent être construits en matériaux fins ou grossiers, relativement homogènes ou très

hétérogènes, en une seule étape ou rehaussés au cours du temps, parfois avec des matériaux variés ou selon des techniques de dispositions différentes (Figure 2-4).

Ces ouvrages peuvent aussi être constitués de composants distincts remplissant chacun des fonctions précises. Ainsi, une digue en remblai homogène peut être protégée par un perré, des talus bien enherbés ou une crête goudronnée et la fondation de l'ouvrage peut-être différente des constituants du corps de digue (Figure 2-4).

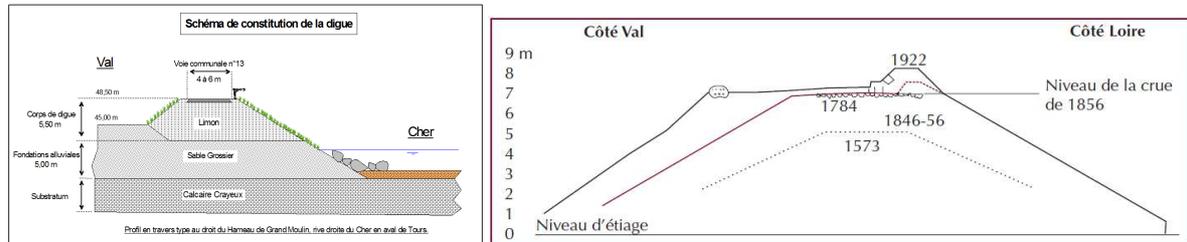


Figure 2-4 : Exemple de digue en remblai homogène sur le Cher (Fauchard et Mériaux, 2004) et étapes de construction d'une digue de la Loire (Dion, 1961)

Les digues en remblai zoné (2) sont constituées de plusieurs matériaux disposés en couches successives, chacune ayant une fonction particulière. La grande majorité de ces ouvrages sont de construction récente. La nature du matériau, sa granulométrie, l'épaisseur et la disposition des couches sont issues de dimensionnement liés aux fonctions qui lui sont assignées : étanchéité ou soutènement ou drainage, etc.

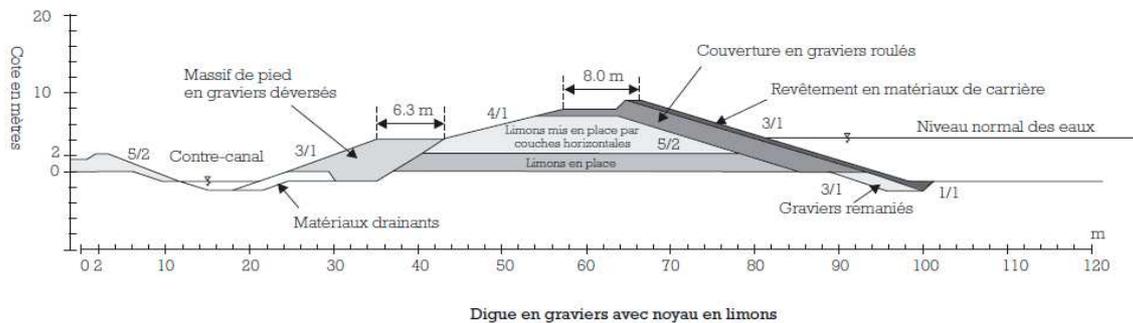


Figure 2-5 : Exemple de digue en remblai zoné (Mériaux et al., 2001)

(3) Les digues de type mur poids : il s'agit de digues maçonnées, fréquentes aux abords des centres ville anciens. Elles peuvent être mixtes lorsqu'elles sont adossées à un remblai (comme dans l'exemple ci-dessous).

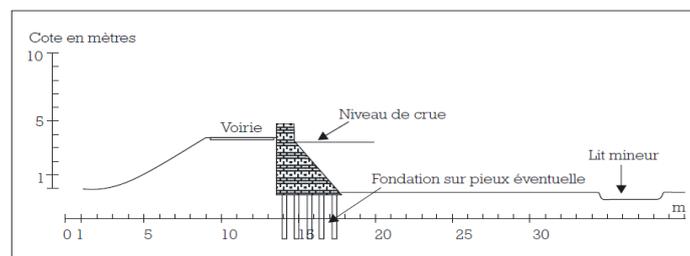


Figure 2-6 : Exemple de digue mixte : mur poids et remblai (Mériaux et al., 2001)

2.1.2 Des ouvrages dont la documentation s'améliore

De manière générale, les digues fluviales sont des ouvrages anciens, certains datent du Moyen Age (Mériaux *et al.*, 2001). Elles sont mal connues et ont généralement fait l'objet de peu de suivi au cours des siècles. On ne possède généralement ni de leurs plans de construction ni les rapports d'éventuels travaux de réparation ou de confortement.

Même lorsque les digues sont gérées de manière correcte, ce problème d'acquisition de connaissance sur les ouvrages subsiste, en partie à cause de l'âge des digues, de leur construction par étape successive, de leur fort linéaire et de l'absence d'instrumentation à l'intérieur des ouvrages (Mériaux *et al.*, 2001).

Dans ce contexte, les données disponibles sur les ouvrages dépendent des investigations menées (Fauchard et Mériaux, 2004) pour leur diagnostic (cf. §3.1) :

- l'analyse des archives où l'on peut parfois trouver des éléments sur la construction des ouvrages ;
- les levés topographiques ;
- les reconnaissances géotechniques pour connaître les propriétés des remblais constitutifs de digues ;
- les reconnaissances géophysiques pour mieux comprendre la disposition des matériaux d'un remblai.

En fonction des moyens d'investigation déployés, il est possible d'acquérir des données abondantes sur les linéaires. De plus, le renforcement des structures de gestion des digues et de la réglementation (cf. §2.3.2) ont considérablement stimulé la production d'études de diagnostic et le suivi des ouvrages. Dans ce contexte, on constate que la documentation disponible sur les digues s'est améliorée et continue de s'améliorer, même si elle reste globalement perfectible.

2.1.1 Des enjeux importants et une sécurité perfectible

En France, d'après le Ministère chargé de l'Environnement, 4,5 millions de personnes occupent 20000 km² de zones inondables, soit 8000 communes concernées par le risque d'inondation. D'après une estimation réalisée au deuxième semestre 2004, la France comporte entre 6000 et 7500 km de digues, gérées par environ un millier de gestionnaires différents. Cela représente environ 2200 à 2700 zones d'une superficie totale de l'ordre de 15000 à 18000 km², abritant une population comprise entre 1,6 et 2 millions d'habitants (Mériaux, 2004).

Sur les 450 km de la Loire Moyenne (entre le Bec d'Allier et le Bec de Maine), 600 km de digues protègent quelque 100000 km² de vals inondables. Auxquels s'ajoutent les digues érigées le long des affluents tels que le Cher, l'Indre, la Vienne. Plusieurs villes importantes sont protégées par les digues : Tours avec 90.000 habitants concernés, Orléans et son agglomération avec 40.000 habitants, Blois avec 10.000 habitants, le Val d'Authion avec 45.000 habitants (Mériaux *et al.*, 2001).

Les digues de la Loire n'ont plus été soumises à des crues majeures depuis les trois crues du milieu du 19^e siècle. A cette époque, les conséquences avaient été considérables (Mériaux *et al.*, 2001).

Les zones inondables protégées par les endiguements de la Garonne sont pour plus de 90 % des terres agricoles. Toutefois, il n'en demeure pas moins que des agglomérations importantes s'avèrent directement exposées, telles Toulouse avec 40.000 personnes protégées et Agen avec 25.000 personnes protégées.

Le cours de la Garonne a été largement endigué à la suite de la crue de 1875 qui avait provoqué 500 morts dont 200 à Toulouse. Les digues n'ont pas empêché que la crue de 1930 provoque à nouveau 200 victimes (Mériaux *et al.*, 2001).

Le long des deux bras du défluent du Rhône, la Camargue est protégée des inondations par environ 200 km de digues qui ont été le siège de 16 brèches lors des crues d'octobre 1993 et de janvier 1994 (crues estimées d'occurrence centennale). Ces brèches sont largement imputables au défaut d'entretien et de surveillance des digues dont le mode de gestion a été alors reconnu inadapté (Mériaux *et al.*, 2001).

Ces exemples montrent qu'à la plupart des crues majeures du passé, les digues ont connu des défaillances pouvant conduire à des ruptures. Ces dernières sont dues essentiellement à une gestion des ouvrages inadaptée, voire inexistante, et à un parc de digues globalement en mauvais état. Augmenter la sécurité des digues passe par une amélioration de leur gestion.

2.1.2 Synthèse

Nous avons présenté l'objet de nos recherches, les digues fluviales en remblai homogène et les principales caractéristiques de ces ouvrages : leur constitution, leurs profils et leurs dimensions. Globalement, les digues anciennes ont été construites sans véritable moyen de terrassement et de compactage. La diversité des matériaux utilisés et la présence de nombreux ouvrages singuliers dans les digues leur confèrent une grande hétérogénéité. A travers quelques exemples, nous avons vu que les enjeux derrière les digues sont importants et que leur sécurité est toute relative.

Les résultats des premiers recensements montrent que peu d'informations sont disponibles sur l'ensemble des linéaires : les digues fluviales sont donc en général des ouvrages mal documentés et l'acquisition d'informations pour évaluer l'état des digues reste complexe et coûteuse. Cependant, la dynamique actuelle est à l'augmentation de la taille et des moyens des structures de gestion des digues. Dans ce contexte, de plus en plus de digues ont fait ou font l'objet de diagnostic et de suivi, et leur documentation s'améliore. A terme, il devrait être possible de disposer, pour les principales digues, d'une information complète.

2.2 Les mécanismes de rupture de digues

2.2.1 Définitions

Les digues connaissent de nombreux mécanismes de dégradation pouvant se combiner à des échelles de temps et d'espaces variés, jusqu'à aboutir, lors de la mise en charge, à la rupture d'un ouvrage. Nous reprenons ci-après les définitions données par (Serre, 2005).



Figure 2-7 : Digue du bas Rhône lors d'une crue importante (crue d'occurrence centennale) et rupture de digue sur le Vidourle (30) en septembre 2002

Nous retenons pour le terme **rupture**, la définition proposée par (ICOLD, 1995) dans le domaine des barrages, à savoir : rupture ou mouvement d'une partie d'une digue ou de sa fondation, tel que l'ouvrage ne puisse plus retenir l'eau. En général, le résultat sera une « lâchure » d'un volume d'eau important. La rupture de digue correspond à l'ouverture d'une **brèche** conduisant à l'inondation de la zone « protégée ».

La rupture de la digue, conduisant à la brèche, est provoquée par un mécanisme de rupture.

Un **mécanisme** est un processus physique (mécanique, chimique, hydraulique...) comprenant un enchaînement de causes et d'effets qui conduisent à la dégradation des caractéristiques des matériaux et des propriétés des ouvrages (ICOLD, 1993).

Ainsi, un **mécanisme de rupture** correspond à un processus physique par lequel la digue peut être amenée à produire une « lâchure » d'un volume d'eau et, de fait, inonder la zone « protégée ».

Il est important de distinguer *mécanisme de rupture* de *mode de rupture*. Un **mode de rupture** est un *mode de défaillance* d'une fonction essentielle à la stabilité de la digue. Un mode de rupture d'une digue correspond à un état-limite ultime : par exemple, la défaillance de la fonction de résistance mécanique de la digue qui conduit à sa rupture.

Un **mode de défaillance** est entendu selon sa définition classique comme étant la non-réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : pas de fonction, perte de fonction, dégradation de fonction, fonction intempestive.

Si le mécanisme de rupture sur une digue ne s'opère pas jusqu'au terme du processus physique ou jusqu'à la défaillance (complète) d'une fonction de stabilité de l'ouvrage, la digue ne connaîtra alors « que » des *détériorations* ou des *désordres* (sans rupture). Ces deux termes sont entendus au sens classique et correspondent à l'état dégradé ou à un comportement défectueux de l'ouvrage du point de vue de sa sécurité et des performances (ICOLD, 1983).

Selon les pratiques de l'ingénierie et les guides de références en la matière (Lino *et al.*, 2000; Mériaux *et al.*, 2001; Fauchard et Mériaux, 2004), les digues fluviales connaissent quatre mécanismes de ruptures : la surverse (vers la « zone protégée »), l'érosion interne, l'affouillement et le glissement de talus (amont ou aval).

2.2.2 *Le mécanisme de rupture par surverse*

La **rupture d'une digue par surverse** peut se produire lorsque l'ouvrage est submergé par les eaux de crue. La lame d'eau prend de la vitesse en s'écoulant sur le talus aval et provoque l'érosion du pied de digue. L'érosion régressive du talus et de la crête, peut alors très rapidement mener à la rupture de l'ouvrage. Il s'agit de la principale cause de rupture des digues en remblai (Fauchard et Mériaux, 2004).

Les connaissances techniques actuelles ne permettent pas d'évaluer la résistance d'une digue en cas de surverse. Par précaution, l'ingénierie considère qu'une digue non prévue pour déverser connaîtra une brèche dès lors qu'il y a occurrence d'une surverse. On peut cependant avancer quelques éléments qualitatifs permettant de nuancer cet argument (Mériaux *et al.*, 2001). Le caractère localement plus ou moins sableux des matériaux constitutifs des remblais et l'hétérogénéité dans la compacité sont des facteurs qui aggravent la sensibilité des digues à la surverse. Un profil en long irrégulier de la crête de digue, avec présence de points bas dus à des défauts de nivellement ou à des tassements différentiels induit une concentration locale des débits de surverse. A contrario, une digue bien compactée, présentant un profil en long régulier, avec des talus bien enherbés et une crête revêtue est probablement susceptible de supporter des surverses de quelques centimètres (voire plus), limitées dans le temps.

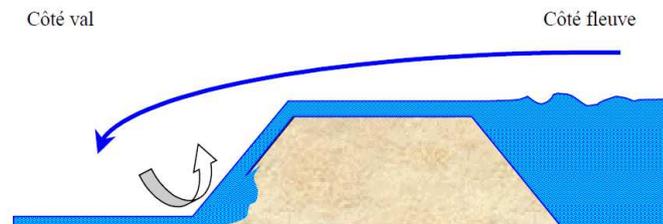


Figure 2-8 : Principe de rupture par surverse (Fauchard et Mériaux, 2004)

Ce mécanisme est la principale cause de rupture des digues fluviales en France, lors des deux siècles passés (Mériaux *et al.*, 2001). Ainsi, pour les digues de Loire, la surverse a été à l'origine de près de la moitié des brèches lors des trois crues du milieu du 19^{ème} siècle (Mériaux *et al.*, 2001).

Dans plus de deux tiers des cas de surverse, on a pu identifier un point bas sur le profil en long de la digue qui a induit la concentration des débits. Des surélévations de la ligne d'eau sur la rive concave des courbes du fleuve, ou encore en amont de ponts ou seuils obstrués par des embâcles, peuvent également être à l'origine des surverses recensées.

2.2.3 *Le mécanisme de rupture par érosion interne*

Selon Fauchard et Mériaux (2004), lors d'une crue, une charge hydraulique apparaît et engendre un gradient hydraulique dans le corps de digue et sa fondation. Lorsqu'il atteint une valeur critique variable selon la nature des matériaux, des zones de circulation préférentielles de l'eau se créent et des phénomènes d'érosion interne apparaissent. Ils peuvent déboucher sur la création d'une galerie à travers l'ouvrage (renard), puis d'une brèche. En surface, l'érosion interne peut se révéler par l'apparition de fontis.

Ces phénomènes peuvent être aggravés par :

- la présence de galeries ou d'excavations dans le corps de digue ou la fondation de l'ouvrage (terriers d'animaux fouisseurs, conduits racinaires d'arbres morts, construction dans le corps de digue) ;

- la mauvaise étanchéité entre le corps de digue et les hétérogénéités.

On remarque que les mécanismes de dégradation constitutifs d'un phénomène d'érosion interne sont très variés et demeurent mal connus. Il peut s'agir d'érosion régressive le long d'une conduite ou d'une racine, d'érosion de contact, à l'interface entre deux matériaux différents, de suffusion ou de boulangerie.

2.2.4 Le mécanisme de rupture par affouillement

Les talus des digues côté fleuve, ainsi que ceux des berges qui parfois jouxtent directement la digue, subissent en crue les effets des courants hydrauliques qui peuvent provoquer des érosions à la base des talus.

Le mécanisme de rupture par érosion externe correspond à l'arrachement des particules constituant la digue par le courant de la rivière qui peut éroder la digue jusqu'à sa rupture. D'autres phénomènes, tel que le ruissellement des eaux de pluies, peuvent également être à l'origine de l'érosion externe.

Nous assimilons à l'affouillement le mécanisme d'érosion externe du talus de digue côté fleuve par le courant ou des corps flottants.

L'affouillement correspond à l'érosion externe du pied de la berge, puis à l'érosion externe du corps de digue si celle-ci est proche de la berge. Il en résulte un raidissement de la pente locale qui, associé à l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques (du fait de la saturation des matériaux), entraîne alors des glissements favorisant à leur tour les perturbations hydrauliques (tourbillons) et les érosions.

Par glissements successifs du talus côté fleuve de la digue et/ou de la berge, le mécanisme débouche sur l'ouverture d'une brèche dans le corps de digue.

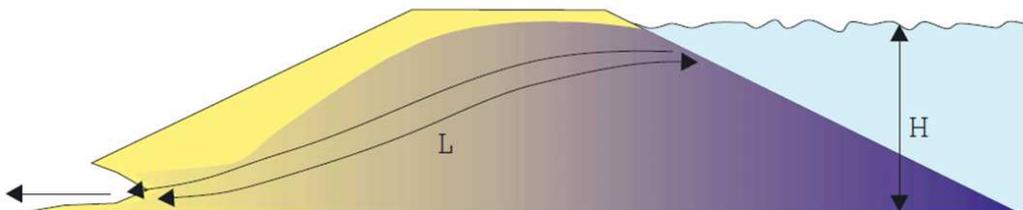


Figure 2-9 : Principe de rupture par érosion interne (Mériaux *et al.*, 2001)

Les facteurs de sensibilité au mécanisme d'affouillement sont de trois ordres (Mériaux *et al.*, 2001) :

- la vitesse moyenne de l'eau le long du talus de digue, qui est liée à la distance de la digue par rapport au lit mineur ou de la berge. De ce point de vue, les digues en bord immédiat du lit mineur (et surplombant directement la berge) sont particulièrement exposées, ainsi que les digues situées dans des zones de rétrécissement du lit majeur ;
- les perturbations hydrauliques locales pouvant entraîner des courants et tourbillons avec des vitesses locales plus élevées que la vitesse moyenne du tronçon. Ainsi des arbres, des piles ou toute construction sur le talus côté fleuve des digues sont la source de telles discontinuités hydrauliques. Il en va de même pour des courbes prononcées dans l'axe de la digue ;
- la nature et l'état de la protection du talus de la digue côté fleuve : un perré en bon état est réputé pouvoir résister à une vitesse moyenne de 4 m/s, alors qu'un talus simplement

enherbé ne supportera pas des vitesses dépassant 1,5 m/s. Le changement de nature de la protection (passage d'une zone de perré à une zone enherbée) constitue aussi un fort facteur de fragilité.

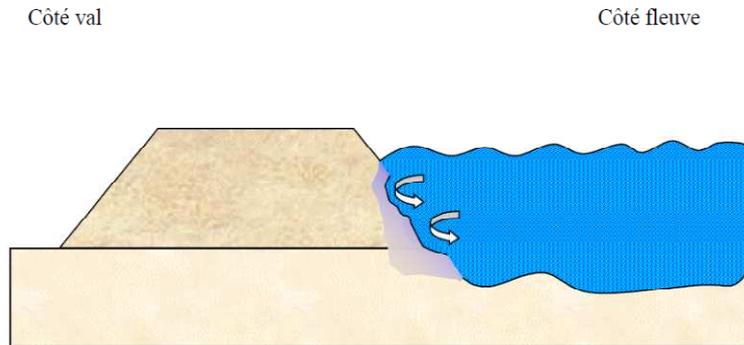


Figure 2-10 : Principe de l'érosion externe (Fauchard et Mériaux, 2004)

2.2.5 Le mécanisme de rupture par glissement

Il existe deux mécanismes de glissement :

- le glissement du talus côté val, qui se produit le plus souvent durant la crue ;
- le glissement du talus côté fleuve, qui se produit lors de la décrue.

Ils peuvent se produire lorsque trois facteurs sont réunis :

- un profil de digue étroit avec pentes de talus fortes (pentes supérieures à 0,65) ;
- une piézométrie élevée dans la digue liée à l'absence de drainage et/ou à la présence de couches hétérogènes ;
- une faible compacité du remblai donnant de faibles caractéristiques mécaniques des matériaux du corps de digue, ou encore la présence d'une couche argileuse sous-consolidée au niveau de la fondation.

Ces trois facteurs sont potentiellement réunis dans les zones d'anciennes brèches dont la réparation n'a pas toujours été menée dans les meilleures conditions (Mériaux *et al.*, 2001). La Figure 2-11 illustre ce mécanisme :

La saturation du remblais et la raideur du talus
provoquent des ruptures de masse par glissement du talus.

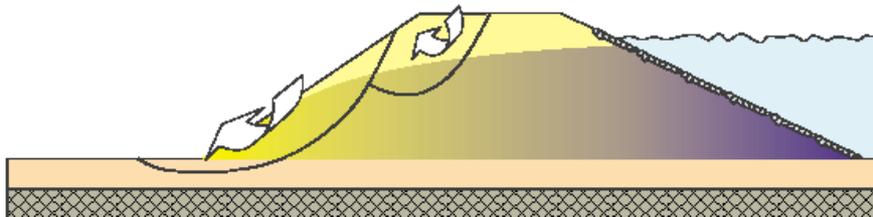


Figure 2-11 : Le mécanisme de glissement côté val en situation de crue (Mériaux *et al.*, 2001)

Le mécanisme de rupture par glissement côté fleuve se produit lors de la décrue rapide du cours d'eau. Ce mécanisme, lié aux sous-pressions qui se développent pendant la période de crue, concerne surtout des talus de digues constitués de matériaux argileux, présentant des pentes raides ou des perrés trop étanches.

Ce mécanisme concerne particulièrement les digues à proximité de déversoirs équipés de remblais fusibles (remblai destiné à se rompre lorsque la hauteur d'eau l'atteint). En effet, la mise en fonction du déversoir s'accompagne de l'érosion rapide du remblai fusible (Goutx *et al.*, 2004). Le débit dérivé dans le déversoir croît, ce qui provoque une décrue dans le fleuve pouvant alors provoquer des glissements de talus côté fleuve (Mériaux *et al.*, 2001).

2.2.1 Synthèse

Nous nous sommes efforcés de définir la terminologie relative aux mécanismes de rupture affectant les digues, parmi lesquels on distingue quatre mécanismes de rupture: la surverse, l'érosion interne, l'érosion externe et le glissement. Les mécanismes de surverse et d'érosion interne sont les plus fréquemment observés et présentent des cinétiques rapides.

2.3 La gestion des digues fluviales

2.3.1 Les gestionnaires de digue

La France compte plus d'un millier de gestionnaires de digues (Tourment, 2007). Les moyens et le statut des structures en charge de ces ouvrages sont très variables. Cela peut-être une commune, un Conseil Général, une personne privée, ou encore une association syndicale. Certains maîtres d'ouvrages peuvent être en charge d'ouvrage très courts, quelques dizaines de mètres de linéaires, tandis que d'autres gèrent des centaines de kilomètres.

Nous remarquons que cette situation est en évolution constante depuis la première décennie du XXIème siècle. La prise de conscience du rôle stratégique des digues, en particuliers suite aux catastrophes récentes (1993, 1994, 2002 et 2003 sur le Rhône, 1999 dans l'Aude et 2002 sur le Gard) a conduit les services de l'Etat à favoriser le regroupement des structures de gestion des digues et l'augmentation de leurs moyens.

Ainsi le SYMADREM (Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer) résulte de la fusion de syndicats gestionnaires des digues du Rhône de 15 communes répartis sur deux régions. Il est en charge de plus de 200 kilomètres de digues fluviales sur le Rhône (Figure 2-12).

D'autres gestionnaires ont aujourd'hui à charge des linéaires de digue conséquents, notamment la DREAL Centre (près de 600 kilomètres de digues sur la Loire et ses affluents) et l'Association Départementale Isère Drac Romanche (près de 250 km de digue).

A termes, la gestion des digues aura vocation à être réalisée par d'importants gestionnaires, disposant de moyens conséquents et gérant de grands linéaires.

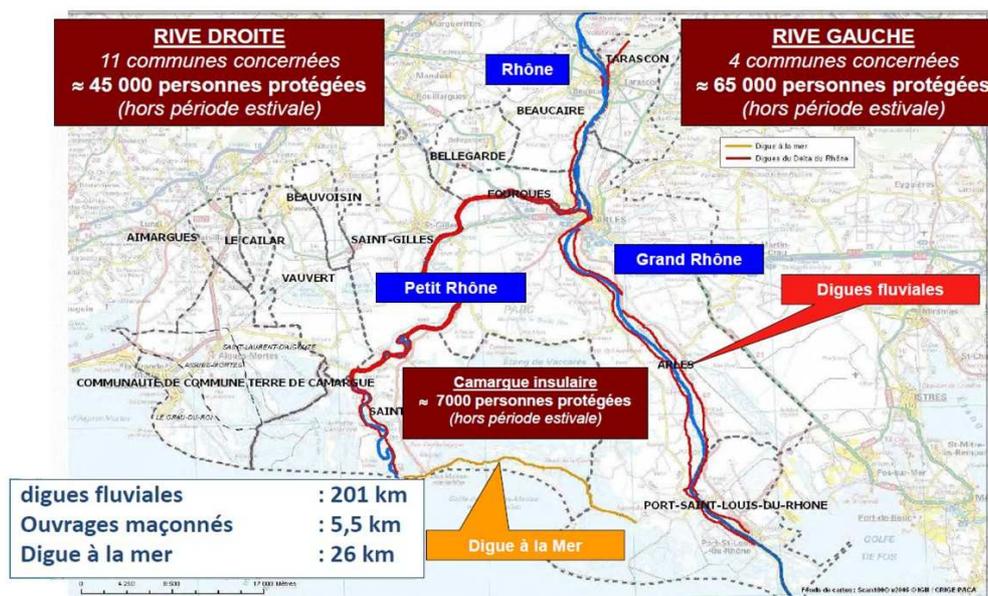


Figure 2-12 : Digues gérées par le SYMADREM (Mallet, 2011)

2.3.2 Une réglementation qui requiert des diagnostics réguliers et des évaluations probabilistes de la sécurité

Le cadre réglementaire des digues fluviales s'est considérablement renforcé au cours des dernières années. La nouvelle réglementation définit les responsabilités des gestionnaires et des services de l'état (décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007) : les premiers sont responsables du suivi de la réglementation tandis que les DREAL sont en charge du contrôle du bon respect de la réglementation. La réglementation précise les obligations des gestionnaires résumées dans le tableau suivant (Tableau 2-1).

		Classe de la digue			
		A	B	C	D
Classification des digues selon leur hauteur (H) et la population présente dans la zone "protégée"		Ouvrage pour lequel $H \geq 1$ et $P \geq 50\,000$	Ouvrage pour lequel $H \geq 1$ et $1000 \leq P \leq 50\,000$	Ouvrage pour lequel : $H \geq 1$ et $10 \leq P < 1000$	Ouvrage pour lequel : soit $H < 1$, soit $P < 10$
Dossier	Obligation	oui	oui	oui	oui
Diagnostic initial de l'ouvrage	Obligation	oui	oui	oui	oui
	Fréquence du rapport	1 an	5 ans	5 ans	-
Surveillance et entretien	Obligation	oui	oui	oui	oui
	Rapport de surveillance	oui	oui	oui	-
Visite technique approfondie	Obligation	oui	oui	oui	oui
	Fréquence du rapport	1 an	2 ans	2 ans	2 ans
Revue périodique de sûreté	Obligation	oui	non	non	non
	Fréquence	Tous les 10 ans	-	-	-
Etude de dangers	Obligation	oui	oui	oui	non
	Fréquence	10 ans	10 ans	10 ans	-

Tableau 2-1 : Réglementation à charge des maîtres d'ouvrages, selon la classification des ouvrages (décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007)

Le gestionnaire d'une digue est chargé de constituer le dossier d'ouvrage où est réunie toute la documentation utile à la gestion de l'ouvrage. Il doit faire réaliser un diagnostic initial des ouvrages et ce diagnostic doit être mis à jour périodiquement lors des Visites Techniques Approfondies ou des Revues périodiques de sûreté.

La grande majorité des digues (classe A, B ou C), doivent faire l'objet d'études de dangers.

La réglementation des études de danger précise que les ouvrages doivent faire l'objet d'une analyse fonctionnelle ainsi qu'une identification et une caractérisation des risques en termes de probabilités d'occurrence. Les études de dangers nécessitent donc l'évaluation des probabilités de rupture pour les différents mécanismes et la détermination des enjeux des zones protégées, permettant d'estimer le niveau de risque pour les zones protégées par la digue. Dans le contexte actuel, nous constatons que les études de dangers des digues sont réalisées au moyen d'analyse qualitative associant les ouvrages à des classes de probabilités, et faisant intervenir le jugement expert.

Dans ce contexte, il apparaît que :

- la réalisation de diagnostics réguliers nécessite de disposer d'outils efficaces pour réaliser le diagnostic des linéaires de digues ;
- les ouvrages feront de plus en plus l'objet d'études et d'inspections, augurant d'une augmentation sensible des données disponibles pour leur diagnostic ;
- la majorité des digues doit faire l'objet d'études de dangers, et donc nécessite une évaluation probabiliste des risques.

2.3.3 Les systèmes d'informations géographiques disponibles pour la gestion des digues

2.3.3.1 Le SIRS Digues : un système d'information pour les digues fluviales

Le SIRS Digues (Système d'Informations à Références Spatiales) est une application géomatique développée à partir de 1998 à l'initiative du Cemagref d'Aix-en-Provence. Il est destiné aux gestionnaires locaux de digues fluviales pour les aider à gérer leur capital d'informations sur ces ouvrages (Maurel, 2004).

Cet outil est basé sur un modèle de description de digue conçu dès le départ comme le plus générique possible. Il repose sur l'exploitation d'une base de données contenant la géométrie des objets géographiques et leur description : structure et géométrie de la digue, caractérisation géotechnique, réseaux traversant les digues, désordres, historique des crues, travaux et études, végétation, organismes et intervenants, etc. Le SIRS Digues permet de centraliser l'information sous forme cartographique, de réaliser des requêtes et divers type d'analyses sur les données stockées, de garder la mémoire des évènements, de produire des cartes et des rapports automatiquement (Maurel, 2004; Moins et Maurel, 2006).

Le SIRS Digues constitue donc un outil de gestion des informations des digues et ne permet pas d'évaluer la performance des digues et leur aptitude au service, ni la vulnérabilité des zones protégées et leur importance stratégique au sein du parc.

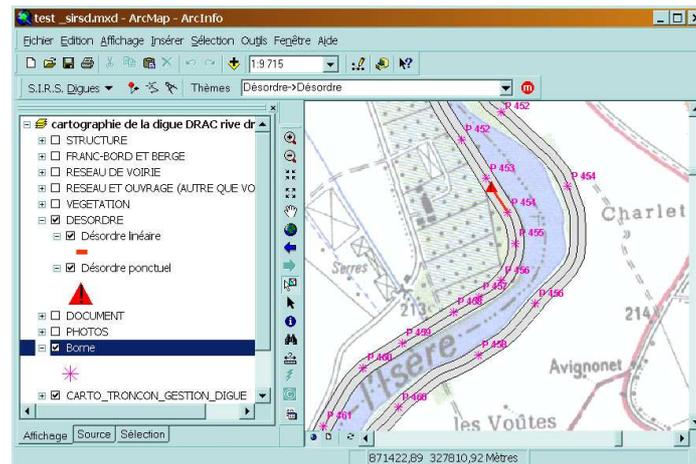


Figure 2-13 : Illustration du SIRS digue

2.3.3.2 Les outils de gestion de digues à l'international (Pays Bas, USA)

Aux Pays-Bas, l'enjeu lié aux digues est crucial : une grande partie du territoire est en effet situé en dessous du niveau de la mer et il faut donc en permanence se protéger de l'invasion de l'eau. Deux SIG ont été développés :

- le High water Information System (HIS) : l'objectif du HIS est de gérer une crise en cas d'inondation et d'établir des plans de secours. L'outil permet de délimiter les champs d'inondation en cas d'absence d'ouvrages de protection contre les inondations. Cet outil est à rapprocher de la cartographie PPRI (Plans de Prévention des Risques d'Inondation).
- le INTEgral Water Information System (INTWIS) : la vocation de ce SIG est la gestion de l'eau (qualité des eaux et études des crues). Toutefois, même si ce SIG n'est pas dédié à la maintenance des digues, il reste intéressant dans le sens où les digues font partie intégrante du système. En particulier, la hauteur des digues est prise en compte afin de déterminer l'aléa de surverse.

Ces deux SIG s'intéressent essentiellement au risque d'inondation et à la gestion de crise. Ils n'ont pas pour vocation l'aide à la gestion d'un parc de digues.

Aux Etats-Unis, le colloque « Geospatial Technologies 2006 Symposium » s'est tenu à Denver (USA) en mars 2006, dédié à l'utilisation des SIG pour la gestion de l'environnement et des risques : <http://www.jsemconference.com/2006/>. Une session de ce colloque a été consacrée à la gestion des digues à l'aide d'outils de géoréférencement et a permis de faire un état des lieux sur les outils existants en matière de gestion des digues en Amérique du nord. Il a permis notamment d'approfondir nos connaissances sur le SIG Américain dédié à la gestion des digues : le SIG Levee Inspection System (Pangburn, 2006). Cet outil a été développé par l'US Army Corps of Engineers et il est utilisé par l'ensemble des gestionnaires de digues Américains.

Dans cet outil, les données relatives aux digues sont stockées dans le SIG et peuvent être cartographiées. Toutefois, il n'est pas possible d'évaluer et de cartographier l'aptitude au service du parc de digues, ni la vulnérabilité des zones endiguées.

Des outils SIG d'aide à la gestion des digues sont disponibles, mais aucun ne propose encore de fonctionnalités pour l'évaluation de la performance des ouvrages.

2.4 Synthèse :

Nous avons précisé la situation des digues en France, leurs particularités et la réglementation fixant les obligations des maîtres d'ouvrage. Les digues fluviales posent des problèmes considérables aux gestionnaires, du fait de la complexité de leurs structures, de la variété et de la faible documentation disponible sur les linéaires.

Généralement, les digues sont des ouvrages présentant une sécurité perfectible et faiblement documentés. Toutefois, l'action publique a conduit ces dernières années à des progrès sensibles, avec dorénavant certains ouvrages correctement diagnostiqués et pouvant bénéficier de données satisfaisantes.

Par ailleurs, la nouvelle réglementation prévoit la réalisation de diagnostics périodiques nécessitant des méthodes et des outils pour évaluer la performance des digues et d'études de dangers, encourageant l'évaluation probabiliste de la sécurité des ouvrages. Ainsi, il apparaît nécessaire, pour le diagnostic des digues, de disposer de méthodes et d'outils pour l'évaluation de leurs niveaux de performance dans un cadre probabiliste.

Chapitre 3 Evaluation de la performance des digues

Dans ce chapitre, nous présentons les pratiques actuelles de diagnostic de l'ingénierie, les travaux de recherches récents permettant la modélisation des critères de décision pour l'évaluation des digues et permettant l'amélioration de la connaissance des ouvrages et de leurs mécanismes de défaillance.

3.1 Pratiques actuelles de l'ingénierie pour évaluer la performance des digues fluviales

Les pratiques de diagnostic de l'ingénierie reposent sur les étapes d'études progressives suivantes (Fauchard et Mériaux, 2004).

3.1.1 *Etudes préliminaires*

Les études préliminaires comprennent l'analyse de l'historique de la digue, les levés topographiques, l'inspection visuelle détaillée, l'étude géologique, les études hydrologiques, hydrauliques et morpho dynamiques. Cette phase est déterminante pour la suite de l'étude. Elle permet de dresser un premier diagnostic de l'ouvrage, de préciser la nécessité et la localisation d'investigations géotechniques/géophysiques complémentaires à mener.

La recherche d'éléments historiques est un point essentiel dans l'élaboration des diagnostics des digues. Compte tenu de l'ancienneté générale des ouvrages du parc Français, l'analyse historique implique un travail d'investigation, au près des maîtres d'ouvrages, des archives départementales, bureaux d'étude, services techniques des communes et des services de contrôle. Elle doit permettre de rassembler les informations existantes sur la constitution des ouvrages, incluant leur remaniement au cours du temps ou la localisation des anciennes brèches.

Les reconnaissances **topographiques** répondent à trois objectifs (Mériaux *et al.*, 2001):

- établir le lien avec les lignes d'eau de crue ;
- préciser les profils en travers pour les études géotechniques ;
- fournir un instrument de report et de suivi des digues.

L'inspection visuelle consiste à parcourir intégralement le linéaire de digue à pied. Elle permet de relever et de géo référencer toutes les informations visuelles relatives à la constitution des digues et aux désordres ou indices de désordres. Elle est incontournable pour établir un diagnostic et l'élaboration d'un suivi ultérieur. L'inspection visuelle doit être réalisée avant toute prospection géotechnique dont elle permettra d'éclairer les modalités de mise en œuvre (Mériaux *et al.*, 2001).

Les études **hydrologiques** et **hydrauliques** doivent permettre de définir les périodes de retour des crues susceptibles de solliciter la digue et de modéliser les lignes de hauteurs d'eau associées. La comparaison des lignes d'eau pour différentes périodes de retours de crues avec le profil en long des digues permettra de définir l'événement de référence, qui est l'événement extrême pour lequel les digues assurent une protection.

L'*étude morpho dynamique* a pour objet de définir les contraintes de divagations et l'érosion latérale du cours d'eau. L'expertise morpho dynamique d'un secteur doit permettre de faire le point sur les phénomènes d'érosions, de divagations, les zones de dépôt de matériaux (naturelles et artificielles), les zones d'enfoncement, les impacts des aménagements réalisés et les perspectives d'évolution à moyen et long termes.

3.1.2 Reconnaissances géophysiques et géotechniques

La *reconnaissance géophysique* consiste à déduire les caractéristiques internes des digues en étudiant les variations d'un champ physique mesuré selon les profils en long. Les résultats donnent une image interne de digue sur tout le linéaire. Les reconnaissances géophysiques (Figure 3-1) permettent de refléter la nature et la répartition des matériaux, la présence d'hétérogénéités ou de conduites. L'interprétation des résultats des investigations géophysiques est délicate et il est souvent nécessaire de procéder à des sondages géotechniques afin de connaître la nature des matériaux représentés.

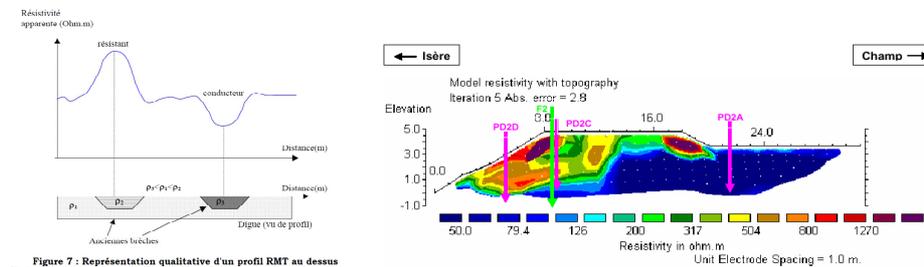


Figure 3-1 : Exemples de reconnaissances géophysiques : profil RMT et panneaux électriques (Fauchard et Mériaux, 2004)

La *reconnaissance géotechnique* consiste à mettre en œuvre des essais de caractérisation des sols, in situ, ou en laboratoire. Cette étape permet une connaissance fine de la constitution de la digue et des caractéristiques hydromécaniques de ses éléments. Compte tenu de son coût élevé, elle ne peut être envisagée que ponctuellement sur l'ensemble d'un linéaire. Le choix de la localisation de ces sondages peut dépendre de l'importance des enjeux de la zone protégée, ou de la représentativité supposée du point de mesure, en fonction des étapes connues de constructions, de la présence de brèches historiques comblées ou des variations de mesures géophysiques. Il existe plusieurs essais géotechniques : sondages à la pelle mécanique et prélèvement pour l'identification et la caractérisation du remblai, essais au pénétromètre pour la compacité du sol, tests de type Nasberg ou Lefranc pour la perméabilité, etc.

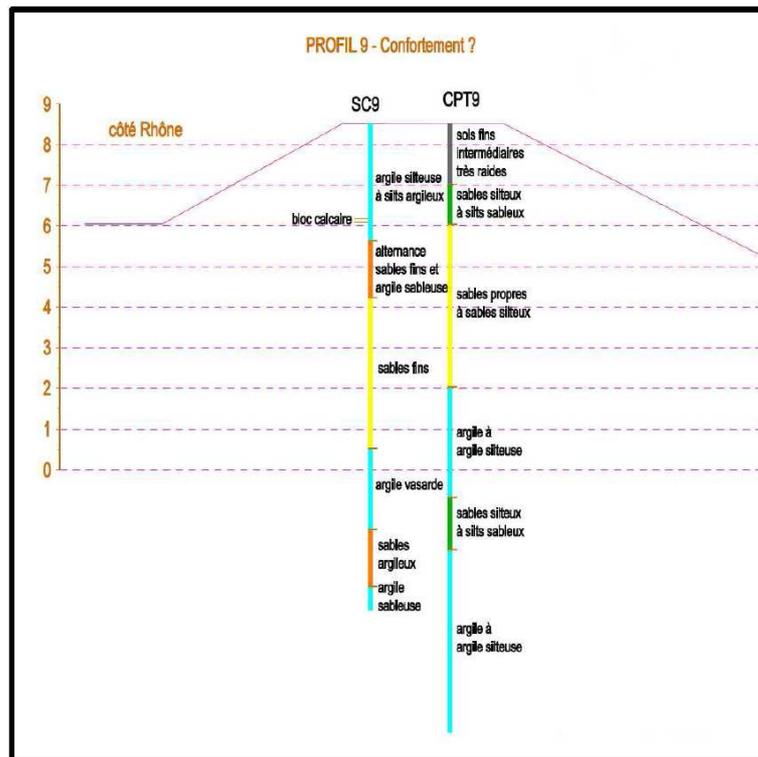


Figure 3-2 : Exemple de sondages et caractérisation locale des matériaux d'une digue du petit Rhône

3.1.3 Modélisation numérique

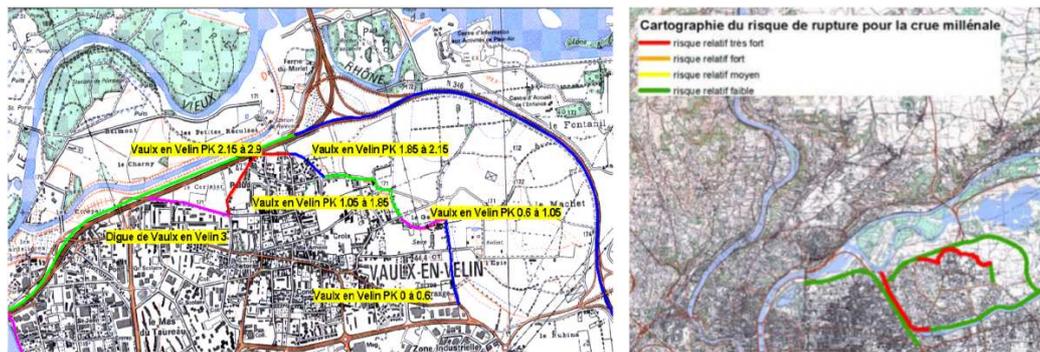
Sur les profils ayant fait l'objet de reconnaissances géotechniques conséquentes, il est possible de calculer les coefficients de sécurité des digues vis-à-vis de certains mécanismes de rupture, dont le mécanisme de glissement. A ce titre, la **modélisation numérique** permet de tester rapidement les différents cas de charge et les différentes situations de projet.

La modélisation numérique trouve essentiellement ses limites dans la qualité et la représentativité des données servant à fixer les paramètres du modèle. Ainsi, pour les digues dont les levés et investigations sont hétérogènes, certains paramètres sont difficiles à obtenir de façon représentative et fiable, en particulier les caractéristiques mécaniques.

3.1.4 Evaluation qualitative des digues par tronçons homogènes

Lors des études de diagnostic de digue, la pratique de l'ingénierie procède par découpage des linéaires en unités de constitution et de sollicitation homogènes. Cette pratique conduit à identifier ainsi des tronçons homogènes (Figure 3-3) que l'on peut représenter chacun par un profil transversal, ponctuel sur le linéaire de digue. Le niveau de performance de chaque profil est ensuite évalué qualitativement au moyen de classes de performance (Lino *et al.*, 2000; Fauchard et Mériaux, 2004).

On remarque que pour chaque étude de diagnostic, l'ingénieur doit interpréter les données disponibles sur les profils, à partir de leur analyse, découper la digue en tronçons homogènes en faisant appel au jugement expert.



3.1.5 Synthèse

La méthodologie de diagnostic utilisée par l'ingénierie permet d'aboutir in fine à une connaissance structurale des tronçons de digues. Cette connaissance est plus ou moins complète et fiable, selon les investigations réalisées.

Toutefois, elle présentera toujours les limites suivantes:

- elle demeure essentiellement qualitative, l'évaluation des digues se faisant à partir de grilles qualitatives ;
- elle produit des évaluations sur des tronçons homogènes, sachant que la notion de tronçon homogène est mal définie et que le découpage est établi par expertise ;
- elle reste déterministe et ne prend pas en compte les incertitudes des données utilisées, ni ne rend compte de leur impact sur le niveau de performance déterminé.

3.2 Apports récents de la recherche

3.2.1 Modélisation fonctionnelle des digues pour le mécanisme de liquéfaction

Lepetit (2002) a réalisé des travaux de modélisation fonctionnelle pour le risque de liquéfaction des digues en charge permanente. La démarche met en œuvre des méthodes issues de la sûreté de fonctionnement, en particulier l'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets. Elle permet l'analyse de scénarios de dégradation critiques pour un ouvrage type. La nature des dégradations, leur criticité ainsi que l'échelle d'observation conditionnent les techniques retenues et l'organisation de la méthode. L'exploitation de ces résultats a permis la mise en œuvre de techniques efficaces et économiques pour estimer la stabilité mécanique de l'ouvrage et, après des séries d'essais sur matériaux limoneux, à l'établissement de critères de résistance post sismique de ce matériau.

3.2.2 Modélisation fonctionnelle des digues et critères de décision pour le diagnostic rapide des digues fluviales

Suivant une démarche de modélisation fonctionnelle basée sur l'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets, (Serre, 2005) propose la construction d'indicateurs de performance pour l'évaluation des digues fluviales.

La modélisation fonctionnelle permet d'identifier et de lister les critères d'évaluation des digues. Serre (2005) propose ensuite un modèle déterministe d'évaluation de la performance des digues, basé sur une méthode d'aide à la décision multicritère : l'affectation à base de règles. La méthode permet de renseigner des critères d'évaluation des digues et la construction d'indicateurs de performance (Figure 3-4). Les indicateurs de performance sont ensuite intégrés à un SIG permettant de cartographier la performance des ouvrages.

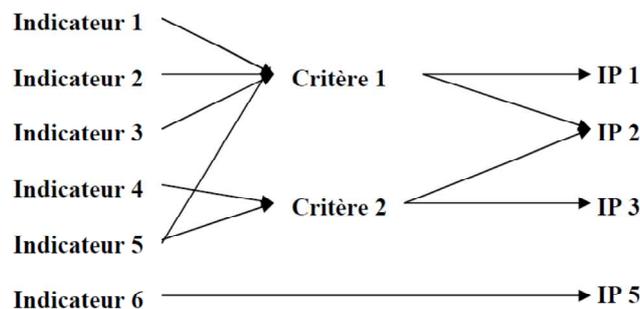


Figure 3-4 : Construction d'indicateurs de performance (IP) pour les digues (Serre, 2005)

L'affectation à base de règles repose sur un principe de type SI...ET...ALORS, pour le renseignement des scores des critères d'évaluation des digues à partir d'indicateurs issus essentiellement de l'inspection visuelle des ouvrages (Figure 3-5). Exemple : SI, il y a présence de grands arbres ayant leurs racines dans la recharge amont étanche, ALORS, le critère devra être évalué selon une valeur située sur l'intervalle [8-10]. Ces règles sont déclinées ensuite pour l'agrégation des critères jusqu'à l'obtention d'un score de performance pour le mécanisme de rupture. Le modèle développé par (Serre, 2005) permet une évaluation rapide et de premier ordre de grandeur des digues fluviales. Ce travail constitue le point de départ de nos travaux de recherche.

		Critère "Racines dans la recharge amont étanche"											
sous-critère	indicateur	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
grands arbres	contact étanchéité										X	X	X
	hors étanchéité				X	X	X	X					
	excellence	X											
petits arbres	contact étanchéité									X	X	X	
	hors étanchéité				X	X							
	excellence	X											
buissons	contact étanchéité				X	X							
	hors étanchéité			X	X								
	excellence	X											

Figure 3-5 : Evaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche » (Serre, 2005)

Nous retenons néanmoins quelques limites du modèle :

- il est basé essentiellement sur les données visuelles et reste limité au diagnostic rapide. Il sera peu pertinent pour le diagnostic approfondi, nécessitant de mobiliser des données complètes et de différentes natures (visuelle, géophysique, géotechniques) ;
- il est de nature déterministe et qualitatif : il ne permet pas de modéliser les incertitudes inhérentes aux données des digues et au jugement expert, ni n'associe de probabilités de rupture aux niveaux de performance des ouvrages.

3.2.3 Recherches sur la connaissance des mécanismes de dégradation des ouvrages

Des recherches sont en cours pour améliorer la connaissance du comportement des digues. Parmi ces travaux, nous pouvons citer les projets suivants :

- Le projet de recherche **ERINOH** (2007-2011) porte sur les mécanismes d'érosion interne des ouvrages en remblai. Il est articulé sur huit thèmes : base de données et grille d'analyse, seuils et cinétiques d'érosion, simulation migration/ colmatage, pérennité des parois et des sols injectés, logiciel de modélisation de renard, méthodes de détection d'érosion interne, tests et expérimentations en vraie grandeur, recommandations pour la profession.
- Le projet de recherche **Levees** porte sur la modélisation numérique et physique des ouvrages relativement au risque d'érosion. Les recherches sont notamment focalisées sur
 - o la rupture des digues par érosion interne diffuse, avec comme résultats prévus de meilleurs outils de diagnostic ;
 - o la cinétique d'érosion externe d'une digue fluviale soumise à une surverse, avec comme résultats prévus la caractérisation des capacités de résistance des digues selon leurs constitution et la présence de protections végétales.
- Le projet de recherche **DETECINE**, qui a pour objectif d'examiner la faisabilité d'une méthode non destructive de détection et cartographie des racines ligneuses dans les digues susceptibles de menacer la sécurité des ouvrages hydrauliques.
- Le projet de recherche International Levee Handbook (**ILH**), qui vise à produire un ouvrage international de référence sur les digues ;

- Le projet de recherche **LIQUEPAC**, portant sur l'évaluation du mécanisme de liquéfaction des digues.

3.2.4 Des recherches pour la gestion patrimoniale des digues

Le projet de recherche **Digsure** (2009-2012) a pour objectif la production d'un outil de gestion patrimoniale spécifique pour les digues fluviales. Il ambitionne de produire :

- un outil d'aide à l'ingénierie spatialisé permettant de prendre en compte les variations de l'information et des incertitudes tout au long des linéaires.
- un outil de suivi en continue de la performance des ouvrages, avec une aide à la priorisation des actions d'IMR du gestionnaire et l'intégration de la vulnérabilité des zones protégées.

Pour répondre à ces objectifs de répondre à ces besoins, le projet s'articule en trois parties :

- un axe de recherche visant à la production d'un modèle d'évaluation de la performance des linéaires de digues, intégrant les grands modes de rupture des ouvrages et la prise en compte des incertitudes de l'information ;
- un deuxième axe de recherches, pour la production d'indicateurs de vulnérabilité des zones protégées ;
- un troisième axe, technique, de production d'un outil SIG d'aide à la décision.

Nos travaux de thèse s'inscrivent dans l'axe 1 de ce projet de recherche.

3.2.5 Recherches intégrant les digues dans les problématiques globales du risque inondation

Le projet **FloodProBE** (2009-2013) ambitionne le développement de technologies, de méthodes et d'outils sur le risque inondations. Le projet traite notamment de la compréhension de la vulnérabilité, de la résilience aux inondations et de l'adaptation des bâtiments, des infrastructures et des digues de protection.

3.2.6 Recherches sur les méthodes de collecte des données

De nouvelles méthodes de reconnaissance issues de la recherche sont en cours de développement et/ou depuis peu opérationnelles. Ainsi, dans le cadre du diagnostic des digues, le projet « FliMap-Digues » porte sur l'utilisation, d'un dispositif laser hélicopté de technologie LiDAR (*light detection and ranging*). Des recherches en cours (Clément et Mériaux, 2007; Vennetier *et al.*, 2010), visent à élargir l'utilisation du dispositif FliMap à un cadre plus général que celui du seul levé topographique des digues, et en particulier :

- à la collecte de données géoréférencées et à leur intégration dans un SIG ;
- à la reconnaissance des digues en termes de désordres structuraux ;
- à la caractérisation de la végétation des digues ;
- à la caractérisation géomorphologique des berges ou de l'espace entre la digue et le fleuve (franc-bord).

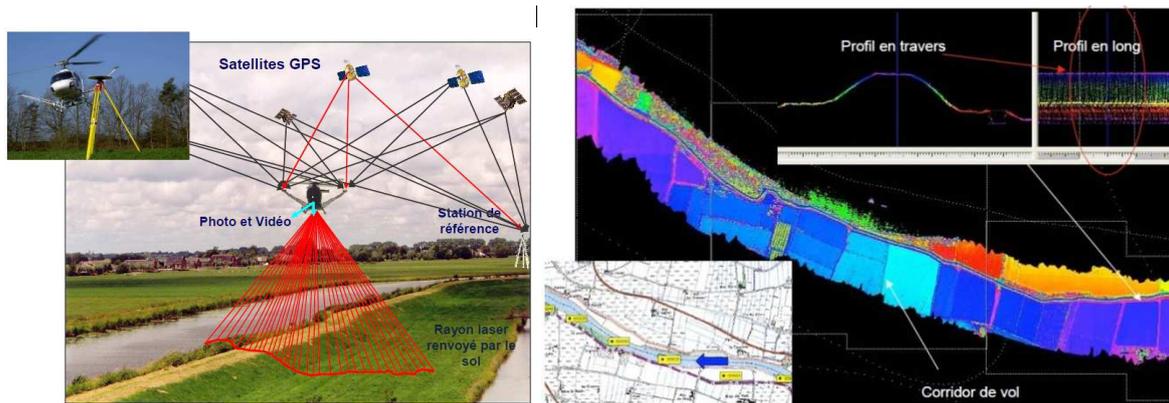


Figure 3-6 : Illustration de la technologie FliMap-Digues

3.2.7 Synthèse

Les digues font l'objet de nombreuses recherches. De nouveaux outils permettent une meilleure connaissance des mécanismes de dégradation des digues, des moyens de collecte des données sur les ouvrages et de plus grandes possibilités de modélisations physiques et numériques des mécanismes de rupture des digues.

Par ailleurs, un premier modèle déterministe d'évaluation rapide et de première ordre de la performance des digues, basé sur l'adaptation de méthodes issues de la sûreté de fonctionnement et de l'aide à la décision multicritère est proposé par (Serre, 2005). Ce travail original dans la l'évaluation des digues constitue la base de départ pour notre recherche.

Chapitre 4 Questions scientifiques et démarche de la thèse

4.1 Contexte

Nous avons dressé un panorama du parc français de digues. Il est apparu que les digues en remblai homogène constituent la grande majorité des linéaires. Ces ouvrages sont souvent anciens, mal connus, mal entretenus et parfois sous dimensionnés.

En réponse à cette situation, la réglementation française en matière de sécurité des ouvrages hydrauliques s'est récemment renforcée. Désormais, les digues fluviales doivent faire l'objet de diagnostics systématiques et de visites techniques périodiques. Les digues présentant les plus forts enjeux nécessitent la réalisation d'études de dangers et de revues de sûreté, dans un cadre probabiliste.

Même si la situation s'est améliorée ces dernières années et continue de s'améliorer, ces ouvrages sont caractérisés par une faible quantité de données disponibles. Les pratiques actuelles de diagnostic réalisé par l'ingénierie reposent sur différents niveaux d'investigation réalisés sur des profils ponctuels (Fauchard et Mériaux, 2004) et sur des interpolations ou extrapolations des résultats obtenus aux niveaux des profils à des tronçons homogènes identifiés par expertise. La démarche d'évaluation est qualitative et déterministe.

Des recherches ont été menées dans le but de construire un modèle d'aide à la gestion patrimoniale des digues (Serre, 2005). Elles ont permis une modélisation des mécanismes de rupture des digues, l'identification d'indicateurs d'évaluation des digues et leur agrégation en critères d'évaluation.

4.2 Questions scientifiques

Dans ce contexte, notre travail de recherche a pour objectif l'élaboration d'un modèle d'évaluation de la performance des digues fluviales avec, in fine, l'objectif de fournir des méthodes de diagnostic destinées aux ingénieurs. Ce modèle devra permettre :

- de réaliser un diagnostic, plus ou moins complet en fonction des données disponibles ;
 - o un diagnostic de premier ordre si les données sont peu abondantes ;
 - o un diagnostic approfondi si l'on dispose de données complètes (géophysiques, géotechniques, modalisation numérique, etc.) ;
- une évaluation quantitative de la performance des digues ;
- une évaluation des ouvrages qui tienne compte de l'incertitude des données :
 - o si les données sont abondantes, le modèle devra permettre des démarches basées sur des analyses statistiques;
 - o à défaut, le modèle devra permettre l'utilisation du jugement expert dans l'évaluation des ouvrages.

Les questions scientifiques inhérentes à ces objectifs sont les suivantes :

- comment modéliser les mécanismes de ruptures des digues en remblai homogène, et comment identifier les critères d'évaluation des digues intégrant l'ensemble des dimensions considérées par l'ingénierie pour leur évaluation ?
- comment construire un modèle d'aide à la décision pour les digues tenant compte de l'ensemble des critères d'évaluation ?
- comment définir des tronçons homogènes du point de vue de leur performance, à partir de données évaluées sur des profils ponctuels ?
- quelles sont les formes d'imperfection des données des digues et comment les modéliser et les prendre en compte pour l'évaluation de performance des ouvrages ?

Ce travail recherche, s'intègre dans le projet de recherche finalisé Digsure. Il doit aboutir à des méthodes opérationnelles pour le diagnostic et le suivi des digues, utilisables par les ingénieurs et les services techniques des gestionnaires. A ce titre, ces recherches devront permettre la construction d'un modèle d'évaluation de la performance des linéaires que l'on pourra intégrer dans un outil SIG de gestion patrimoniale des digues.

4.3 Proposition

Pour notre recherche, nous disposons de plusieurs méthodes adaptées à nos besoins provenant de divers domaines scientifiques :

- les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, pour la représentation, la modélisation du comportement, l'analyse des défaillances et la modélisation des mécanismes de rupture des digues (*Analyse Fonctionnelle, Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets, arbre de défaillance et modèles qualitatifs*) ;
- les méthodes issues de la Recherche Opérationnelle, en particulier l'aide à la décision multicritère (*méthode de surclassement, critère unique de synthèse, affectation à base de règles*) ;
- les méthodes pour la prise en compte des données imparfaites et permettant d'exploiter le jugement expert (*théorie des probabilités, théorie des sous ensembles flous, théorie des possibilités, masse de croyance*) ;
- des méthodes issues de la fiabilité pour la propagation des incertitudes dans le modèle (*simulations de Monte-Carlo, combinaisons de sous ensembles flous, etc.*) ;
- les méthodes et outils issus des Sciences de l'Information Géographique, pour la construction d'outils spécifiques pour le suivi des digues SIG (*Système d'Information Géographique*).

Le point de départ de nos recherches sont les travaux établis dans le cadre de la thèse de Damien Serre, réalisée au Cemagref (aujourd'hui IRSTEA) et soutenue en 2005 à l'Université Paris-Est-Marne-La-Vallée. Ces travaux permettent de bénéficier d'un modèle fonctionnel pour représenter les mécanismes de rupture digues, leurs critères d'évaluation et indicateurs d'état associés et d'une base de règle pour le renseignement des critères.

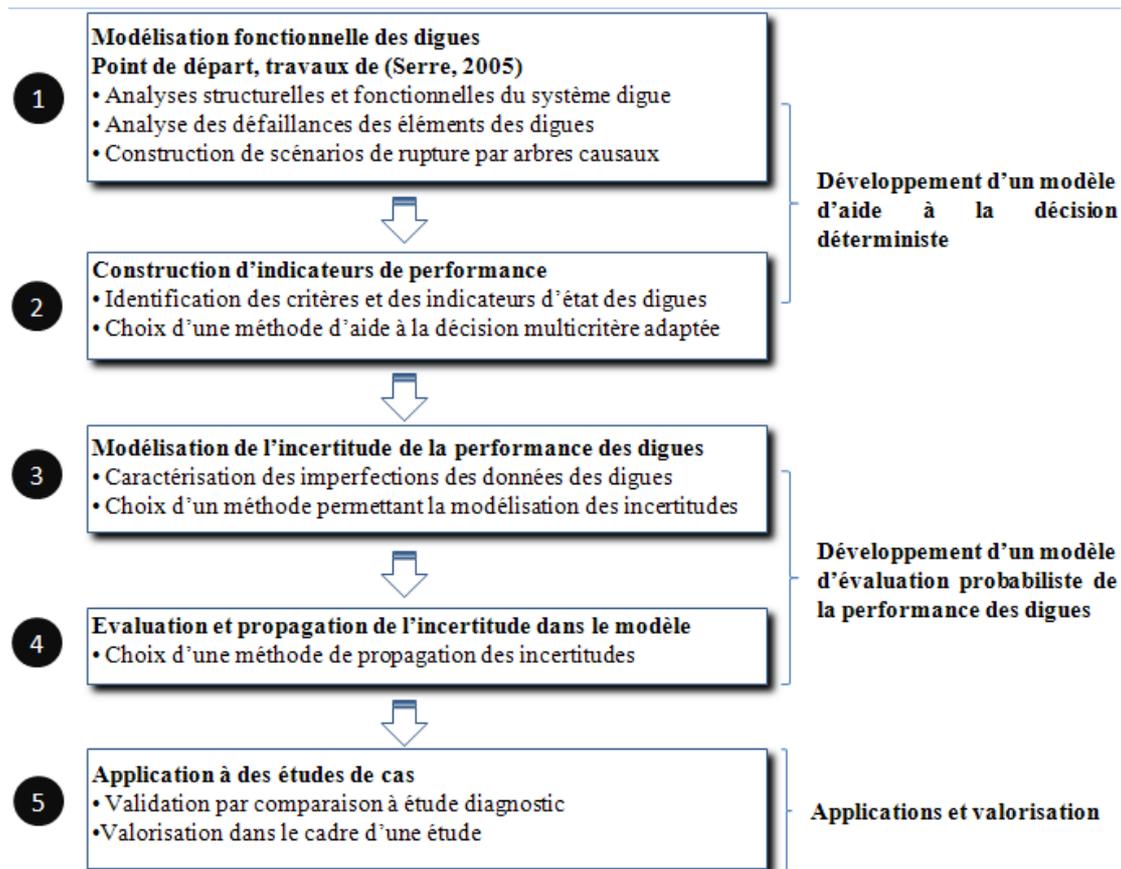


Figure 4-1: Démarche générale de la thèse

Nous construisons notre méthodologie de recherche selon les étapes ci-dessus (Figure 4-1).

Les travaux de (Serre, 2005) constituent la base de la première étape relative à la modalisation fonctionnelle du système digue (cf. Partie 2). Elle comporte trois sous étapes :

- l'analyse du système de génie civil d'un point de vue structurel et fonctionnel ;
- la mise en œuvre de méthode de la Sûreté de Fonctionnement pour décrire les fonctions et les défaillances de ce système ;
- une représentation des mécanismes de rupture des digues à partir des méthodes issues de la modélisation qualitative.

A partir de la modélisation des mécanismes de rupture, nous proposons dans l'étape 2 des indicateurs et des critères pour évaluer la performance des digues et l'adaptation d'une méthode d'aide à la décision multicritère susceptible de permettre l'évaluation de la performance des ouvrages (cf. Partie 2).

Dans les étapes 3 et 4, nous recherchons des méthodes permettant le développement d'un modèle prenant en compte les imperfections des données d'entrée et le jugement expert, et leurs propagations jusqu'aux indicateurs de performance (cf. Partie 3).

Enfin dans l'étape 5, nous présentons la validation et la valorisation du modèle sur des études de cas (cf. Partie 4).

Partie 2

Développement d'un modèle d'aide à la décision déterministe

Chapitre 5 Modélisation fonctionnelle des modes de rupture des digues

Dans ce chapitre, nous présentons les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement mises en œuvre pour la modélisation des mécanismes de rupture des digues en remblai homogène. Il s'agit des méthodes de l'analyse fonctionnelle, de l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE) et d'une analyse basée sur un raisonnement qualitatif. Leur mise en œuvre permet la modélisation des mécanismes de rupture des ouvrages sous la forme de scénarios enchaînant les possibles défaillances des composants des digues pouvant mener à la rupture d'un ouvrage. Elle permet également de recenser les mécanismes de dégradation des digues, leurs indicateurs et leurs moyens de détection. Le travail produit dans ce chapitre repose en partie sur la recherche menée dans le cadre de la thèse de D. Serre en 2005.

5.1 Méthodes de modélisation des systèmes complexes et du raisonnement qualitatif

5.1.1 Les méthodes pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes

Par système complexe, on entend un système composé d'un grand nombre d'éléments qui interagissent entre eux de façon non linéaire et dans lequel les relations de cause à effet ne sont pas toujours établies scientifiquement et nécessitent une part d'intuitif (Simon, 1991).

Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement ont été développées, à l'origine, pour étudier des systèmes industriels au fonctionnement complexe (nombre de composants très important, défaillances multiples et bouclées...) pour lesquels il est difficile, voire impossible, de produire un modèle de fonctionnement par des approches physiques classiques (Villemeur, 1988).

Nous avons vu dans la partie I que les digues sont l'objet de processus physiques complexes, redondants et progressifs. La complexité des processus physiques conduisant à leur dégradation et le manque de connaissances sur les ouvrages rendent aujourd'hui le système digue difficilement modélisable par des approches physiques ou statistiques.

Dans ce contexte, les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement apparaissent adaptées à la modalisation systémique des digues. Ces méthodes peuvent être qualitatives (APD, AMDE, MCPR...) ou quantitatives (AMDEC, MAC, MAE...). Une présentation détaillée de ces méthodes est consultable dans (Villemeur, 1988; Peyras, 2003). Dans le corps du rapport, nous nous limiterons à la description des méthodes utilisées par (Peyras, 2003) et (Serre, 2005) pour la modélisation fonctionnelle des ouvrages : l'analyse fonctionnelle, l'analyse des modes des défaillance, de leurs causes et de leurs effets et les modèles du raisonnement qualitatif (Figure 5-1).

- l'analyse fonctionnelle du système, permettant d'identifier, de formaliser et d'étudier les fonctions du système et de ses composants ;

- l'analyse des modes de défaillance, de leurs causes et de leurs effets permet de recenser les défaillances susceptibles d'empêcher ou d'altérer les fonctions du système, leurs causes, leurs effets et les indicateurs associés ;
- les méthodes du raisonnement qualitatif permettent de représenter les défaillances du système sous forme de graphes causaux.

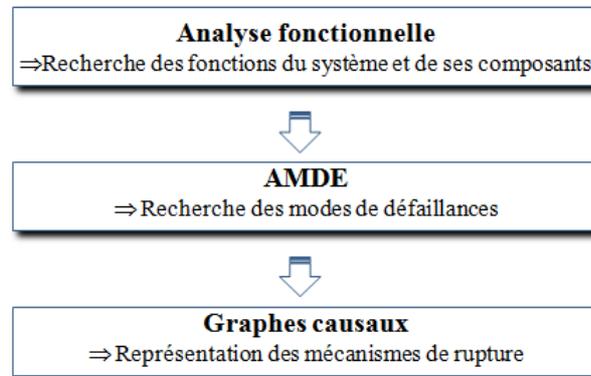


Figure 5-1 : Organisation de la démarche de modélisation fonctionnelle des digues

Nous reprenons en annexe A une description des autres méthodes à laquelle nous renvoyons le lecteur intéressé.

5.1.2 L'analyse fonctionnelle

Par opposition à l'approche matérielle, l'*analyse fonctionnelle* s'appuie sur les fonctions d'un système pour comprendre son fonctionnement. Elle établit de façon systématique et exhaustive les relations fonctionnelles à l'intérieur et à l'extérieur d'un système.

Selon la norme NF X50-150, *une fonction* est définie comme les « actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimées en terme de finalité ». L'analyse fonctionnelle est une démarche (Figure 5-2) qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système. Plusieurs méthodes d'analyse fonctionnelle existent et sont liées aux fonctionnalités du système à étudier. Parmi celles-ci les méthodes Reliasep, FAST, Den, APTE, SADT, MERISE etc.(Zwengelstein, 1996). Nous adoptons la méthode APTE et nous envoyons le lecteur intéressé vers (Serre, 2005) pour de plus amples informations.

La méthode APTE est constituée d'une analyse fonctionnelle interne et externe (Figure 5-2) :

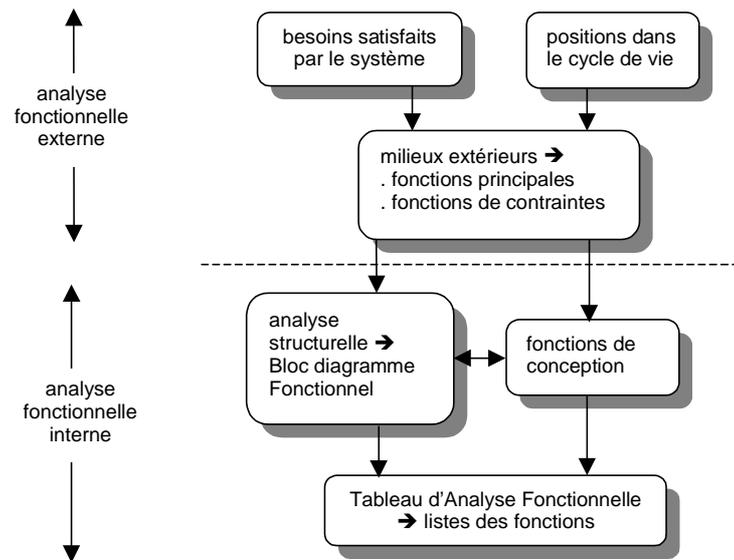


Figure 5-2 : Processus de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)

L'analyse fonctionnelle externe comprend la mise en évidence du besoin satisfait par le système (cycle de vie, cas d'utilisation) et la recherche des milieux extérieurs (particuliers au système, propres au milieu environnant ou à l'exploitation du système...). Elle permet la compréhension et la description synthétique des limites du système considéré, son environnement et les fonctions qu'il remplit (Zwingelstein, 1996).

L'analyse fonctionnelle interne comprend l'analyse structurelle du système. Elle permet de définir les positions et les relations des différents composants du système. Il est ainsi possible de formuler les fonctions de chaque composant : contact et flux (Zwingelstein, 1996).

Une **analyse structurelle** permet de recenser tous les composants constituant un système et de repérer leur position géographique et physique (relation avec les autres composants).

Un composant est un élément matériel ou ensemble matériel remplissant une fonction particulière dans un système ou un sous-système (Zwingelstein, 1996).

L'analyse fonctionnelle s'appuie sur l'identification des composants fonctionnels du système par l'utilisation de blocs diagrammes fonctionnels (BdF). Le BdF est une représentation du système et des milieux extérieurs qui met en évidence (Figure 5-3) :

- les interactions entre les composants du système et les milieux extérieurs ;
- les interactions entre les composants eux-mêmes ;
- les circulations des flux à travers ou à l'intérieur du système et ses composants.

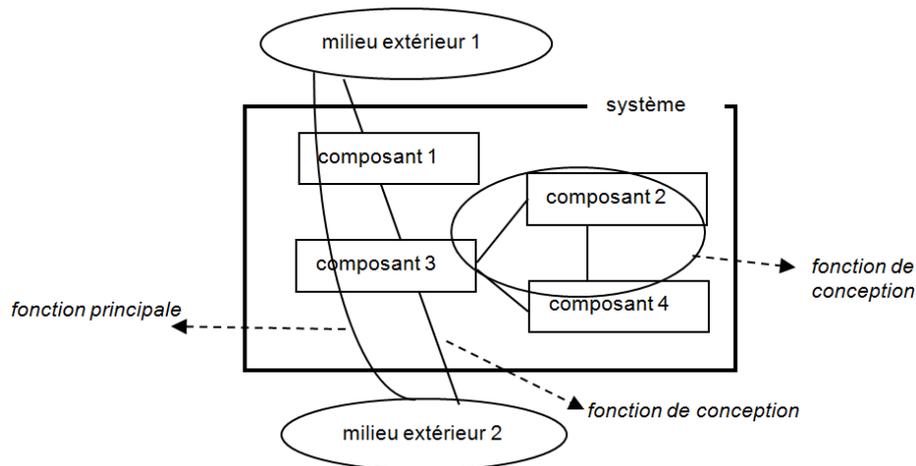


Figure 5-3 : BdF appliqué à un système de quatre composants (Zwingelstein, 1996)

Le BdF permet d'identifier les *fonctions principales* du système en examinant les flux mettant en relation deux milieux extérieurs via le système, ses *fonctions de conception*, relatives aux composants, en examinant les interactions des composants du système, entre eux et avec les milieux extérieurs.

Le Tableau d'Analyse Fonctionnelle (TAF) résume l'analyse fonctionnelle. Il rassemble, d'une part, les fonctions principales du système, d'autre part, les composants et leurs fonctions de conception.

Au final, l'analyse fonctionnelle permet (Lair, 2000) :

- d'obtenir une description fidèle et cohérente d'un système, de ses composants et des liens entre composants ;
- de disposer d'une liste exhaustive des fonctions du système et de chacun de ses composants.

5.1.3 L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets

L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère, systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système et elle analyse ses modes de défaillance (un mode de défaillance est la non réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : non fonctionnement, perte ou dégradation d'une fonction, fonction intempestive, et leurs effets)(ISDF, 1990).

Les résultats des analyses AMDE sont présentés sous forme de tableaux, spécialement conçus pour le type de système étudié. Ces tableaux permettent de lister les éléments susceptibles de connaître une défaillance, leurs fonctions, les modes de défaillances de ces fonctions, leurs causes et leurs effets, parfois associés à des symptômes et modalités de détections de ces causes et de ces effets (Tableau 5-1).

La méthode AMDE a été mise en œuvre avec succès dans le domaine du génie civil, pour l'évaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment (Lair, 2000), pour l'évaluation des scénarii de dégradation des produits de construction (Talon, 2006) et dans le domaine des ouvrages hydrauliques, pour les barrages (Peyras, 2003) et les digues fluviales (Serre, 2005).

n°	Composant	Fonctions	Mode de défaillance	Causes possibles de la défaillance	Effets possibles de la défaillance	Indicateurs	Moyens de détection
1	Crête	1- <i>Flux hydrauliques</i> - limiter l'infiltration d'eau de pluie	la fonction " limiter l'infiltration d'eau de pluie" est dégradée ou est défaillante	~ <i>Processus conception-réalisation</i> : . caractéristique et composition de la crête ~ <i>Etat intrinsèque du composant</i> : . fissuration	~ <i>Flux hydrauliques</i> : . eaux d'infiltration dans le corps de digue . eaux d'infiltration dans la recharge amont étanche ~ <i>Sollicitations</i> : . sous-pressions dans le corps de digue	. fuites sur le parement aval . piézométrie	. observation visuelle . piézomètres

Tableau 5-1: AMDE appliquée aux digues zonées (Serre, 2005)

L'AMDE est une méthode pertinente pour améliorer la sûreté de fonctionnement d'un système. Elle permet de générer une base d'informations qui sert de support pour définir, améliorer, corriger et valider un produit tout le long de sa vie, depuis sa conception jusqu'à l'exploitation. Appliquée aux digues, l'AMDE permettra de lister les modes de défaillances, leurs causes, leurs effets, ainsi que les moyens de détection associés. Ce travail sera précieux pour la modélisation fonctionnelle des digues et la construction d'indicateurs d'aide à la décision pour leur diagnostic et leur suivi.

5.1.4 Modèles issus du raisonnement qualitatif

Face à des systèmes complexes, il est difficile d'appréhender de façon exhaustive les relations internes par des variables et des équations. Il est donc nécessaire de se placer à un niveau d'abstraction élevé, pour intégrer toutes les connaissances hétérogènes relevant de différentes disciplines : c'est l'objet du raisonnement qualitatif (Dague, 2004).

Ainsi, le **raisonnement qualitatif** comprend tout ce qui concerne la description non numérique d'un système, en préservant ses propriétés comportementales majeures et en supprimant les détails.

On distingue deux classifications pour les modèles qualitatifs (Travé-Massuyès, 1997) :

- les modèles statiques et dynamiques. Un modèle statique est une description d'un système limitée aux états d'équilibres ou aux régimes stationnaires. A contrario, un modèle dynamique décrit les états transitoires (évolution entre deux états transitoires) : dans ce cas, il produit une description du comportement du système au cours du temps ;
- les modèles avec ou sans causalité explicite. Un modèle sans causalité explicite ne spécifie pas le sens des interactions. A contrario, les modèles avec causalité explicite déclarent le sens de propagation des influences ou des valeurs, entre autres au moyen de graphes orientés (Figure 5-4) ; ils permettent donc de prendre en compte les liens de cause à effet.

Les modèles statiques comprennent **les modèles causaux**, les graphes orientés ou encore les graphes de propagations de valeur symbolique (Travé-Massuyès, 1997). Les modèles les plus simples se limitent à identifier les relations entre les variables sans les qualifier. Ils ont été utilisés avec succès pour les barrages (Peyras, 2003) et les digues fluviales (Serre, 2005).

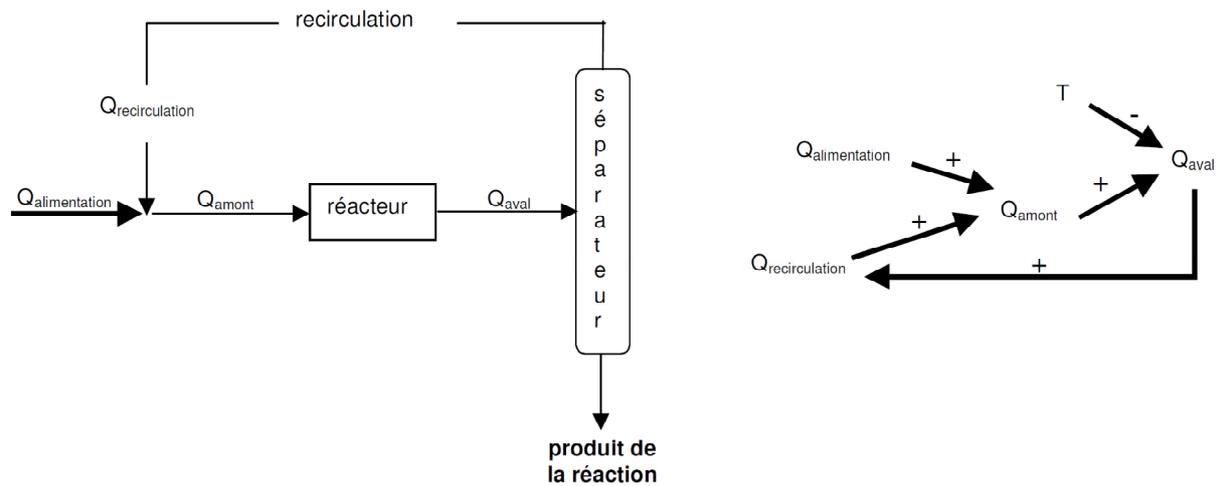


Figure 5-4 : Boucle de recyclage (à gauche) et son modèle sous forme de graphe orienté (à droite) (Travé-Massuyès, 1997)

Les modèles qualitatifs offrent un support intéressant pour la représentation des scénarios de rupture des digues. A l'instar de (Serre, 2005), l'utilisation des graphes causaux apparaît pertinente compte tenu des forts liens de cause à effet existant dans les mécanismes. Une analyse qualitative à partir de quelques valeurs, du type de celle proposée dans le modèle de propagation de valeurs symboliques, semble particulièrement intéressante.

5.1.5 Synthèse

Nous avons examiné rapidement les méthodes qui nous semblent être pertinentes appliquées aux digues : analyse fonctionnelle, analyse des modes de défaillance et de leurs effets, ainsi que les méthodes du raisonnement qualitatif.

Ces méthodes sont bien adaptées à la représentation des mécanismes complexes, tels que ceux qui s'opèrent dans les digues. La démarche proposée est analogue à celle mise en œuvre par (Serre, 2005), qui sert de base à notre travail.

5.2 Développement d'un modèle fonctionnel pour les mécanismes de rupture des digues

5.2.1 Analyse fonctionnelle pour les digues en remblai homogène

En préliminaire à l'analyse structurale du système, il est nécessaire de fixer la granularité spatiale adaptée aux besoins de l'étude : il s'agit là de choisir à quelle précision nous souhaitons produire notre analyse. Nous distinguons trois niveaux de granularité :

- la granularité supérieure, correspondant au système dans sa globalité. Ce niveau de granularité considère les fonctions de conceptions de la digue ;
- la granularité intermédiaire, qui découpe la digue en composants distincts ;

- la granularité inférieure, qui s'intéresse aux sous-composants et aux matériaux des composants de granularité intermédiaire.

5.2.1.1 Analyse fonctionnelle externe

A la granularité supérieure la fonction principale du système est de prévenir l'inondation de zones protégées en contenant et en détournant les eaux de crue vers l'aval du cours d'eau.

Les fonctions de conception du système sont liées aux fonctions de résistance des digues vis-à-vis des différents mécanismes :

- fonction de résistance au glissement ;
- fonction de résistance à la surverse ;
- fonction de résistance à l'érosion interne ;
- fonction de résistance à l'affouillement.

5.2.1.2 Analyse fonctionnelle interne des digues en remblai homogène

L'analyse structurelle permet de lister l'ensemble des composants constitutifs du système, de repérer leur position physique au sein de l'ouvrage et de déterminer les interactions avec les autres composants. Elle consiste à découper l'ouvrage, en fonction des limites données dans la définition, en composants ou sous-composants (ou matériaux), afin d'en construire une vision plus précise. Le découpage est effectué à la granularité adoptée pour l'étude, c'est à dire à l'échelle du composant des digues.

Nous retenons pour notre étude le profil type des digues en remblai homogène (Figure 5-5), représentatif de la majorité des digues en France. Pour ce profil, le ségonnal (distance entre le pied de digue et la berge) peut-être plus ou moins large, voire inexistant (le pied de digue est alors confondu avec la berge).

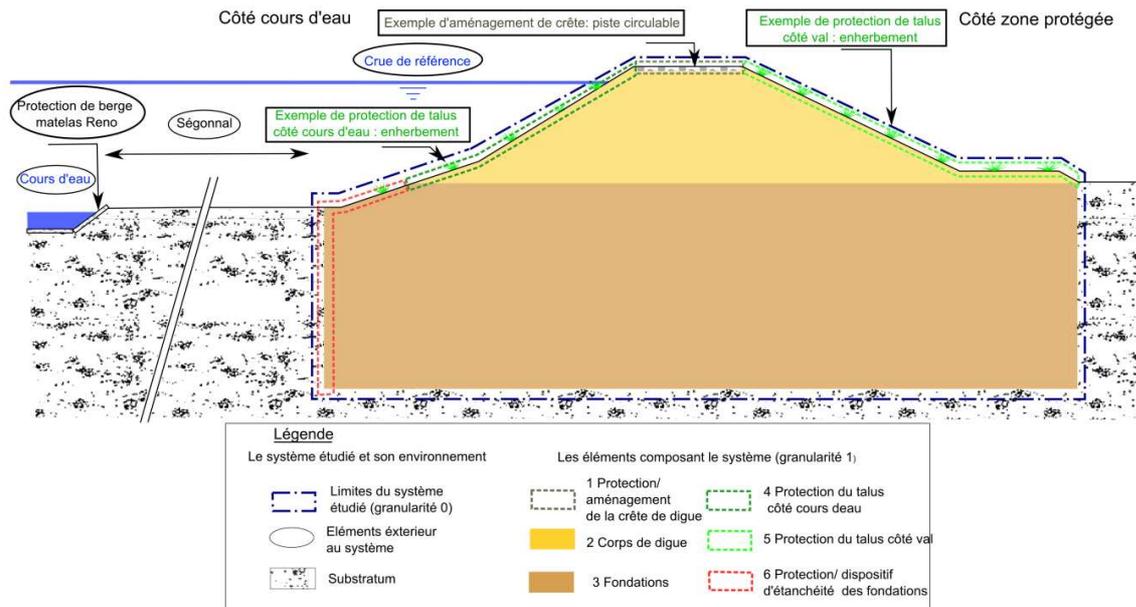


Figure 5-5 : Décomposition du système digue en éléments

L'analyse structurelle des digues en remblai homogène permet de lister l'ensemble de leurs composants (Tableau 5-2). Nous obtenons 7 composants pour les digues en remblai homogène. Nous associons à chacun un numéro de composant et établissons une liste de leurs natures possibles.

Numéro	Composant	Nature possible
1	Protection/ aménagement de la crête	Granulats Terre végétale Bitume
2	Corps de digue	Remblai : - de très hétérogène à relativement homogène - de granulométrie dominante fine à grossière - de compacté au rouleau à non compacté
3	Fondation	Sol Dépôts alluvionnaires Substrat Brèche rebouchée
4	Protection de talus côté fleuve	Terre végétale Grillage anti-fouisseur Perré Enrochements
5	Protection de talus côté zone protégée	Terre végétale Grillage anti-fouisseur Perré
6	Protection de la fondation (et/ou dispositif parafouille)	Enrochements Rideau (palplanches ou pieux) Maçonnerie
7	Ouvrage traversant	Béton Béton Métal Fonte Plastique Bois

Tableau 5-2 : Composants des digues en remblai homogène

5.2.1.3 Identification des fonctions de conception des composants des digues

L'étape suivante de l'analyse fonctionnelle est la construction de blocs diagrammes fonctionnels permettant de schématiser l'emplacement physique des composants des digues, en distinguant les éléments du système digue des éléments « extérieurs ». Le bloc diagramme fonctionnel contient les éléments constitutifs de la digue détaillés dans le tableau précédant et les éléments extérieurs au système. On différencie les éléments invariants (en traits continus), et les éléments dont la présence n'est pas systématique (en pointillés).

Les fonctions de conception des composants du système expriment les interactions des composants entre eux et avec les éléments extérieurs au système. On matérialise ainsi dans le bloc diagramme fonctionnel les relations de flux et de contacts (Figure 5-6).

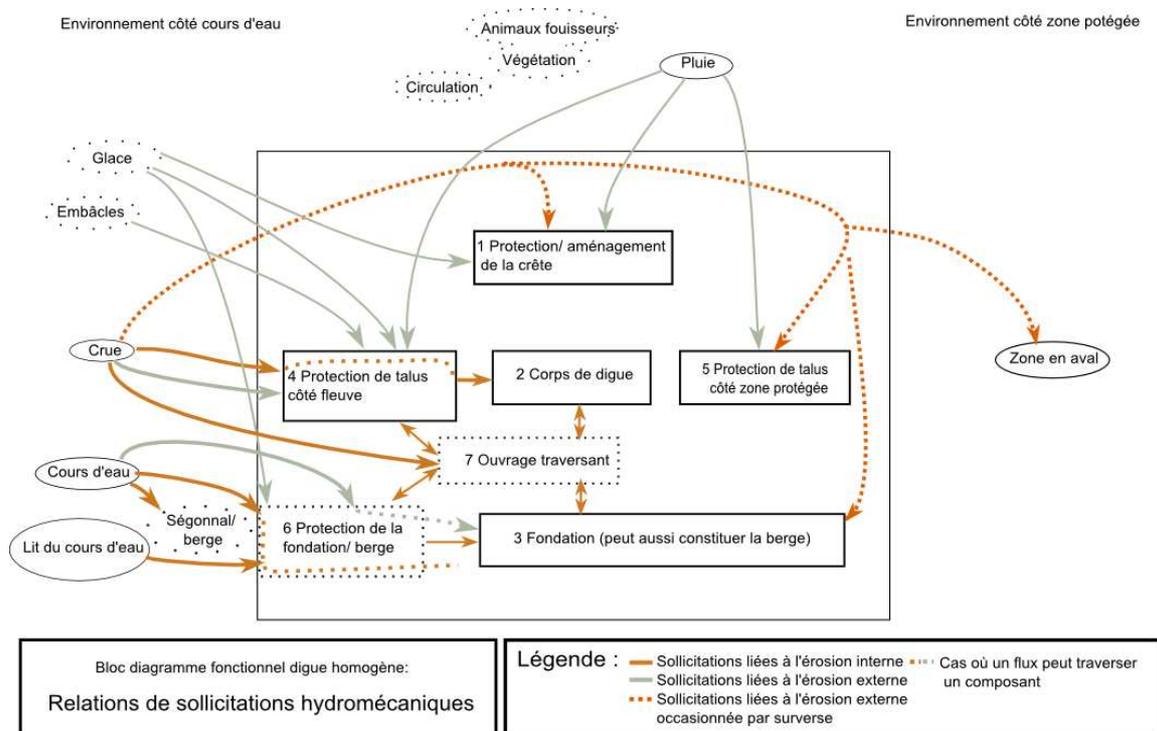


Figure 5-6 : Bloc diagramme Fonctionnel d'une digue fluviale relatif aux sollicitations hydromécaniques

Nous avons ainsi étudié les fonctions des composants du système « digue » pour les relations de contacts, pour les sollicitations mécaniques, pour les relations de flux hydrauliques et pour les sollicitations hydromécaniques.

La représentation et l'étude détaillée des relations des composants permettent de dresser des tableaux d'analyse fonctionnelle (Tableau 5-3) et de faire ressortir et classer les fonctions que doit réaliser chaque composant, selon le type de sollicitation ou selon les autres composants ou éléments extérieurs en contact.

Fonction de conception, composant n°2: corps de digue				
Composants ou milieux extérieurs	Fonctions de contacts	Fonctions de flux hydraulique	Fonctions de relations mécaniques	Fonctions de relations hydromécaniques
Protection/ aménagement de la crête	préparer la surface de contact de la crête		résister au poids de la crête et de la circulation	
Crue/ cours d'eau		1 Limiter les flux hydrauliques des eaux de crue vers l'aval 2 Empêcher la surverse		1 résister à l'érosion externe provoquée par la crue 2 Résister au phénomène de déstabilisation d'ensemble 3 résister à l'érosion interne provoquée par la crue

Tableau 5-3 : Tableau d'analyse fonctionnelle du corps de digue (extrait)

L'ensemble des résultats de l'analyse fonctionnelle, les différents blocs diagrammes fonctionnels et les tableaux de l'analyse fonctionnelle sont rassemblés en annexe B.

5.2.1.4 Synthèse

L'analyse fonctionnelle des digues permet de représenter schématiquement le système « digue », la localisation des composants et des éléments du milieu extérieur. Par cette démarche, nous avons ainsi pu déterminer de façon complète les fonctions que doit réaliser chaque composant du système. Ces résultats servent de base pour la réalisation de l'AMDE.

5.2.2 L'analyse des modes de défaillances et de leurs effets pour les digues en remblai homogène

5.2.2.1 Mise en œuvre de l'AMDE pour les digues en remblai homogène

A l'instar de (Peyras, 2003) et (Serre, 2005), nous recherchons avec l'AMDE, les différents modes de défaillance de l'ouvrage en service, liés au processus de conception et de réalisation, mais aussi aux aléas pouvant apparaître lors de son exploitation.

L'AMDE doit être adaptée à notre contexte et à nos objectifs de structuration des informations et de modélisation des scénarios. Pour cela et afin de bien rendre compte des liens de causalité entre les phénomènes et les modes de défaillance dans les mécanismes, nous définissons rigoureusement, chaque paramètre du tableau AMDE et la façon dont il est formellement obtenu : cause, mode de défaillance, effet, indicateur et moyen de détection (Tableau 5-4).

N°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION
1	2	3	4	5	7	8	6	7	8

Tableau 5-4 : Structure de l'AMDE adaptée aux digues

Les colonnes 1 et 2 listent les composants de la digue.

La colonne 3 récapitule les fonctions de conception des composants obtenues à partir de l'analyse fonctionnelle.

La colonne 4 liste les modes de défaillance possible de chaque composant. Elle comprend les défaillances totales des fonctions et la dégradation d'une fonction, qui correspond à une fonction partiellement ou mal réalisée.

La colonne 5 liste les causes possibles de la défaillance. Identifiées à partir des blocs diagrammes fonctionnels, elles ont pour origine les différents flux circulant dans la digue, les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants, l'état intrinsèque du composant et le processus de conception ou de réalisation du composant.

La colonne 6 recense les effets possibles de la défaillance. De façon analogue aux causes, les blocs diagrammes fonctionnels donnent les effets possibles d'une défaillance. Nous

distinguons trois catégories de conséquences, selon qu'elles portent sur les flux émis par le composant, les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants et l'état intrinsèque du composant.

La colonne 7 permet de lister les indicateurs des causes et des effets des défaillances. Les indicateurs utiles à l'analyse sont issus de la démarche de diagnostic décrite en partie 1 (cf. § 3.1).

La colonne 8 correspond aux observations visuelles, aux investigations géophysiques ou géotechniques ou aux calculs issus de modèles physiques.

En exemple, nous présentons (Tableau 5-5) un extrait d'AMDE réalisée pour les digues en remblai homogène.

n°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEURS	MOYEN DE DETECTION	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEURS	MOYEN DE DETECTION
2 Corps de digue									
		3 - résister à l'érosion interne .1 résister au phénomène d'érosion interne due aux eaux d'infiltration provenant de la protection de talus côté cours d'eau	la fonction "résister au phénomène d'érosion interne " est dégradée ou est défaillante	~ Etat intrinsèque du composant . érosion ~ Flux hydrauliques . durée de sollicitation hydraulique ~ Processus conception-réalisation . composition	. durée de la crue	~hydrogramme de crue	~ Etat intrinsèque du composant . Érosion	. observation de particules dans les eaux de fuite . fontis	~observation visuelle ~observation visuelle
		4 - limiter les flux hydrauliques .1 limiter les eaux d'infiltration dans le remblai (assurer l'étanchéité de	la fonction " limiter les eaux d'infiltration dans le remblai" est dégradée ou est	~ Etat intrinsèque du composant . érosion ~ Flux hydrauliques . durée de sollicitation hydraulique ~ Processus . composition	. durée de la crue . matériau perméable	~hydrogramme de crue ~reconnaisances géotechniques . test de perméabilité . caractérisation granulométrique . compactage	~ Flux hydrauliques . eaux d'infiltration dans le corps de digue	. Traces d'humidité/fuites	~observation visuelle
				. géométrie	. géométrie étroite . largeur du corps de digue	~reconnaisances géophysiques ~levés topographiques			

Tableau 5-5 : L'AMDE adaptée aux digues (extrait du composant corps de digue)

Si l'ensemble des modes de défaillance a été étudié en fonction de la précision de l'analyse fonctionnelle préalable, nous n'avons retenu que les causes et effets pertinents et susceptibles d'apparaître dans les mécanismes de rupture des digues, en intégrant une part d'expertise et un tri des informations obtenues.

5.2.2.2 Synthèse mise en œuvre de l'AMDE pour les digues en remblai homogène

L'AMDE permet d'une part de recenser de façon exhaustive les modes de défaillance des digues, leurs causes et leurs effets, et d'autre part, de structurer les informations relatives aux dégradations des digues. Ce travail constitue un préalable indispensable pour la construction de scénarios modélisant les mécanismes de rupture des digues. L'association d'indicateurs et de moyens de détection à chaque cause et effet de défaillance pourra permettre de déterminer ultérieurement les indicateurs d'état du modèle d'aide à la décision.

5.2.3 *Modèle fonctionnel qualitatif de rupture des digues*

Les méthodes du raisonnement qualitatif nous permettront de construire des *scénarios de défaillances* et nous utilisons le modèle fonctionnel proposé par (Peyras, 2003) et (Serre, 2005).

Le modèle consiste à enchaîner les séquences chronologiques de défaillance, représentant les mécanismes physiques qui se produisent au sein du système et qui conduisent à des pertes ou à des dégradations de fonctions. Les séquences de défaillance sont déclenchées dès que les effets d'un mode de défaillance sont suffisamment importants pour devenir des causes d'un nouveau mode de défaillance.

Ce modèle de représentation des scénarios comporte trois catégories de variables : *les* variables « *fonction* » correspondant aux modes de défaillance, les variables « *phénomène* » regroupant les causes et effets des modes de défaillance et les variables « *indicateur* » correspondant aux manifestations des phénomènes (Figure 5-7). L'enchaînement des défaillances sous forme « de phénomènes impliquant des dégradations de fonctions, impliquant de nouveaux phénomènes » constitue le principe de la modélisation des mécanismes de rupture des digues sous la forme scénario.

Les trois types de variables présentent différents liens. Les *indicateurs* renseignent sur les *phénomènes* auxquels ils sont rattachés. Ces phénomènes correspondent aux causes ou aux conséquences de perte de performance du composant de la digue concerné et apparaissant dans le graphe causal. Chaque phénomène est renseigné en agrégeant un certain nombre d'indicateurs. Enfin, l'agrégation des phénomènes renseigne sur la performance d'une fonction.

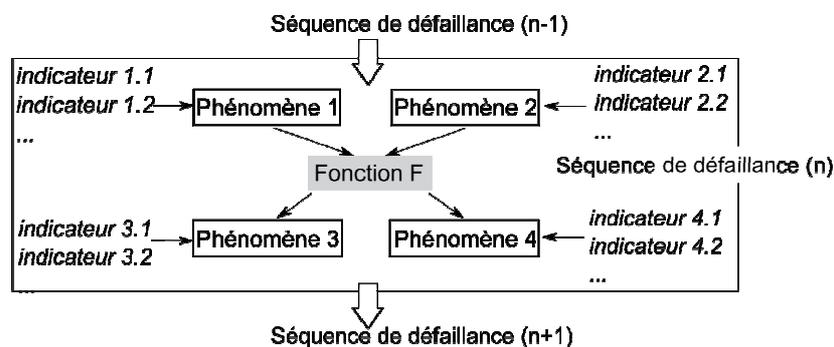


Figure 5-7 : Séquence de défaillance pour l'écriture des scénarios de défaillance

5.2.4 *Application du modèle fonctionnel aux digues : exemple pour le mécanisme d'érosion interne*

Nous présentons ci-après le scénario de rupture par érosion interne d'une digue en remblai homogène (Figure 5-8). La mise en œuvre de la méthode des graphes causaux permet de représenter les mécanismes de rupture des digues selon les séquences de défaillance qui les composent jusqu'à la rupture de l'ouvrage.

Pour ce mécanisme, la modélisation comprend des séquences de défaillance, relatives au corps de digue et à la fondation de la digue. Pour les deux composants, on identifie deux séquences de défaillances relatives :

- (1) à la fonction d'étanchéité ;

(2) à la fonction de filtration (résistance à l'érosion interne).

La fonction d'étanchéité correspond à la capacité du composant à limiter les flux hydrauliques. Les phénomènes considérés sont :

- la perméabilité du composant, dépendant de sa composition et de sa géométrie ;
- la présence de singularités pouvant favoriser l'infiltration ou la circulation d'eau dans le composant : ouvrage traversant, racines, de terriers.

La fonction de filtration correspond à la capacité du composant à résister à un phénomène d'érosion interne. Les phénomènes considérés sont :

- la résistance du composant à l'érosion interne, dépendant entre autre de son hétérogénéité, de la présence de discontinuités ;
- la présence de singularités pouvant initier ou favoriser le développement de phénomènes d'érosion interne : ouvrage traversant, racines, terriers.

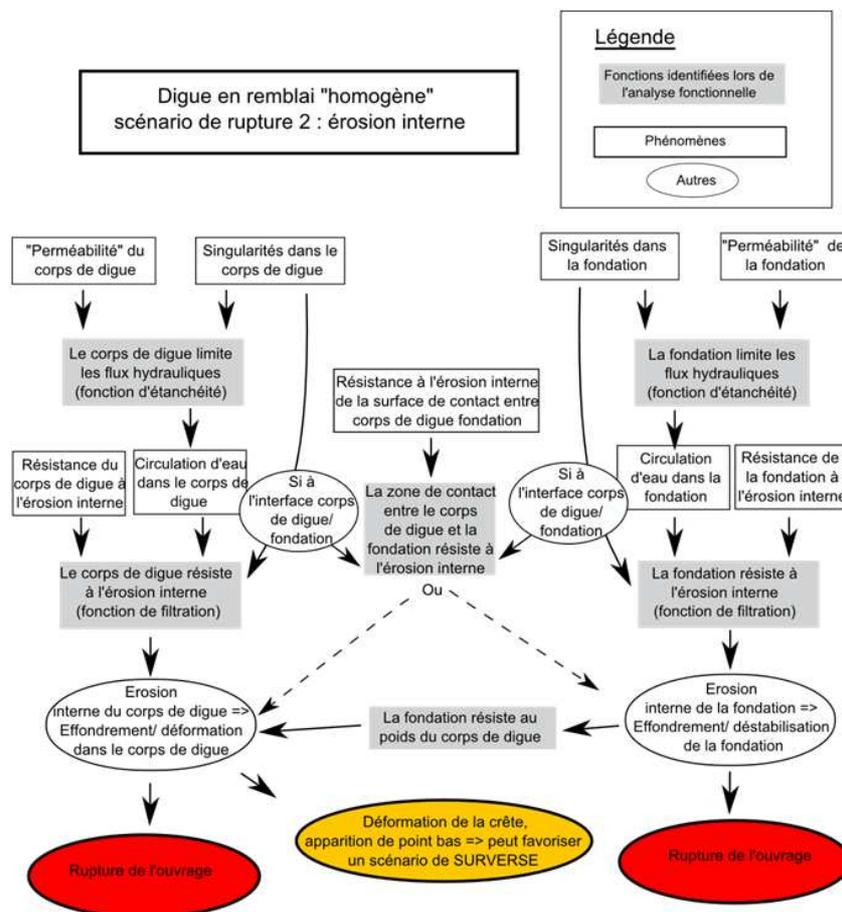


Figure 5-8 : Scénario de rupture par érosion interne d'une digue en remblai homogène

Le modèle fonctionnel permet de représenter chaque mécanisme de rupture des digues sous la forme de scénarios fonctionnels et de prendre en compte sous cette forme la complexité des enchainements de séquences de défaillances dans le système.

5.3 Synthèse

Nous avons construit un modèle fonctionnel des digues en remblai homogène, sur la base des travaux de (Serre, 2005) et (Peyras, 2003).

Le développement de ce modèle a nécessité une analyse fonctionnelle des digues en remblai homogène permettant d'identifier et de lister les fonctions du système. A partir de ces résultats, nous avons mis en œuvre la méthode AMDE pour identifier et lister les causes et les effets des modes de défaillance des composants des digues et déterminer les indicateurs de défaillance du système. Enfin, la représentation par graphes causaux permet de modéliser les mécanismes de rupture des digues en séquences des défaillances. Ce modèle sert de base au développement du modèle d'évaluation de la performance des digues et à la détermination des données associées.

Chapitre 6 Modèle d'aide à la décision pour le diagnostic des digues fluviales

Dans ce chapitre, nous présentons les méthodes de l'aide à la décision pour la construction du modèle d'évaluation de la performance des digues fluviales. Après une présentation du contexte du problème d'aide à la décision des digues, nous proposons une synthèse bibliographique sur les méthodes de l'aide à la décision multicritère et posons le problème d'aide à la décision lié à l'évaluation de la performance des digues fluviales. Puis, nous détaillons et comparons la mise en œuvre de deux démarches différentes sur les digues fluviales, l'une basée sur la méthode ELECTRE TRI et l'autre sur la construction d'un critère unique de synthèse. Nous analysons ensuite les résultats des deux démarches et nous justifions du choix d'une méthode.

6.1 Introduction au problème d'aide à la décision des digues

Nous avons souligné en partie 1 que les digues sont des ouvrages de génie civil à *grands linéaires*. Elles induisent des problématiques spécifiques car la défaillance d'un très court tronçon (par ouverture d'une brèche) rendra défaillant l'ensemble de l'aménagement. En outre, la performance des digues peut présenter une grande variabilité tout le long du linéaire du fait de l'hétérogénéité intrinsèque des ouvrages ou du fait de la présence de singularités (conduites traversantes, végétation, etc.). L'ingénierie du génie civil des digues est capable d'établir le diagnostic d'un profil donné d'une digue. En revanche, on ne dispose pas de méthodes pertinentes pour évaluer la performance des ouvrages sur de grands linéaires.

Ce grand linéaire pose une question majeure : comment évaluer la performance des digues tout le long du linéaire et comment identifier les tronçons les moins performants ?

Une gestion rationnelle de la sécurité des digues implique l'emploi de méthodes d'évaluation de la performance prenant en compte tous les mécanismes de rupture sur l'ensemble du linéaire. Dans ce contexte, notre recherche vise à fournir aux gestionnaires et à leurs services techniques des méthodes d'aide à la décision intégrant l'évaluation de la performance des digues, adaptées à des ouvrages de génie civil de grand linéaire. Cela vise un double objectif : permettre aux gestionnaires de digues d'identifier les tronçons de digues prioritaires pour les actions d'inspection, de maintenance et de réparation, et permettre aux bureaux d'ingénierie de disposer de méthodes de diagnostic pour leurs linéaires.

Nous avons vu que les mécanismes de rupture des digues sont bien connus de la profession du génie civil des ouvrages hydrauliques. Les digues connaissent quatre modes de rupture : l'érosion interne, la surverse, le glissement et l'affouillement. L'ingénierie dispose de méthodes et d'outils d'investigation et de modélisation numérique pour établir un diagnostic des digues vis-à-vis des différents mécanismes.

La difficulté qu'éprouve l'ingénierie se situe dans l'évaluation d'ouvrages à grand linéaire. Les méthodes d'aide à la décision sont pertinentes dans ce contexte, car elles vont permettre de construire une procédure automatisable d'identification des tronçons constitutifs d'un linéaire de digue selon leurs niveaux de performance, relativement aux critères d'évaluation des ouvrages considérés en ingénierie.

Pour cela, nous souhaitons développer des méthodes d'évaluation de la performance des digues à l'aide d'indicateurs de performance qui exploitent l'ensemble des informations disponibles sur les ouvrages et leur environnement. Les questions scientifiques rattachées à cette recherche sont les étapes classiques du traitement d'un problème d'aide à la décision (Roy et Bouyssou, 1993) qu'il faut examiner dans le contexte d'ouvrages à grand linéaire :

- Comment déterminer un jeu de critères et d'indicateurs d'état pertinent pour notre problème ?
- Comment définir l'ensemble des actions, objets de la décision pour les digues ?
- Quelles problématiques d'aide à la décision et quelles méthodes d'aide à la décision doit-on utiliser dans notre recherche ?

6.2 L'aide multicritère à la décision

Nous présentons les définitions et les concepts de base de l'aide à la décision multicritère, puis les grandes familles de méthodes d'aide à la décision illustrées par des exemples. Nous examinons l'intérêt de leur utilisation pour traiter le problème d'aide à la décision de notre thèse.

6.2.1 Définitions et concepts

6.2.1.1 L'aide à la décision et ses acteurs

L'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution d'un processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part (Roy et Bouyssou, 1993).

L'objectif de *l'aide à la décision multicritère* est d'ordonner et trier différentes informations pour permettre une meilleure prise de décision. L'aide à la décision multicritère peut-être définie comme une formalisation du bon sens pour les problèmes où il est trop difficile d'utiliser le bon sens de manière informelle (Keeney, 1982).

La modélisation d'un problème de décision multicritère ne peut s'effectuer de façon isolée et est largement conditionnée et définie par les différents intervenants dans le processus de décision : *un ou plusieurs décideurs*, à savoir dans notre cas les ingénieurs ou service technique du gestionnaire, et *l'homme d'étude* organisant le débat pour la modélisation du problème (Azibi, 2003).

6.2.1.2 Les actions (ou objets de l'aide à la décision)

L'ensemble des actions, noté A, est « l'ensemble des objets, décisions, candidats[...] que l'on va explorer dans le processus de décision » (Vincke, 1989).

Exemple : choix d'un site parmi pour la construction d'un système industriel, l'ensemble A est constitué des sites potentiels identifiés.

La première étape pour résoudre un problème de décision consiste à déterminer les *actions* qu'on souhaite analyser. *Il s'agit pour dans notre recherche des tronçons d'un linéaire de digues nécessitant une action du gestionnaire.*

La définition de l'ensemble des actions A est une étape très importante dans un processus d'aide à la décision. On note que, dans la plupart des cas, il ne s'impose pas comme une réalité objective facile à cerner. Cet ensemble peut être de plusieurs natures (Roy, 1985) :

- en extension ou en compréhension : **en extension** lorsque l'on peut dénombrer et énumérer toutes les actions possibles et **en compréhension** lorsqu'il est fini ou infini, mais trop grand pour que l'énumération soit possible ;
- stable ou évolutif : **stable** lorsqu'il n'est pas susceptible d'être modifié en cours de procédure du fait de la procédure elle-même (A serait alors révisable), ou d'un contexte extérieur à celle-ci (A serait alors transitoire) ; **évolutif** dans le cas inverse, c'est-à-dire que A est révisable, transitoire, ou les deux ;
- global ou fragmenté : **globalisé** si toutes les actions sont exclusives les unes des autres et **fragmenté** si les résultats du processus de décision font intervenir des combinaisons de plusieurs éléments de A.

6.2.1.3 Modélisation des conséquences, indicateurs d'état et critères (Roy, 1985; Azibi, 2003)

Les différents points de vue du problème de décision doivent être matérialisés par des critères.

Un critère est une fonction g définie sur A, qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné et qui représente les préférences du décideur selon un point de vue (Vincke, 1989). L'évaluation d'une alternative a selon un critère j est notée $g_j(a)$.

Exemple : dans le cas du choix d'un site pour l'implantation d'un système industriel, les critères d'évaluation peuvent être : les impacts sur l'environnement pour chaque site, la surface des terrains, le raccordement aux réseaux de transports, les coûts des terrains, etc.

Dans les problèmes de décision, il est assez fréquent d'avoir plusieurs décideurs. La phase de modélisation est une phase souvent difficile où doivent être explicitées les préférences de chacun (Azibi, 2003). Les critères doivent impérativement modéliser les préférences de l'ensemble des acteurs du processus de décision selon des échelles d'appréciation intelligibles et reconnues par tous.

L'étape dite de **modélisation des conséquences** est une étape importante du traitement d'un problème d'aide à la décision. Il s'agit du processus de concertation entre l'homme d'étude et les décideur devant aboutir à la construction d'indicateurs d'état et de critères, définis sur une ou plusieurs échelles d'évaluation, permettant de comparer les actions entre elles.

Pour un problème d'aide à la décision donné, les critères synthétisent l'ensemble des points de vue considérés par le décideur.

Un **critère** vise à résumer, à l'aide d'une fonction, les évaluations d'une action sur diverses dimensions pouvant se rattacher à un même « axe de signification », ce dernier étant la traduction opérationnelle d'un « point de vue » au sens usuel du terme (Roy et Bouyssou, 1993).

Un critère peut être l'expression d'un ou de plusieurs indicateur d'état. Dans le premier cas, il exprime les conséquences relatives à un seul indicateur d'état (conséquence « unique »). Dans le second cas, le critère résulte de l'agrégation d'indicateurs d'état, il renseigne des conséquences relatives à plusieurs dimensions de préférences. On dit alors que le critère résulte de **l'agrégation de conséquences multiples**, ou de sous conséquences multiples.

Exemple : pour l'achat d'une voiture monospace neuve, les critères considérés par le décideur sont le prix, la sécurité, le confort et la consommation du véhicule. Le critère prix correspond à l'unique indicateur d'état prix, alors que le critère sécurité pourra correspondre aux indicateurs d'état : performances de freinage, présence d'airbag, tenue de route, etc.

Des méthodes de construction de critères agrégeant des conséquences multiples, ont été proposées et mise en œuvre récemment, telles l'affectation à base de règles (Azibi, 2003) ou l'arbre d'agrégation (Labbouz, 2008). Nous présentons l'affectation à base de règle plus loin dans ce mémoire (cf. §6.2.4.4).

Les indicateurs d'état sont les éléments constitutifs des critères. Au sens de l'aide à la décision multicritère, un **indicateur d'état** est une mesure d'échelon inférieur au critère permettant de différencier deux actions selon une échelle correspondant aux préférences du décideur. Ils correspondent chacun à une **dimension de préférence** du décideur, c'est-à-dire à un aspect du problème susceptible d'influencer son choix.

Les **indicateurs d'état** peuvent être **ponctuels** ou **distributionnels** (Roy et Bouyssou, 1993). Les indicateurs d'état distributionnels sont généralement présentés sous la forme d'intervalles de distribution regroupant plusieurs échelons de l'échelle de préférence du décideur. Dans ce cas, on peut préciser l'évaluation de a par rapport à la conséquence c en introduisant un indicateur de modulation. L'indicateur de modulation doit permettre de moduler la vraisemblance des éléments de l'indicateur d'état, par exemple à l'aide d'une distribution de **probabilités** ou de **possibilités**.

Exemple: dans une procédure multicritère visant à estimer la vulnérabilité aux inondations de zones aménagées, l'indicateur d'état d'évaluation des valeurs des habitations susceptibles d'être inondées doit modéliser les coûts moyen pour chaque catégorie d'habitation (pavillonnaire de plein pied, pavillonnaire avec étage, standing du logement etc.). Compte tenu de la grande variabilité des cas, l'assimilation d'un bâti dans une catégorie fait nécessairement perte de la précision à l'information. Pour prendre en compte cette variabilité, les coûts de chaque habitation susceptible d'être endommagée sont modélisés par une distribution de probabilité suivant une loi triangulaire.

6.2.1.4 Structure de préférence et famille de critères

Les critères doivent modéliser les préférences de l'ensemble des acteurs du processus de décision selon des échelles d'appréciation intelligibles et reconnues par tous. La **structure de préférence** définit les paramétrages de comparaison des alternatives sur chaque critère.

Lorsque l'on compare des actions évaluées selon de **vrais critères**, toute différence d'évaluation conduit à établir un ordre de préférence et, ainsi, à préférer une action à l'autre pour le critère considéré.

L'utilisation de **pseudo critères** ou de **quasi critères** introduit des seuils permettant de modéliser de l'incertitude, de l'imprécision ou de l'indétermination sur l'échelle de comparaison des actions : indifférences, préférences faibles, préférence forte. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur vers (Roy et Bouyssou, 1993).

Selon l'approche adoptée, on affecte parfois des poids à chaque critère. Des méthodes ergonomiques ont été développées pour déterminer les poids de chaque critère, tel le jeu de carte de Simos (Simos, 1991; Figueira et Roy, 2002).

La représentation des points de vue (aspects, facteurs, caractéristiques...) au moyen d'une **famille de critères** $F=\{g_1...g_2...g_m\}$ est certainement la partie la plus délicate de la formulation d'un problème de décision (Vincke, 1989). Une famille de critères rassemble l'ensemble des critères de décision considérés par le décideur. Elle doit le plus possible tendre vers deux aspects : la cohérence et l'indépendance. Une telle famille doit synthétiser l'exhaustivité des points de vue d'un problème de décision multicritère sans redondances. Selon (Roy et Bouyssou, 1993) une famille cohérente de critères, doit respecter trois axiomes : **l'exhaustivité**, la **cohésion** et la **non redondance** (Roy et Bouyssou, 1993).

Définition de la dépendance entre critères (Roy, 2009) : la famille F étant supposée construire et cohérente, dire qu'il existe des dépendances entre certains de ces critères signifie que l'on peut :

1. mettre en évidence au moins deux sous-familles de F (éventuellement réduites à un seul critère) entre lesquelles il existe des liens (de nature quelconque) tels que :
2. ne pas tenir compte de ces liens pour asseoir la validité, la crédibilité ou l'intensité d'une relation de préférence globale peut conduire à négliger, involontairement et à tort, certains aspects de la réalité qui méritent d'être pris en compte pour l'aide à la décision.

Une trop grande dépendance de certains critères peut fausser les résultats de la démarche d'aide à la décision et rendre nécessaire une reformulation de la famille de critères. Bien qu'il soit toujours difficile de construire une famille de critères parfaitement indépendante, il convient de minimiser tous les cas de dépendance. La dépendance une notion complexe, pour plus de détails nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Roy, 2009).

6.2.1.5 Problématiques de l'aide à la décision et familles de méthodes

On distingue trois **problématiques d'aides à la décision de référence** :

- **le choix** : il s'agit de déterminer parmi A un sous ensemble aussi restreint que possible des actions les plus satisfaisantes ;

- **le tri** : il s'agit d'affecter les actions dans des classes prédéfinies à partir de profils de références ;
- **le rangement** : il s'agit de ranger les actions de la meilleure à la moins bonne.

L'évaluation d'une action ou alternative a sur l'ensemble des critères constitue son **vecteur de performance** : $g_n(a) = (g_1(a), g_2(a), \dots, g_m(a))$

Les vecteurs de performance des actions sur l'ensemble des critères constituent la **matrice des performances** (Tableau 6-1).

	Critère 1	Critère 2	Critère j	Critère m
Poids (facultatif)	P_1	P_2	P_j	P_m
Seuils (facultatif)	p_1, q_1	p_2, q_2	p_j, q_j	p_m, q_m
Action a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	$g_j(a_1)$	$g_m(a_1)$
Action a_i	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	$g_j(a_i)$	$g_m(a_i)$
Action a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	$g_j(a_n)$	$g_m(a_n)$

Tableau 6-1 : Exemple de matrice des performances

Selon (Vincke, 1989), on peut subdiviser les méthodes de l'aide multicritère à la décision en trois catégories :

(1) **L'approche du critère unique de synthèse** évacuant toute incomparabilité (Roy, 1985), appelée également **la théorie de l'utilité multi-attribut** (Vincke, 1989), ou méthodes d'agrégations complètes (Scharling, 1985). Ces méthodes procèdent par agrégation puis comparaison. On agrège les vecteurs de performance pour chaque alternative en une note de synthèse unique qui permet de les comparer pour répondre à la problématique multicritère.

On remarque qu'il est alors nécessaire de procéder à une **normation**, pour ramener les évaluations de chaque critère à une échelle commune. Ces échelles communes peuvent être par exemple un coût monétaire ou une distribution de probabilités.

(2) **L'approche du surclassement de synthèse** acceptant l'incomparabilité (Roy, 1985), appelé également **méthodes de surclassement** (Vincke, 1989), ou méthodes d'agrégations partielles (Scharling, 1985). Ces méthodes procèdent par comparaison puis agrégation. On compare d'abord les actions deux à deux sur chaque critère, avant d'agréger les résultats des différences obtenues. On peut ensuite interpréter les coalitions de critères en faveur d'une alternative ou d'une autre. Cette approche permet de comparer des actions sur des critères mesurés selon des échelles de valeurs différentes.

(3) **Les méthodes interactives** (Vincke, 1989), également appelées approche du jugement local interactif avec itération essai erreur, ou méthodes d'agrégation locales (Scharling, 1985). Cette famille de méthode propose des séquences d'agrégation successives, en alternance avec des consultations du décideur. Le décideur donne des informations complémentaires sur ses préférences après analyse des résultats à chaque étape.

6.2.2 Méthodes multicritères élémentaires (Roy et Bouyssou, 1993; Hammami, 2003; Lemaître, 2007)

6.2.2.1 La méthode du « min »

Le « min » consiste à retenir la note du critère le plus défavorable. Utilisé lorsqu'il y a plusieurs décideurs, il permet de maximiser les préférences du décideur le moins satisfait (critère dit du « maximin »). En décision sous incertitude, il correspond à l'attitude de prise de risque minimum (Lemaître, 2007).

Exemple : un décideur souhaite acheter une voiture en ne tenant en compte que des critères de sécurité : système de freinage, présence d'airbag, déformation du véhicule lors de chocs etc. Comparant plusieurs modèles, il les élimine de son choix un à un jusqu'à trouver celui dont le critère le plus défavorable est le moins mauvais.

La méthode du min présente l'avantage d'être complètement non compensatoire (Roy et Bouyssou, 1993) : on ne peut pas compenser un mauvais score par un bon et inversement. Corolairement, le « min » ne prend en compte que le critère le plus défavorable et la comparaison des actions sur les autres critères peut être ainsi omise.

6.2.2.2 Le préordre lexicographique

La méthode lexicographique s'applique dans certaines situations où l'on est en mesure d'établir une relation de dominance dictatoriale entre les critères ($g_{(1)} \gg g_{(2)} \gg g_{(3)} \gg \dots \gg g_{(n)}$). Ainsi, on ne tient compte des critères les moins importants que lorsque les comparaisons effectuées sur ceux de plus grande importance ne permettent pas la discrimination entre les actions.

Elle procède en plusieurs étapes : ranger les critères par ordre d'importance, comparer toutes les actions par rapport au critère le plus important, choisir celle(s) qui a (ont) la meilleure performance par rapport au critère retenu (le plus important en premier lieu). Si plus d'une action sont retenues et s'il reste des critères non encore considérés, il conviendra alors de procéder de la même manière sur la base du critère suivant en termes d'importance.

Exemple : dans le choix de l'achat de la recherche d'un candidat pour un poste, un cabinet de recrutement pourrait ordonner ces choix de la manière suivante : date de disponibilité, expérience, âge, formation etc. Si un candidat présente la disponibilité adéquate, on regarde ensuite son expérience, si celle-ci correspond sa formation etc. Si le candidat n'est pas disponible ou ne possède pas l'expérience nécessaire on passe directement au suivant.

Comme le min, la méthode du lexicographique présente l'avantage d'être non compensatoire. De plus elle permet de prendre en compte une forte hiérarchie parmi les critères de décision. La méthode du préordre lexicographique suppose donc que les critères aient un ordre d'importance bien défini et très significatif.

6.2.2.3 La moyenne pondérée

La moyenne (ou somme) pondérée s'écrit :

$$U(a) = \sum_{j=1}^n p_j g_j$$

Où $g_j(a)$ est la valeur de l'action a sur le critère j
et p_j le poids associé à ce critère.

Exemple : la moyenne pondérée des notes des élèves d'une école permet d'effectuer un classement ou encore de déterminer les élèves susceptibles de recevoir une mention. Les bonnes et les mauvaises notes se compensant mutuellement.

L'avantage de la moyenne pondérée est de considérer dans le processus de décision l'ensemble des critères quels que soient leurs scores. Elle est cependant totalement compensatoire (on peut compenser des scores mauvais par d'autres), et peut ainsi conduire à une perte d'information.

6.2.3 Synthèse

Il existe des procédures d'aide à la décision multicritère élémentaires susceptibles de modéliser un problème de décision simple. Nous avons présenté trois de ces méthodes : Min, préordre lexicographique et moyenne pondérée. Chacune permet d'identifier les objets de l'aide à la décision en modélisant les préférences du décideur sur les critères.

6.2.4 Les méthodes du critère unique de synthèse (Keeney, 1976; Saaty, 1980)

6.2.4.1 Principes

Les méthodes proposant la construction d'un critère unique de synthèse sont les plus anciennes méthodes multicritères. Développées au départ principalement pour des problèmes économiques, elles avaient pour objectif le calcul et la comparaison des rapports coût/bénéfices des actions qui s'offrent à un décideur. On parle d'utilité multi attribut par analogie aux théories développées en économie (Von Neumann et Morgenstern, 1944).

Cette famille de méthodes conduit à résumer la valeur de toute action a par une note globale $U(a)$ calculée à partir de son vecteur de performance, c'est-à-dire des évaluations de l'action a pour chaque critère. Cette note vise à résumer la valeur globale de l'alternative et sert de base à la comparaison multicritère des alternatives (Grabisch, 2002). On remarque que les méthodes élémentaires, présentées dans le paragraphe précédant (cf. §6.2.2) relèvent également de la famille du critère unique de synthèse.

La construction du critère unique de synthèse consiste à agréger des vrais critères en une fonction unique. Les travaux relatifs à cette famille étudient les conditions mathématiques d'agrégation et les formes particulières de la fonction d'agrégation.

La théorie du critère unique de synthèse mesure la satisfaction d'un décideur par une fonction mathématique, la fonction d'utilité. Selon (Vincke, 1989), la théorie de l'utilité multi attribut a surtout été développée dans le cas incertain et fait largement usage des probabilités pour représenter les phénomènes d'imprécision et d'incertitude qui peuvent apparaître dans un problème d'aide à la décision. Nous remarquons que ces méthodes ont été également mises en œuvre sous format flou (Quidu *et al.*, 2001).

6.2.4.2 Formulation

Soit :

- **A l'ensemble d'action** parmi lesquelles le décideur doit choisir ;
- **C : Ensemble des critères** permettant d'évaluer les alternatives, avec $g(a)$ l'évaluation de l'action a par le critère g ;
- **D : univers de description** des degrés de satisfaction ou d'évaluations partielles. Pour des raisons de simplification des notations, on prend $D = [0 ; 1]$, indiquant que les valeurs des scores sont exprimées dans l'intervalle $[0, 1]$, 1 correspond à la satisfaction complète d'un critère, 0 exprime l'insatisfaction complète.

A chaque action $a \in A$ est associé un profil tel que :

$$a_1 = (g_1(a_1), g_2(a_1), \dots, g_m(a_1))$$

avec $g_i(a_n)$ l'évaluation partielle de a_n selon le critère g_i .

Le principe de ce type de méthode est de construire une fonction d'utilité U :

$$[0, 1]^p \Rightarrow [0, 1]$$

telle que, pour chaque alternative de l'ensemble $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$, on ait :

$$U(a_1) = U(g_1(a_1), g_2(a_1), \dots, g_m(a_1)),$$

où $U(a)$ représente l'évaluation globale de l'alternative a relativement à tout les critères et U est la fonction d'utilité constituée d'un ou plusieurs opérateur(s) d'agrégation à déterminer.

Les actions de l'ensemble A peuvent ensuite être classées relativement à leur score de synthèse $U(a_n)$. Les conditions nécessaires sur la fonction U sont les suivantes :

- U est continu
- $U(0, 0, \dots, 0) = 0$ et $U(1, 1, \dots, 1) = 1$
- $\forall (g_m a_1, g_m a_2) \in [0, 1]^2$, si $g_m a_1 \geq g_m a_2$ alors $U(g_1 a_1, g_2 a_1, \dots, g_m a_1) \geq U(g_1 a_2, g_2 a_2, \dots, g_m a_2)$

6.2.4.3 Les méthodes MAVT (Multiple Attribut Value Theory), et MAUT (Multiple Attribut Utility Theory)(Keeney, 1976)

Principes de la méthode MAVT

La **méthode MAVT** repose sur la construction d'une fonction U qui agrège tous les critères. Sa particularité réside dans la construction de fonctions partielles pour chaque critère. Les fonctions partielles sont construites en interrogeant le décideur, qui donne ses préférences sur

une échelle de 0 à 1. Elles consistent en une transformation monotone de chaque critère initial de façon à prendre en compte la non-linéarité des préférences du décideur sur les échelles d'évaluation des critères. L'homme d'étude construit ensuite la fonction U , selon les caractéristiques des préférences du décideur.

La mise en œuvre de la méthode MAVT se déroule comme suit (Hammami, 2003) :

- étape 1 : évaluer chacune des actions selon chaque critère (construire la matrice de performance) ;
- étape 2 : construire des fonctions de valeur partielles pour chaque critère (traduire la matrice des performances dans les valeurs des fonctions partielles) ;
- étape 3 : établir les poids des critères ;
- étape 4 : calculer l'évaluation globale pour chaque action en utilisant une forme d'agrégation appropriée : $U[g_1(a), \dots, g_n(a)] = f\{u_1[g_1(a)], \dots, u_n[g_n(a)]\}$
- étape 5 : déterminer la meilleure action, celle qui maximise le plus grand score ;
- étape 6 : faire des analyses de sensibilité.

La **méthode MAUT** reprend les mêmes principes que la méthode MAVT, mais elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs font l'objet d'incertitudes. On bâtit alors des fonctions d'utilité qui prennent en compte la mauvaise connaissance sous format probabiliste. On parle alors de fonction d'utilité et pas de valeur. Ces fonctions d'utilité sont construites selon une procédure basée sur des loteries.

Exemple de mise en œuvre (Pomerol et Barba-Romero, 1993):

Il s'agit de choisir des voitures en fonction de leur prix, leur confort et leur consommation d'essence.

- *Etape 1 : évaluer chacune des actions selon chaque critère (Figure 6-1).*
- *Etape 2 : construire des fonctions de valeur partielles pour chaque attribut (ou critère). L'homme d'étude pose plusieurs questions au décideur construisant ainsi des fonctions de valeurs partielles. Par exemple, pour construire la courbe U_1 relative au prix, nous retenons que $U_1(100) = 0$ et $U_2(50) = 1$. L'homme d'étude pose ensuite des questions au décideur comme :*
 - *Combien êtes-vous prêt à donner en consommation pour être indifférent entre (50, 7, 9) et (75, 8, ?)*

A partir des réponses à ces questions, il est possible de construire la courbe U_1 (Figure 6-1).

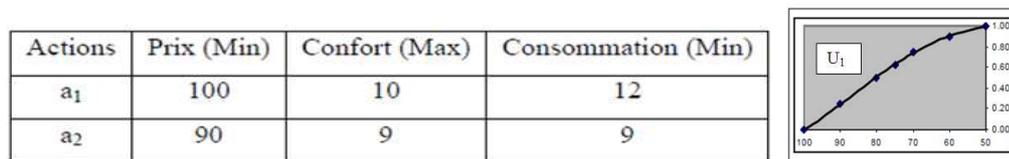


Figure 6-1: Matrice de performance des critères de comparaisons des voitures (extrait) et courbe de valeur partielle de U_1 (prix) (Pomerol et Barba-Romero, 1993)

- *Etape 3 : Etablir les poids π des critères.*
- *Etape 4 : calculer l'évaluation globale pour chaque action en utilisant une forme d'agrégation appropriée. (Exemple : la forme d'agrégation additive : $U(a) = \pi_1 * U_1(a) + \pi_2 * U_2(a) + \pi_3 * U_3(a)$)*

- *Étape 5 : déterminer la meilleure action, dans ce cas d'étude, en fonction de son score global. Le classement de actions est : $a_6 > a_8 > a_{10} > a_9 > a_4 > a_5 > a_3 > a_7 > a_2 > a_1$*

Les méthodes MAUT et MAVT présentent l'avantage de synthétiser l'ensemble des critères à partir d'une note représentative. Les formes additives et multiplicative sont considérées comme compensatoires (Vincke, 1989). La méthode MAUT permet de modéliser les incertitudes des critères, sous format probabiliste ou flou.

6.2.4.4 La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) et MACBETH (Bana e Costa et Vansnick, 1997)

La méthodes AHP (Saaty, 1980) consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique (Figure 6-2) reflétant les interactions entre les divers éléments du problème.

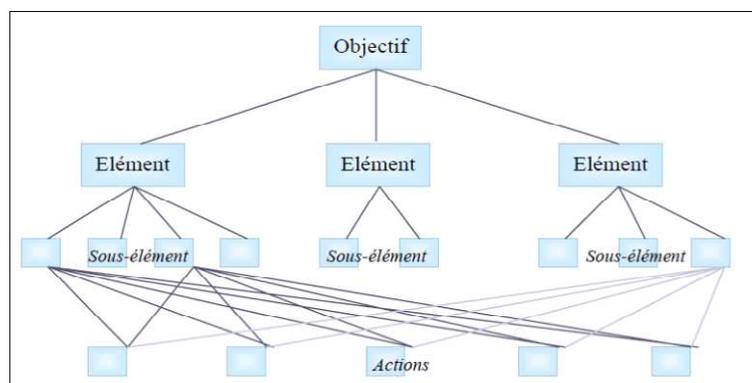


Figure 6-2 : Structure hiérarchique d'un problème selon la méthode AHP (Hammami, 2003)

La mise en œuvre de la méthode AHP se déroule comme suit (Hammami, 2003) : on décompose le problème en une hiérarchie d'éléments inter-reliés (critères, sous-critères, indicateurs d'état) ; au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif et, dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif ; le dernier niveau est celui des actions. Une procédure de comparaison par paires permet d'attribuer un poids à chaque critère. L'agrégation se fait ensuite selon une somme pondérée.

Exemple d'application de la méthode AHP (Tacnet, 2009) :

La méthode a été mise en œuvre pour l'évaluation du risque lié aux avalanches. Le principe est basé d'une part sur la décomposition d'un problème de décision en critères et d'autre part sur la synthèse et l'agrégation de poids affectés aux critères des différents niveaux de la hiérarchie (Figure 6-3). Les préférences traduisant l'importance relative entre les critères s'expriment par des poids w_j .

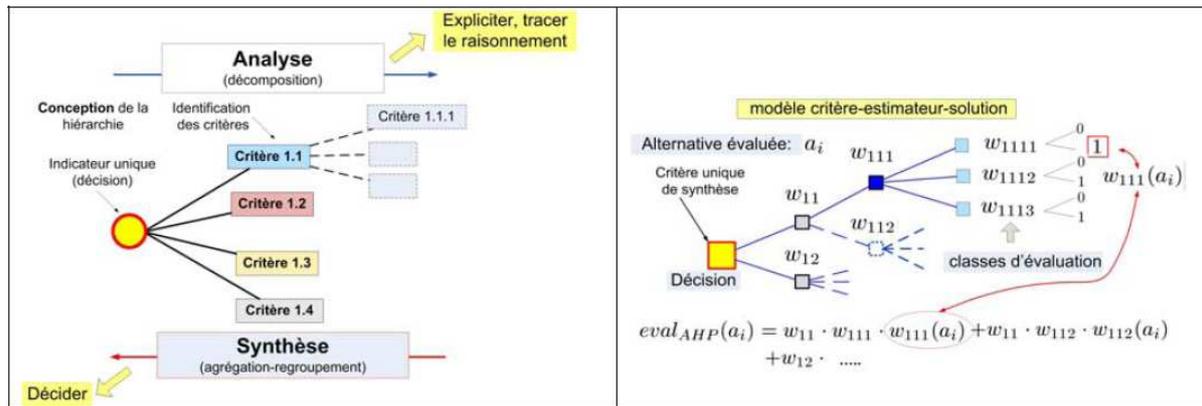


Figure 6-3 : A droite, principe de l'AHP, à gauche, une forme adaptée pour agrégation dans un modèle critère-estimateur-solution (Tacnet et al., 2010)

La méthode AHP suit une structure hiérarchique relativement comparable aux scénarios de rupture des digues. Nous remarquons cependant qu'elle ne fonctionne que pour un nombre limitée d'actions (Vincke, 1989), ce qui la rend mal adaptée à la situation des digues fluviales.

La méthode MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) repose également sur une agrégation par somme pondérée (Bana e Costa et Vansnick, 1997). Les poids (ou attractivité) de chaque critère sont déterminés par une procédure de questionnement spécifique du décideur favorisant la prise en compte du jugement qualitatif de ses préférences. La méthode garantit une cohérence globale entre la construction des échelles des critères d'évaluation et l'identification des paramètres de la somme pondérée.

6.2.4.5 L'affectation à base de règles

Dans ses travaux, (Azibi, 2003) propose une méthode de construction de critères modélisant des dimension de préférence qualitatives par l'élaboration et l'utilisation de règles d'affectation. La méthodologie développée propose la construction d'un système de règles pour l'affectation d'une action a à une catégorie C_k ($C_k \in C$ ensemble des catégories possibles), en fonction du vecteur de performance de a noté $g_n a$.

Les règles utilisées sont de type « **si...alors** » : la partie « condition » concerne les modalités prises par l'action sur un sous-ensemble de critères et la partie « conclusion » indique l'affectation à une catégorie $C_k \in C$. La syntaxe générale des règles est de la forme :

$$r : \text{si condition } (g_n a) \text{ alors } a \rightarrow C_k (C_k \in C)$$

La partie condition d'une règle correspond à une conjonction de conditions élémentaires :

$$\text{Condition} = c_1 \wedge \dots \wedge c_j \wedge \dots \wedge c_n.$$

Une base de règles doit répondre à **trois exigences** :

- exigence de complétude : toute action doit être affectée à au moins une catégorie C_k ($k \in \{1, \dots, l\}$) ;
- exigence d'exclusivité : toute action doit être affectée à au plus une catégorie C_k ($k \in \{1, \dots, l\}$) ;

- exigence de monotonie : toute action $a \in A$ qui domine une action $a' \in A$ ne peut être affectée à une catégorie inférieure à celle où est affectée a' .

Exemple d'application (Azibi, 2003) :

Dans le cadre de l'évaluation de différentes stratégies de réduction du risque inondation par la Loire, onze critères ont été définis tels que « dommage sur l'habitat », « dommages sur les réseaux », « coût de mise en œuvre », « date d'achèvement de la mise en œuvre » « impact sur l'environnement naturel » etc. Le critère « Impact sur l'environnement naturel » est destiné à évaluer l'impact sur le milieu naturel des travaux inhérents à la mise en place de chaque stratégie. Le problème revient à évaluer pour chaque stratégie l'impact sur l'environnement naturel de la zone globale d'étude en agrégeant les impacts sur chacun des vals dans le cadre de chaque stratégie a . L'échelle d'évaluation des indicateurs a été définie par un expert écologue :

- impact fort, destruction de l'habitat et/ ou d'espèces animales rares ou protégées ;
- impact significatif : destruction de l'habitat et/ou d'espèces animales fréquents mais présentant un caractère patrimonial ;
- impact faible : destruction d'habitat et/ou d'espèces animales ordinaires.

La base de règles suivante a été élaborée en interaction avec les experts en écosystème :

R1 : règle d'affectation à la catégorie 'fort' - « Si au moins un val est noté 'fort', **alors** l'impact global est noté 'fort' »

R2 : règle d'affectation à la catégorie 'significatif' - « Si au moins trois vals sont notés 'significatifs' et aucun val n'est noté 'fort', **alors** l'impact global est noté significatif »

R3 : règle d'affectation à la catégorie 'faible' - « Si le nombre de vals notés favorables est égal au nombre de val notés 'significatifs' à deux vals près et aucun val n'est noté 'fort' **alors** l'impact global est noté 'faible' »

Les travaux de Labbouz (2008) peuvent s'inscrire dans le cadre d'une méthode de construction d'un critère unique de synthèse selon une affectation à base de règles. Dans cette recherche on propose un arbre d'évaluation permettant de modéliser en un critère de décision différents éléments (assimilables à des indicateurs d'état ou sous critères), en les laissant dans leurs unités d'origine. Un arbre d'évaluation se construit en plusieurs niveaux, chacun représentant une donnée à prendre en compte pour l'évaluation de l'ensemble des variantes du critère. A chaque branche de l'arbre est associée une note. L'évaluation d'une variante selon le critère considéré et la somme des notes présentes sur les différentes branches représentant les caractéristiques de cette variante.

L'affectation à base de règles présente l'avantage de permettre une grande possibilité d'agrégation, au plus proche de la connaissance experte (Serre, 2005). On remarque que l'affectation à base de règles est conçue dans le but d'agréger des critères qualitatifs (Azibi, 2003). Selon une approche du même type, Labbouz (2008), propose une méthode permettant l'agrégation de variables évaluées selon des échelles différentes.

6.2.4.6 Synthèse

Les méthodes du critère unique de synthèse consistent à attribuer pour chaque action une note globale unique pour les comparer. Nous remarquons que la perspective d'obtenir une note unique de synthèse correspond à notre besoin d'obtenir un niveau de performance pour chaque tronçon de digue. De plus, certaines de ces méthodes permettent de modéliser des incertitudes et/ ou des imprécisions sur l'information des critères. Nous notons également que, de manière générale, ces méthodes sont critiquées pour leur aspect compensatoire (Vincke, 1989), l'agrégation complète des données pouvant favoriser la compensation d'une mauvaise évaluation sur un critère par une bonne sur un autre critère.

6.2.5 Les méthodes du surclassement de synthèse (Roy, 1985; Roy et Bouyssou, 1993)

6.2.5.1 Principes

Les méthodes du surclassement de synthèse visent à construire un système de préférence relationnel pour la comparaison *des actions deux à deux pour chaque critère*. Le principe général est le suivant : le surclassement d'une alternative par rapport à une autre est établi si deux conditions sont satisfaites :

- (1) Une **condition de concordance**, où une majorité suffisamment forte de critères soutient la proposition de surclassement ;
- (2) Une **condition de non discordance (ou de non veto)**, où la minorité restante ne s'oppose pas fortement à la validation de la proposition.

Les méthodes du surclassement de synthèse nécessitent la définition **d'une relation de surclassement** : c'est une relation binaire S définie sur l'ensemble A telle que $a S b$ si, étant donné la qualité des évaluations des actions et la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bonne que b , sans qu'il y ait de raison importante de refuser cette affirmation (Vincke, 1989).

Ces méthodes peuvent être scindées en deux étapes :

- la construction des relations de surclassement, dans lesquelles on fait intervenir la notion de poids des critères en vue de représenter leur importance relative ;
- son exploitation en vue de la problématique choisie.

De nombreuses méthodes d'agrégation multicritère de type surclassement ont été développées, dont les plus connues sont la famille des méthodes ELECTRE (Roy et Bouyssou, 1993), PROMETHEE (Brans, 1985). Nous présentons ci-dessous la famille de méthode ELECTRE.

6.2.5.2 La méthode ELECTRE I (Roy et Bouyssou, 1993)

Apparue en 1968, il s'agit de la plus ancienne et de la plus simple des méthodes de la famille ELECTRE, pionnière des méthodes de surclassement. ELECTRE I s'applique au cas où F ne comporte que des vrais critères. Elle fait intervenir pour chacun d'eux :

- un coefficient d'importance $k_j > 0$
- un seuil de veto $v_j (g_j) > 0$

Ce sont des données inter-critères que l'on retrouve dans la plupart des procédures d'agrégation multicritères semblables. La façon de leur attribuer une valeur numérique se reprecise lors de l'analyse de robustesse.

Compte tenu des hypothèses qui viennent d'être précisées, on peut poser :

$$C(bSa) = \{j \in F : g_j(b) \geq g_j(a)\} \quad \forall C \subset F, k[C] = \sum_{j \in C} k_j$$

c'est-à-dire que la proposition b surclasse a , notée « $C(bSa)$ », est fonction de la somme des importances k des critères en faveur de cette proposition.

Dans ELECTRE I, la proposition b S a est regardée comme valide si et seulement si les deux conditions suivantes sont satisfaites :

- *Condition de concordance* : on mesure l'importance de la coalition de critères $C(aSb)$ et on la compare au seuil s dit niveau de concordance.

$$\frac{k[C(bSa)]}{k[F]} \geq s, \text{ avec } 1/2 \leq s \leq 1 - \frac{\min_{j \in F} k_j}{k[F]}$$

- *Condition de non veto* : on vérifie qu'il n'y ait pas un critère pour lequel aSb de tel manière que cela infirme l'information de la coalition $C(bSa)$ quelle qu'elle soit.

$$\forall j \in F, g_j(b) + v_j[g_j(b)] \geq g_j(a)$$

La méthode ELECTRE I répond à une problématique de choix. Ses résultats sont exploitables de la manière suivante : on recherche un sous ensemble N d'actions tel que toute action qui n'est pas dans N est surclassée par au moins une action de N , jusqu'à ce que les actions de N soient incomparables entre elles.

Ce type d'approche donne des résultats moins riches que dans une procédure d'agrégation de type critère unique de synthèse (Vincke, 1989). Il arrive parfois que les résultats soient difficilement interprétables et que l'on n'arrive pas à départager certains sous ensembles d'actions. On peut alors, au sein des groupes d'actions incomparables, affiner l'analyse des résultats au moyen d'algorithmes, ou de variations successives des paramètres de concordance, de discordance et de pondération.

La méthode ELECTRE I permet de répondre à une problématique de choix. A partir de la comparaison des actions deux à deux sur chaque critère, elle permet d'identifier une ou des actions préférées à d'autres à partir du poids de la somme des critères confirmant cette préférence.

6.2.5.3 Les méthodes ELECTRE II, III et ELECTRE TRI

La méthode ELECTRE II a été construite pour répondre à une problématique de rangement et utilise de vrais critères. Elle consiste à classer les propositions de la meilleure à la moins bonne en tolérant les ex-æquo. A la différence d'ELECTRE I, les tests de concordance et de non discordance sont imbriqués dans ELECTRE II. En outre, on fait la distinction entre surclassement faible et surclassement fort.

ELECTRE III répond aussi à une problématique de rangement, cette fois-ci avec des pseudo-critères. Cette méthode permet d'intégrer le flou dans la relation de surclassement, et donc de tenir compte des incertitudes dans les données du problème de décision (Maystre *et al.*, 1994).

La réflexion ne porte pas sur l'acceptation ou le rejet en bloc de l'hypothèse de surclassement, mais sur la crédibilité à accorder à cette hypothèse. Ceci est traduit par le degré de crédibilité de l'hypothèse de surclassement qui varie de 0 à 1 (Roy et Bouyssou, 1993).

Le niveau de concordance présenté dans l'exemple d'ELECTRE I devient alors un indice de concordance (Figure 6-4). On ajoute un indice de discordance, compris entre 0 et 1, avant de sélectionner un seuil de coupe λ lui aussi compris entre 0 et 1. L'ajustement du seuil de coupe permettra de durcir ou d'assouplir les conditions de surclassement.

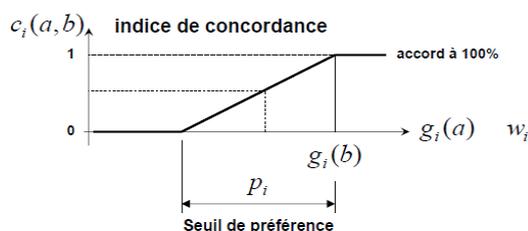


Figure 6-4 : Illustration d'indice de concordance

D'une manière générale, ELECTRE III est moins utilisée que ELECTRE II, car considérée par beaucoup de chercheurs comme compliquée et difficile à interpréter (Vincke, 1989).

La méthode ELECTRE TRI, répond à une procédure d'affectation. Elle suit la démarche développée pour ELECTRE III comprenant les degrés de crédibilité, se basant sur des surclassements flous (pseudo critères, acceptant deux seuils). Les actions de l'ensemble A ne sont pas, comme dans les autres méthodes ELECTRE, comparées deux à deux mais à des actions fictives b^h ($h = 1, \dots, k - 1$), jouant le rôle de profils de références. Ces actions fictives sont représentatives d'un état limite autour duquel existent deux catégories de classement. Ainsi deux actions seuils b_1 et b_2 , délimitent trois classes ou catégories C (exemple : C_1 bon, C_2 moyen, C_3 mauvais).

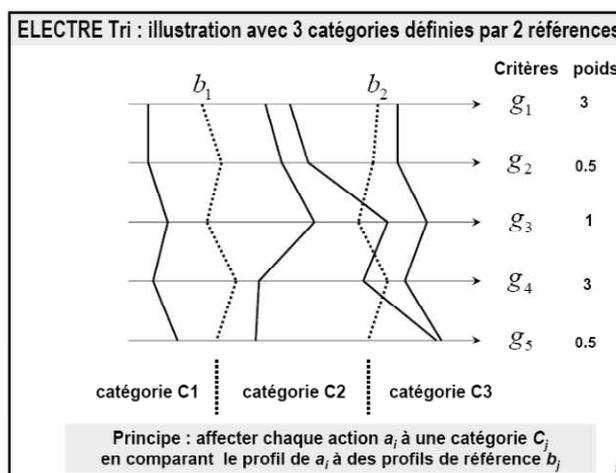


Figure 6-5 : ELECTRE TRI, catégories et vecteurs de performance (Le Gauffre et al., 2008)

La Figure 6-5 illustre une utilisation d'ELECTRE TRI, qui indique les actions de référence b^1 et b^2 et leurs profils en pointillé sur les critères g_1, \dots, g_5 . Chaque action, ici représentée en traits continus, est classée dans les catégories C_1, C_2 ou C_3 en fonction du surclassement défini entre elles et des profils de référence.

L'agrégation est faite selon deux procédures. L'une, optimiste, teste le surclassement pour chaque action a des différents profils de référence par ordre croissant, jusqu'à trouver celui

qu'elle ne surclasse pas. On affecte alors a dans la catégorie bornée supérieurement par le profil surclassé. L'autre procédure est dite pessimiste : on teste pour chaque profil de référence (par ordre croissant) lequel surclasse a jusqu'à trouver celui qui ne la surclasse pas et on affecte alors a dans la catégorie bornée inférieurement par le profil.

6.2.5.4 Application remarquable d'ELECTRE TRI pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement (Le Gauffre et al., 2008)

Présentation du problème d'aide à la décision INDIGAU

Le guide RERAU (Réhabilitation des réseaux d'assainissement urbain) propose la construction de critères de décision pour les actions d'investigation et de réhabilitation des réseaux non visitables d'assainissement. Les critères de décision pour l'identification et la hiérarchisation des tronçons prioritaires vis-à-vis de réhabilitations sont construits à partir de l'impact des défauts détectés ou susceptibles de l'être, sur le fonctionnement, ou le coût de fonctionnement du réseau.

Construction des critères de réhabilitation des réseaux d'assainissement basés sur un jeu d'indicateurs de performances

Les niveaux de dysfonctionnements, triés selon trois seuils en classe G1, G2, G3 ou G4, sont observés et/ou estimés qualitativement à partir des défauts estimés et/ou observés sur les conduites.

Exemples de défauts : fissure, déformation, année de construction, matériaux

Exemples de dysfonctionnements : DEB : débordement ; INF : infiltration, BOU : bouchage

Exemples d'impacts : POL : pollution des eaux de surface ; DOB : dommages au bâti ; CXS : surcoût d'exploitation de la station d'épuration

Exemples de critères de décision :

- POL/ DEV-TS/ INF : pollution par déversements de temps sec liés aux eaux d'infiltrations ;
- NUH/ DEB/ BOU : nuisance de débordement observé dus à des bouchages.

Les critères construits, il reste à déterminer une méthode multicritère d'aide à la décision pour trier les tronçons par ordre de priorité d'investigation ou de réhabilitation. Les critères évaluent les tronçons selon quatre niveaux par ordre de gravité croissante : G1, G2, G3 et G4.

Application d'ELECTRE TRI

La méthode ELECTRE TRI a été retenue pour identifier les tronçons nécessitant une réhabilitation et les classer en trois niveaux de préoccupation croissants : A, B, C.

Pour appliquer la méthode ELECTRE TRI, les notes, G1, G2, G3 et G4, des tronçons ont été associées à des valeurs numériques. Des profils b^1 et b^2 ont également été définis pour répartir les tronçons selon trois catégories C1, C2 et C3, ainsi qu'un seuil de préférence forte et un seuil de coupe. La comparaison des tronçons avec chaque profil b pour l'ensemble des critères permet de les trier par catégories, relativement à la priorisation de leur réhabilitation.

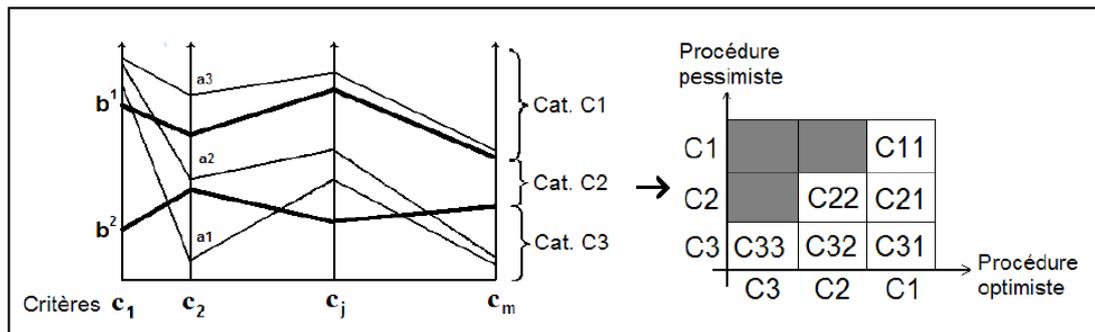


Figure 6-6 : Application ELECTRE TRI, procédure d'affectation des tronçons dans des catégories (Le Gauffre et al., 2008)

Les méthodes de l'aide à la décision multicritère sont mises en œuvre pour la construction de l'outil de gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement INDIGAU. Les critères de réhabilitation des réseaux résultent de l'agrégation des indicateurs de l'état des ouvrages, des dysfonctionnements et de leurs impacts sur la gestion du réseau. La méthode ELECTRE TRI permet ensuite de trier les ouvrages par niveaux de performance et, ainsi, d'identifier les tronçons prioritaires pour des opérations de réhabilitation. Cette démarche pourrait être pertinente pour l'étude de la performance des digues.

6.2.5.5 Synthèse

Le principal avantage des méthodes de surclassement est de comparer les actions sur chaque critère sans convertir ces derniers dans une échelle commune. On peut ainsi répondre à un problème de décision considérant des critères qualitatifs et quantitatifs (Roy et Bouyssou, 1993), sous format probabiliste (Martel, 1995) ou flou (Bollinger *et al.*, 1997). Toutefois, on remarque que la formulation complexe de ces méthodes peut produire un effet « boîte noire » susceptible d'ajouter de la complexité au problème d'aide à la décision, qui plus est pour un utilisateur non spécialiste de l'aide à la décision.

6.2.6 Les méthodes interactives

6.2.6.1 Présentation

Les deux approches du critère unique de synthèse et du surclassement de synthèse présentées ci-dessus sont bien adaptées à un ensemble d'actions A de taille raisonnable. Or, lorsque les actions varient en continue, il arrive que l'ensemble A soit très grand ou infini. Les méthodes interactives proposent une exploration localisée et répétitive de A (Ben Mena, 2000). Cette exploration est menée par une alternance de calculs et de dialogue entre l'homme d'étude et le décideur.

Dans les méthodes itératives l'homme d'étude modélise le problème d'aide à la décision en interaction avec le décideur (dialogue 1). Les résultats (calcul 1) doivent permettre au décideur de donner des informations supplémentaires sur ces préférences et/ou sur

l'ensemble A (dialogue 2). L'information produite permet à l'homme d'étude de proposer une nouvelle modélisation du problème d'aide à la décision (calculs 2) et ainsi de suite (Figure 6-7). La procédure prend fin, soit parce que le décideur s'estime satisfait de la proposition qui lui est faite, soit parce qu'il estime que la procédure n'apportera pas de réponses supplémentaires, soit parce que l'interrogateur est dans l'impossibilité de poursuivre le dialogue, ou estime que sa poursuite est inutile (Roy et Bouyssou, 1993).

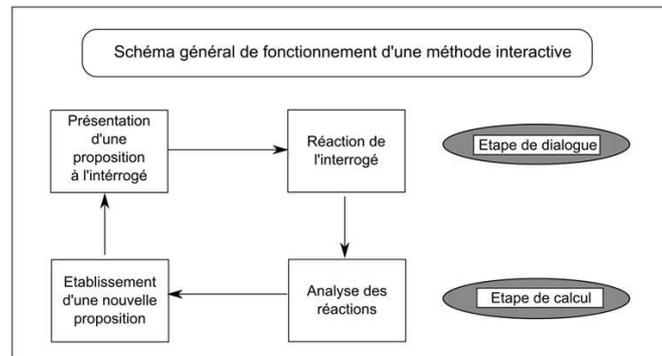


Figure 6-7 : Fonctionnement des méthodes interactives (Roy et Bouyssou, 1993)

6.2.6.2 Les méthodes STEM et PREFALC

La méthode STEM a été conçue pour aider l'utilisateur à se déplacer dans l'espace des actions. Elle présente à l'interrogé, lors de chaque itération, une proposition obtenue en minimisant une distance au point idéal de A (le point idéal de A est défini comme le vecteur de performance de l'action cible hypothétique a idéale à atteindre). Chaque itération est constituée d'une agrégation réalisée par une fonction d'agrégation temporaire, destinée à être modifiée entre les itérations.

Au cas où cette proposition est jugée insatisfaisante par le décideur au cours de la phase de dialogue, celui-ci est invité à réagir en indiquant un critère sur lequel il serait prêt à faire une concession et en indiquant la quantité maximale qu'il serait prêt à concéder sur ce critère. Cette indication est utilisée dans l'étape de calcul ultérieure pour redéfinir la zone d'intérêt et modifier la pondération utilisée dans la fonction d'agrégation temporaire.

La méthode PREFCALC permet de répondre à la problématique de tri en combinant des modèles additifs. Pour plus de détails sur ces méthodes, nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Roy et Bouyssou, 1993) et (Benayoun *et al.*, 1971).

6.2.6.3 Synthèse

Les méthodes itératives présentent deux intérêts importants : elles favorisent les procédures de choix lorsque l'on doit faire face à un grand nombre d'actions potentielles et elles permettent au décideur de se forger une conviction. Cependant, ces méthodes ne fournissent généralement pas un modèle permettant d'argumenter et de justifier simplement cette conviction vis-à-vis d'autres acteurs (Roy et Bouyssou, 1993). Or le modèle d'évaluation des digues fluviales doit permettre à l'utilisateur d'explicitier et de justifier ses choix. Par conséquent, leurs intérêts restent limités pour notre recherche.

6.2.7 *Synthèse sur les méthodes d'aide à la décision multicritère*

Nous avons présentés les méthodes de l'aide à la décision multicritère, les méthodes pour la construction d'un critère unique de synthèse et les méthodes de surclassement présentent des démarches intéressantes pour le problème d'aide à la décision lié à l'évaluation de performance des digues. Nous avons remarqué que les méthodes du critère unique de synthèse permettent de modéliser un problème d'aide à la décision multicritère sous la forme d'une fonction analytique, tandis que les méthodes de surclassement procèdent par comparaison des actions deux à deux sur chaque critère et analyse des coalitions de critères établissant une préférence.

Les méthodes du critère unique de synthèse peuvent modéliser des incertitudes ou des imprécisions dans le problème d'aide à la décision, sous format flou ou probabiliste. Les méthodes de surclassement permettent également de prendre en charge les incertitudes et imprécisions par l'introduction de seuil et de pseudo critères.

Dans un problème d'aide à la décision, il n'existe a priori pas de bonnes ou de mauvaises méthodes, mais plutôt une méthode mieux adaptée au problème multicritère : ces deux catégories de méthodes devront être mises en œuvre pour déterminer la mieux adaptée à notre recherche.

6.3 Indicateurs d'état, critères et indicateurs de performance pour les digues fluviales

Dans cette section, nous proposons d'exploiter les résultats de la modélisation fonctionnelle des digues fluviales (cf. chapitre 5) pour l'identification des indicateurs d'état des digues et des critères d'évaluation de leur performance, considéré pour le diagnostic des ouvrages et permettant la détermination des indicateurs de performance. Nous présentons l'intégration des résultats des recherches de (Serre, 2005) dans notre démarche. Successivement, nous présentons :

- les *indicateurs d'état* des digues ;
- les *critères* d'évaluation des digues ;
- les *indicateurs de performance* des digues.

6.3.1 *Indicateurs d'état des digues*

Les *indicateurs d'état* des digues sont les indicateurs des causes et des effets des défaillances des composants du système digue, identifiés lors de l'AMDE. Ils détaillent les informations à prendre en considération pour le renseignement de chaque critère d'évaluation des digues.

Les indicateurs d'état correspondent aux phénomènes entrant dans l'évaluation des critères. Ils peuvent être constitués d'une information brute, ou interprétée, à partir de plusieurs sources ou moyens d'obtention. Ils interviennent à plusieurs échelles : composant ou intra composant.

Chaque indicateur d'état synthétise des informations susceptibles de provenir de sources diverses. Les informations nécessaires au renseignement des indicateurs d'état sont des

données brutes issues de mesures, d'observations, de calculs ou de documents divers entrant en compte dans les études d'ingénierie classiques : données historiques, tests de perméabilité, caractérisation des matériaux, éléments de l'examen visuel, modélisations hydrauliques, etc.

Pour chacun des indicateurs d'état, nous avons établi (Tableau 6-2) :

- les **informations nécessaires** au renseignement de l'indicateur. Elles comprennent les caractéristiques des éléments décrits par chaque indicateur d'état.
 - o *Exemple : un ouvrage traversant devra être caractérisé par sa nature, sa fonction, son état et sa position ;*
- les **sources** des informations contenues dans les indicateurs d'état. Ceci détaille toutes les sources connues permettant de renseigner les indicateurs d'état.
 - o *Exemple : la présence et les caractéristiques d'un ouvrage traversant peuvent être connues à partir de l'inspection visuelle, de recensement, de reconnaissances géophysiques, d'archives, etc.*

Ces résultats serviront de point de départ pour analyser la qualité des données (cf. Partie 3).

Nous remarquons que la majorité des indicateurs d'état nécessitent l'intervention d'un ingénieur ou d'une personne formée au domaine de compétence des digues.

Critères (Ci)	Indicateurs d'état (IE)	Informations nécessaires	Sources
Singularités dans la fondation de la digue	Karst	Sensibilité du substratum aux phénomènes karstiques (fort, moyen, faible, nul)	Carte géologique Reconnaissances géophysiques
	Terriers	Position Espèce Géométrie de la fondation	Inspection visuelle Etude spécialiste Levé topographique Clisimètre
	Arbres/ Racines	Position sur la digue Substrat Etat sanitaire Espèce penché (O/N) Géométrie	Inspection visuelle Etude spécialiste
	Ouvrages traversants	Nature (PVC, béton, fonte...) Fonction (gaz, eau sous-pression) Etat (de 0 à 10) Position	Inspection visuelle Recensements Reconnaissances géophysiques ITV
	Contacts entre le corps de digue et les ouvrages traversant (conditions de pose)	Règles de l'art tranchée (0 à 10) Règles de l'art rebouchage au dessus de la tranchée (0 à 10) Matériaux utilisés, compactage	Inspection visuelle Plan Dossier d'ouvrage Reconnaissances géotechniques et géophysique

Tableau 6-2 : Indicateurs d'état, informations nécessaires et sources des données utiles au renseignement du critère « singularités dans le corps de digue »

Les indicateurs d'état peuvent être redondants.

Exemple : les indicateurs d'état « contexte morpho-dynamique » et « vitesses locales d'écoulement », servant à l'évaluation du critère -résistance de la fondation à l'érosion externe, décrivent un phénomène identique.

Nous avons ainsi identifié les 87 indicateurs d'état relatifs à l'ensemble des mécanismes de rupture des digues présentés dans la partie 1.

Serre (2005) a construit une base de règle pour l'évaluation visuelle des indicateurs d'état des digues. L'affectation à base de règles permet d'affecter l'évaluation d'un indicateur d'état donné à une catégorie de préférence selon des règles prédéfinies de type « SI...ALORS ».

Nous proposons de reprendre ces résultats dans notre modèle pour constituer une aide au renseignement des indicateurs d'état visuels des digues (Figure 6-8).

Exemple : SI il y a présence de grands arbres ayant leurs racines dans le corps de digue, ALORS le critère devra être évalué selon une valeur située sur l'intervalle [1-3].

		Indicateur d'état "Racines dans le corps de digue"										
Sous-indicateur		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
grands arbres	côté val et crête excellence		X	X	X							
												X
petits arbres	côté val et crête excellence							X	X			
												X
buissons	côté val et crête excellence									X	X	
												X

Figure 6-8 : Evaluation de l'indicateur d'état « Racines dans la recharge amont étanche », adapté de (Serre, 2005)

6.3.2 Critères pour le diagnostic des digues fluviales

Les **critères** sont les éléments décisionnels considérés par l'ingénierie pour évaluer la performance des digues. Ils correspondent aux éléments permettant de déterminer le degré de réalisation des fonctions assignées aux composants des ouvrages, relativement à leurs caractéristiques intrinsèques, aux sollicitations lors de crues et aux phénomènes pouvant occasionner des dégradations, voire des défaillances.

Les critères sont obtenus par l'AMDE. Ils correspondent aux phénomènes du modèle fonctionnel (cf. §5.2.3).

La mise en œuvre rigoureuse de l'analyse des modes de défaillance, de leurs causes et de leurs effets, encadrée par un groupe d'ingénieurs spécialisés, garantit l'exhaustivité des modes de défaillances et, donc garantit l'exhaustivité et la non redondance des critères d'évaluation de la performance des digues. Ainsi, les critères recouvrent l'exhaustivité des éléments de décision permettant l'établissement d'un diagnostic pour les digues en remblai homogène.

Les critères d'évaluation des digues sont renseignés à partir de l'information contenue dans les indicateurs d'état. La complexité de l'information nécessaire au renseignement des critères rend leurs évaluations difficilement formalisables selon des bases de règles prédéterminées. L'intervention d'un ingénieur spécialisé est souvent nécessaire. Pour renseigner un critère, il doit procéder tel que suit :

- consulter les sources des informations des indicateurs d'état ;
- consulter les informations nécessaires pour chaque indicateur d'états. *Exemple : pour l'indicateur d'état « terriers » la position sur ou aux abords de la fondation, l'espèce, la géométrie de la digue.*

Dans ce contexte, l'utilisation de la base de règles développée par (Serre, 2005) apporte une aide à l'ingénieur. Elle contient des indications générales pour l'évaluation des critères. *Exemple : pour le renseignement du critère « -singularités dans le corps de digues », la base de règles propose de retenir l'évaluation la plus défavorable parmi les indicateurs d'état de ce critère.*

En illustration, nous présentons ci-après les critères relatifs aux composants « corps de digue » et « fondation de la digue » du mécanisme de rupture par érosion interne (Tableau 6-3).

Perméabilité du corps de digue
Résistance du corps de digue à l'érosion interne
Singularités dans le corps de digue
Perméabilité de la fondation de la digue
Résistance de la fondation à l'érosion interne
Singularités dans la fondation de la digue
Résistance à l'érosion de contact corps de digue/ fondation
Singularités dans interface corps de digue/ fondation

Tableau 6-3 : Critères relatifs au mécanisme de rupture par érosion interne

Les critères synthétisent les informations relatives :

- aux fonctions d'étanchéité des éléments. *Exemple : perméabilité du corps de digue ;*
- aux fonctions de filtration des éléments. *Exemple : résistance du corps de digue à l'érosion interne ;*
- simultanément aux fonctions étanchéité et filtration. *Exemple : singularités dans le corps de digue.*

Nous avons ainsi identifié les 26 critères d'évaluation des digues relatifs à l'ensemble des mécanismes de rupture présentés dans la partie 1. L'ensemble des résultats est reporté en annexe F.

6.3.3 Indicateurs de performance

Les **indicateurs de performance** sont rattachés aux fonctions de conception du système (cf. §5.2.1.1). Ils renseignent sur l'aptitude au service de la digue pour chaque mécanisme de rupture (cf. §2.2).

La performance d'une digue dépend des critères d'évaluation de la digue. Il convient donc d'identifier une méthode d'aide à la décision permettant d'exploiter les évaluations des critères pour déterminer les indicateurs de performance pour les différents mécanismes de rupture.

Notre objectif est donc de développer un modèle tenant compte :

- de l'ensemble des données considérées par l'ingénierie lors du diagnostic complet des ouvrages ;
- des incertitudes associées à ces données et de l'interprétation experte.

Il nous faut donc explorer les méthodes de l'aide à la décision multicritère pour déterminer si l'une d'elle permet de construire des indicateurs de performance de digues répondant à ces exigences.

6.3.4 Synthèse

Nous avons défini les concepts d'indicateurs d'état, de critères et des indicateurs de performance.

L'exploitation des résultats de la modélisation fonctionnelle des digues permet l'identification des indicateurs d'état des digues et des critères d'évaluation des ouvrages considérés par l'ingénierie.

La démarche fonctionnelle garantit l'exhaustivité et la non redondance des critères d'évaluation des digues. En termes de résultats, ce sont quelque 87 indicateurs d'état et 27 critères qui ont été obtenus par notre démarche. Ceci constitue une base de connaissance très utile pour l'ingénierie.

Les indicateurs d'état listent et renseignent l'ensemble de l'information nécessaires au diagnostic des ouvrages. A partir de ceux-ci, un ingénieur peut évaluer les critères des digues.

L'étape suivante est la mise en œuvre d'une démarche d'aide à la décision exploitant les évaluations des critères et des ouvrages pour permettre l'identification des tronçons en fonction de leurs performances. Cette démarche devra permettre d'identifier les tronçons des linéaires prioritaires pour des actions d'inspection maintenance réparation, selon les critères considérés par l'ingénierie des digues.

6.4 Formalisation du problème d'aide à la décision et choix de méthodes appropriées pour les digues fluviales

6.4.1 Présentation du problème d'aide à la décision pour l'évaluation de la performance des digues

6.4.1.1 Démarche

Notre recherche se focalise sur l'identification d'une méthode d'aide à la décision multicritère susceptible de répondre aux deux problèmes d'aide à la décision distincts suivant (Figure 6-9) :

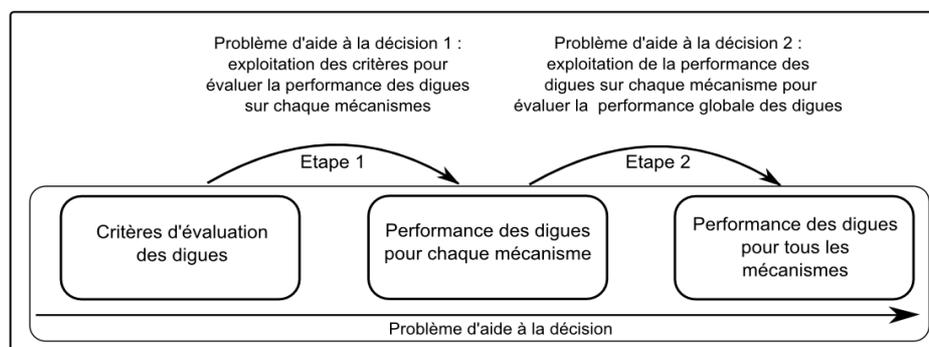


Figure 6-9 : Démarche de construction du modèle d'évaluation de la performance (Vuillet et al., 2012)

Le premier problème d'aide à la décision consiste en l'évaluation de la performance des digues pour chaque mécanisme de rupture à partir des critères d'évaluation des digues.

Le deuxième problème d'aide à la décision comprend l'évaluation de la performance globale vis-à-vis de l'ensemble des mécanismes, par l'exploitation des procédures d'évaluation de chaque mécanisme de rupture.

6.4.1.2 Problème d'aide à la décision (1) : des critères d'évaluation des digues à l'évaluation de la performance des digues pour chaque mécanisme de rupture

Pour le problème d'aide à la décision (1), nous cherchons une démarche d'aide à la décision exploitant les critères d'évaluation des digues pour permettre l'évaluation de la performance des tronçons de digue vis-à-vis de chaque mécanisme de rupture.

Pour cela, il convient de préciser les actions, objets de l'aide à la décision - c'est-à-dire préciser la notion de tronçons de digues homogènes -, d'identifier la problématique de référence, puis d'étudier les méthodes d'aide à la décision adaptées à ce problème d'aide à la décision. Nous suivons les trois étapes de la démarche méthodologique proposée par (Roy et Bouyssou, 1993):

- l'identification de l'ensemble d'actions A, objets de l'aide à la décision ;
- la définition d'une famille cohérente de critères ;
- la formalisation du problème d'aide à la décision, choix d'une problématique de référence et identification des méthodes appropriées.

6.4.1.3 Problème d'aide à la décision (2) : évaluation du niveau de performance globale

La procédure d'aide à la décision (2) se pose dans l'intérêt de trier les tronçons de digue par niveaux de performance globale pour tous les mécanismes, dans la perspective d'un futur outil d'aide à la décision intégrant la performance de la digue et la vulnérabilité des zones protégées.

Cette procédure fait l'objet d'une démarche similaire à la précédente. Elle est traitée dans cette partie en termes de résultats (cf. §6.5.4), mais n'est pas développée dans le reste du mémoire.

6.4.2 Identification de l'ensemble d'actions A objets de l'aide à la décision

6.4.2.1 Spécificité des digues

La définition de l'ensemble des actions A, objets de l'aide à la décision, pose la question d'une démarche de découpage du linéaire de digue en unités d'évaluation de la performance.

Pour d'autres systèmes à grands linéaires tels que les réseaux d'eau potable (Malandain, 1999) ou d'eau usée (Le Gauffre *et al.*, 2004), ce sont les éléments ou les singularités

physiques sur le terrain faisant l'objet de règles techniques qui fixent le découpage du linéaire en unités d'évaluation de la performance, c'est-à-dire en actions.

Une autre démarche de découpage des réseaux à grand linéaire consiste en un découpage arbitraire. Ceci est envisageable lorsque le réseau ne présente pas de variabilité de performance trop importante tout le long de son linéaire. Ceci a été réalisé notamment pour les réseaux routiers par un découpage forfaitaire du linéaire par unité kilométrique (Mendas, 2007).

Notre objectif est le découpage des tronçons de digues en fonction de l'évaluation de la performance des tronçons. Toutefois, il n'existe pas de méthodes reconnues pour le découpage du linéaire de digue en tronçons de performance homogène.

6.4.2.2 Identification de l'ensemble d'actions A

Devant l'absence de méthodologie de délimitation physique des objets de l'aide à la décision et compte tenu de la variabilité importante de la performance des digues sur leur linéaire, nous proposons d'évaluer les linéaires sur la base de profils ponctuels transversaux infiniment minces, repérés par des points métriques sur le linéaire. Le profil ponctuel constitue donc l'unité minimale sur laquelle la performance est considérée comme homogène.

En pratique, pour caractériser l'ensemble d'actions A, nous parlons de *profils ponctuels* qui correspondent à une unité spatiale repérée par une abscisse x sur le linéaire de digue. Un profil ponctuel est un profil de digue transversal, représentatif d'un tronçon linéaire pour lequel la performance est homogène. Un tronçon homogène est donc un ensemble, continu dans l'espace, de profils ponctuels correspondant à une évaluation homogène de performance

Au regard des modalités de définition des actions proposées dans (Vincke, 1989), l'ensemble d'actions A présente les caractéristiques suivantes :

- défini en extension : la discrétisation des linéaires de digues est faite sur les profils ponctuels ;
- stable : les caractéristiques des profils ponctuels de digue ne varient pas au cours de l'évaluation ;
- globalisé : chaque profil ponctuel de digue défini est exclusif de tout autre.

6.4.3 *Elaboration des critères, définition d'une famille cohérente de critères*

6.4.3.1 Modélisation des performances

La modélisation fonctionnelle des mécanismes (cf. §5.2) fondée sur les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement garantit, de par le caractère systématique des méthodes d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance, le caractère exhaustif et non redondant des modes de défaillance obtenus pour les digues, de leurs causes et leurs effets (Villemeur, 1988).

Cette démarche fonctionnelle identifie donc l'exhaustivité des dimensions de préférence relatives à l'évaluation des digues, synthétisées au moyen des critères d'évaluation des digues.

Elle garantit ainsi une famille cohérente de critères de décision : exhaustifs, en cohésion, non redondants et indépendants (Serre, 2009).

6.4.3.2 Notations

Nous adoptons le système de notations suivant :

- $C_{j, M}$ le $j^{\text{ème}}$ critère ($j = 1, 2, \dots, n$) du mécanisme M (M parmi les mécanismes de surverse, érosion interne, affouillement, glissement amont ou glissement aval) ;
- un profil ponctuel de la digue représentatif d'un tronçon homogène est repéré par un point métrique x sur le linéaire de digue ;
- $C_{j, M}(x)$: l'évaluation du critère j du mécanisme M au point x du linéaire de digue ;
- $IP_M(x)$: la performance au point métrique x du linéaire de digue pour le mécanisme de rupture M;
- $IP_{\text{GLOBAL}}(x)$: la performance globale de la digue au point métrique x .

6.4.3.3 Echelle de préférence

Nous proposons d'utiliser une double échelle de préférence (Figure 6-10) :

- une échelle de préférence discrète de cinq modalités pour formaliser et modéliser la connaissance experte ;
- une échelle de préférence continue entre $[0 ; 10]$ associée à l'échelle de préférence discrète. Elle permet des analyses quantitatives sur les valeurs des différents critères.

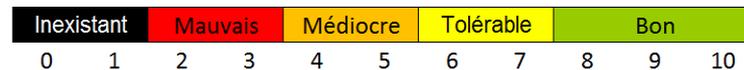


Figure 6-10 : Echelle de préférence proposée (Vuillet et al., 2012)

6.4.4 Formalisation du problème d'aide à la décision et identification de méthodes d'agrégation

6.4.4.1 Problématique

La procédure d'aide à la décision vise à permettre au décideur d'évaluer la performance de profils de digue répartis sur le linéaire. Dans ce problème d'aide à la décision, nous ne recherchons pas à comparer les profils de digues entre eux, mais bien à évaluer la performance des profils afin de permettre leur classement en fonction du niveau de sécurité. Le problème d'aide à la décision de notre étude n'est donc ni un problème de rangement, ni de choix, car dans les deux cas les méthodes consistent à comparer les actions les unes par rapport aux autres, et non par rapport à des profils de référence.

Notre étude relève donc d'un problème d'aide à la décision relatif au tri : les tronçons doivent être classés par niveaux de performance. En outre, les procédures de tri sont considérées

comme mieux adaptées au problème d'aide à la décision comportant un grand nombre d'actions. Or, la procédure d'évaluation des linéaires de digues et la définition adoptée pour l'ensemble des actions A objet de l'aide à la décision conduit à comparer un très grand nombre de profils.

6.4.4.2 Potentialité d'utilisation des méthodes de surclassement et du critère unique de synthèse

Deux procédures d'agrégation sont susceptibles de répondre au problème d'aide à la décision de tri et peuvent potentiellement exploiter des critères :

- la méthode de surclassement ELECTRE TRI (Roy et Bouyssou, 1993) : elle permet d'affecter les objets d'aide à la décision (les profils de digues) à des catégories de performance. Il s'agit d'une modélisation sophistiquée du problème d'aide à la décision nécessitant plusieurs paramétrages ;
- une méthode de construction d'un critère unique de synthèse, sous la forme d'une fonction mathématique, à l'image des méthodes de l'utilité multi attribut (Keeney, 1976). Nous proposons une agrégation analytique, intégrant des opérateurs issus des méthodes multicritères (les opérateurs de type conjonctifs Min, disjonctifs Max ou de compromis). Nous construisons ainsi des fonctions d'agrégations qui sont des fonctions analytiques mathématiques faisant intervenir des critères. Ces fonctions d'agrégation permettent également d'agréger les évaluations des critères de manière transparente.

Nous proposons de tester l'application de ces deux types de méthode pour construire les indicateurs de performance des digues.

6.4.5 Cas d'études

Nous proposons de tester les méthodes pour le tri des profils ponctuels de digues en considérant le mécanisme de rupture par érosion interne. Quatre cas d'étude correspondant à des profils aux caractéristiques différentes ont été définis et constituent l'ensemble des actions A utilisé pour l'application des méthodes. Ces quatre cas d'étude ont servi de support pour le comité d'expertise afin de tester les différentes méthodes d'aide à la décision :

(1) Cas d'étude d'un profil de digue très perméable mais résistant bien au phénomène d'érosion interne ;

(2) Cas d'étude d'un profil de digue peu perméable car constitué de matériaux fins, avec présence de grandes discontinuités dans le remblai causées par de nombreux travaux au cours de l'histoire de la digue ;

(3) Cas d'étude d'un profil de digue dont le corps de digue est peu perméable mais résiste faiblement à l'érosion interne, et où la fondation est perméable mais possède une bonne résistance à l'érosion interne. Dans ce cas, nous considérons une différence de granulométries à l'interface du corps de digue et de la fondation ;

(4) Cas d'étude d'un profil où le corps de digue est relativement perméable, faiblement résistant aux phénomènes d'érosion interne et présente des terriers d'animaux fouisseurs dans le corps de digue et en fondation.

Le Tableau 6-4 présente les évaluations des critères pour chaque cas d'étude.

Critères	Cas d'étude 1	Cas d'étude 2	Cas d'étude 3	Cas d'étude 4
C _{1, E1} Perméabilité du corps de digue	3	8	7	5
C _{2, E1} Résistance du corps de digue à l'érosion interne	8	4	4	6
C _{3, E1} Singularités dans le corps de digue	9	9	8	3
C _{4, E1} Perméabilité de la fondation	3	8	3	6
C _{5, E1} Singularités dans la fondation	8	4	8	7
C _{6, E1} Singularités dans la fondation de la digue	9	9	8	5
C _{7, E1} Résistance à l'érosion de contact corps de digue/fondation	8	4	2	6
C _{8, E1} Singularités à l'interface corps de digue/fondation	9	9	8	3

Tableau 6-4 : Évaluation des critères après application de l'affectation à base de règle sur les 4 cas d'études (Vuillet et al., 2012)

6.4.5.1 Comité d'expertise support du projet de recherche

Pour les besoins du projet de recherche, nous avons constitué un comité d'expertise formé d'ingénieurs spécialisés dans le domaine des ouvrages hydrauliques. Ce comité d'expertise intervient aux différentes phases du projet :

- en support de l'AMDE, pour la détermination des critères et des indicateurs d'état, ainsi que les terminologies retenues ;
- pour le paramétrage de la méthode ELECTRE TRI ;
- pour la construction des fonctions d'agrégation des critères uniques de synthèse ;
- pour les travaux de validation des méthodes à travers des cas d'études.

6.5 Mise en œuvre de méthodes multicritères pour l'évaluation de la performance des digues

6.5.1 Mise en œuvre de la méthode ELECTRE TRI pour l'évaluation de la performance des digues

Nous souhaitons évaluer l'intérêt de la méthode ELECTRE TRI pour notre recherche, sur la base des cas d'études décrits au paragraphe précédent.

6.5.1.1 Formulation de la méthode ELECTRE TRI pour les digues

Notations :

- x un profil de digue représentatif d'un tronçon homogène ;
- b^h un des profils de référence ;
- p_j , q_j et v_j les seuils de préférence, d'indifférence et de veto définis pour chaque critère d'évaluation des digues C_j ;

- P_j le poids affecté à chaque critère C_j ;
- P la somme des poids de tous les critères.

Nous testons la crédibilité de l'hypothèse selon laquelle chaque profil ponctuel x surclasse les différents profils de références. Pour un profil ponctuel x et un profil de référence donné b^h , nous calculons d'abord un indice de concordance $c_j(x, b^h)$ sur chaque critère d'évaluation des digues de la manière suivante :

$$- C_{j, M}(B^h) - C_{j, M}(x) > p_j \Leftrightarrow \boxed{c_j(x, b^h) = 0}$$

$$- p_j \geq C_{j, M}(B^h) - C_{j, M}(x) > q_j$$

$$\Leftrightarrow 1 > c_j(x, b^h) > 0 \Leftrightarrow \boxed{c_j(x, b^h) = \frac{C_{j, M}(x) - C_{j, M}(b^h) + p_j}{p_j - q_j}}$$

$$- C_{j, M}(B^h) - C_{j, M}(x) \leq p_j \Leftrightarrow \boxed{c_j(x, b^h) = 1}$$

Nous calculons ensuite un indice de concordance global $C(x, b^h)$ pour le surclassement du profil de référence par le profil ponctuel considéré. Ici l'indice de concordance global $C(x, b^h)$ est la somme pondérée des indices de concordance pour chaque critère :

$$- C(x, b^h) = \frac{\sum_{j=1}^n P_j c_j(x, b^h)}{P}$$

Nous calculons également un indice de discordance $d_j(x_i, b^h)$ pour chaque relation de surclassement (x_i, b^h) et sur chaque critère :

$$- C_{j, M}(B^h) - C_{j, M}(x) > v_j \Leftrightarrow \boxed{d_j(x, b^h) = 1}$$

$$- v_j \geq C_{j, M}(B^h) - C_{j, M}(x) > p_j$$

$$\Leftrightarrow 1 > d_j(x, b^h) > 0 \Leftrightarrow \boxed{d_j(x, b^h) = \frac{C_{j, M}(b^h) - C_{j, M}(x) - p_j}{v_j - p_j}}$$

$$- C_{j, M}(B^h) - C_{j, M}(x) \leq p_j \Leftrightarrow \boxed{d_j(x, b^h) = 0}$$

Enfin, le rapport des deux indices permet de calculer la crédibilité de la proposition $\sigma_j(x_i; b^h)$:

$$- \sigma_j(x; b^h) = C(x, b^h) \cdot \prod_{j: d_j(x, b^h) > C(x, b^h)} \frac{1 - d_j(x, b^h)}{1 - C(x, b^h)}$$

S'il n'y a pas de critère d'évaluation des digues pour lequel $d_j(x, b^h) > C(x, b^h)$, alors :

$$- \sigma_j(x; b^h) = C(x, b^h)$$

La crédibilité de la proposition $\sigma_j(x_i; b^h)$ est à comparer au seuil de coupe λ , le seuil de coupe λ représentant l'exigence souhaitée vis-à-vis des relations de surclassement entre un profil ponctuel a et un profil de référence b^h (Maystre *et al.*, 1994).

6.5.1.2 Application aux digues et paramétrage d'ELECTRE TRI

Nous proposons de mettre en œuvre la méthode ELECTRE TRI de façon classique de manière à trier les tronçons de digues en trois catégories C1, C2 et C3 délimitées par deux profils de référence $b^1 = 3$ et $b^2 = 7$ (Figure 6-11). Ces profils correspondent à une simplification de l'échelle de préférence des critères (Figure 6-10).

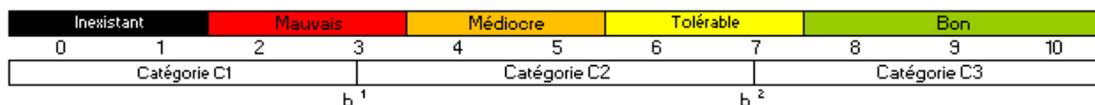


Figure 6-11 : Profils de référence et catégories d'affectation proposées pour l'application d'ELECTRE TRI (Vuillet *et al.*, 2012)

Les deux profils possèdent des valeurs constantes pour l'ensemble des critères : $b^1 = 3$ et $b^2 = 7$. Les poids attribués à chaque critère ont été déterminés par le comité d'expertise (Tableau 6-5).

	C1, E1	C2, E1	C3, E1	C4, E1	C5, E1	C6, E1	C7, E1	C8, E1
b^1	3	3	3	3	3	3	3	3
b^2	7	7	7	7	7	7	7	7
Poids P_j	0,33	0,66	1	0,33	0,66	1	1	1

Tableau 6-5 : Profils de référence et poids des critères (Vuillet *et al.*, 2012)

Pour le paramétrage de la méthode ELECTRE TRI, il convient de renseigner :

- le seuil de préférence p et le seuil d'indifférence q ;
- le seuil de coupe λ , qui permet des ajustements sur l'acceptation des relations de surclassement. Ainsi, si les résultats des procédures optimistes et pessimistes divergent pour une action (action affectée à deux catégories différentes), le réglage du seuil de coupe λ peut permettre d'atteindre une concordance des résultats.

L'échelle de préférence étant la même pour tous les critères, nous choisissons les mêmes valeurs de seuil pour tous les critères. Les valeurs de seuil adoptées sont les suivantes :

- seuil d'indifférence $q = 1$: cette valeur est motivée par l'unité de l'échelle de préférence (Figure 6-10) ;

- seuil de préférence $p = 3$: cette valeur est motivée par l'incrément entre deux modalités qualitatives (Figure 6-10) ;
- seuil de coupe $\lambda = 0,65$ qui est dans le domaine des valeurs généralement utilisées.

6.5.1.3 Vecteurs de performance des tronçons de digues évalués

Nous proposons la visualisation graphique pour chaque critère, des vecteurs de performance des profils de référence délimitant les catégories d'affectation et des vecteurs de performance des cas d'études (Figure 6-12).

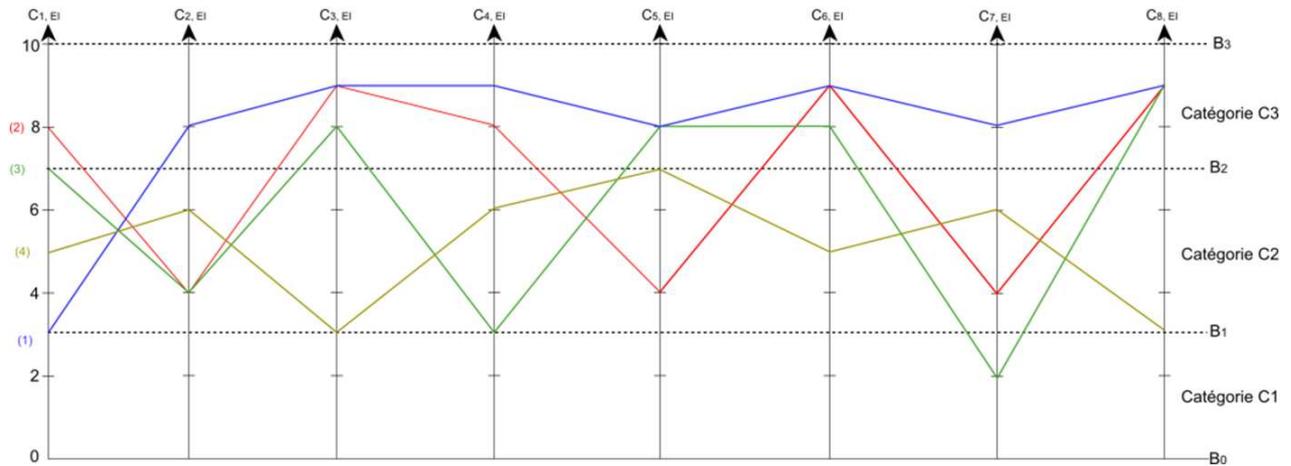


Figure 6-12 : Vecteurs de performance des cas d'études (1), (2), (3) et (4) : profils de références et catégories d'affectation (Vuillet et al., 2012)

6.5.1.4 Résultats

Nous proposons de visualiser le détail des relations de surclassement entre les cas d'études (Tableau 6-6) et les profils de référence et les catégories d'affectation de chaque cas d'étude (Tableau 6-7).

Relations de surclassement				
	b^0	b^1	b^2	b^3
Cas d'étude (1)	>	>	I	<
Cas d'étude (2)	>	>	<	<
Cas d'étude (3)	>	>	I	<
Cas d'étude (4)	>	>	<	<

Tableau 6-6 : Relation de surclassement profils/actions (Vuillet et al., 2012)

	Affectation	
	Pessimiste	Optimiste
Cas d'étude (1)	C3	C3
Cas d'étude (2)	C2	C2
Cas d'étude (3)	C3	C3
Cas d'étude (4)	C2	C2

Tableau 6-7 : Catégories d'affectation des actions selon les deux procédures (Vuillet et al., 2012)

Les cas d'études (1) et (3) sont affectés à la catégorie C3, correspondant aux modalités bon/excellent (score de performance global supérieur à 7) et les cas d'études (2) et (4) sont affectés à la catégorie C2, correspondant respectivement aux modalités médiocre/ tolérable (score de performance global compris entre 3 et 7).

Ces résultats sont ensuite comparés aux résultats de la mise en œuvre de la méthode du critère unique de synthèse (§ 6.5.3.1).

6.5.2 *Mise en œuvre d'une méthode du critère unique de synthèse pour les digues*

Nous proposons la mise en œuvre d'une méthode du critère unique de synthèse pour chaque mécanisme de rupture par la combinaison d'opérateurs d'agrégation selon des fonctions d'agrégation propres à chaque mécanisme.

6.5.2.1 *Notation*

$C_{j,M}$ est un $j^{\text{ème}}$ critère ($j = 1, 2, \dots, n$) du mécanisme M (M parmi les mécanismes de surverse, érosion interne, affouillement, glissement). Soit un profil ponctuel repéré par son abscisse x du linéaire de digue, nous notons :

- $C_{j,M}(x)$ l'évaluation du critère j du mécanisme M pour le profil x ;
- $A_{k,M}(x)$ le score de l'agrégation k constitutive du mécanisme M ;
- H un opérateur d'agrégation parmi Min, Max, Moy ou Moy-P ;
- $IP_M(x)$ le score de performance pour le mécanisme M au point métrique x du linéaire de digue.

6.5.2.2 *Principe*

L'évaluation du critère unique de synthèse est réalisée par des étapes d'agrégations intermédiaires notées $A_{k,S}$ où A est la $k^{\text{ième}}$ agrégation ($k=1, 2, \dots, n$) de critères associée à une séquence fonctionnelle du mécanisme M (Figure 6-13).

Dans le cas d'un mécanisme M comprenant k agrégations ($k = 1, \dots, n$) de critères, nous écrivons une agrégation quelconque de critères au sein de M de la façon suivante :

$$A_{k,M}(x) = H [C_{1,M}(x), \dots, C_{j,M}(x)]$$

Nous écrivons la formulation du calcul du critère unique de synthèse, noté IP (indicateur de performance), de la manière suivante :

$$IP_M(x) = H [A_{1,M}(x), \dots, A_{k,M}(x)]$$

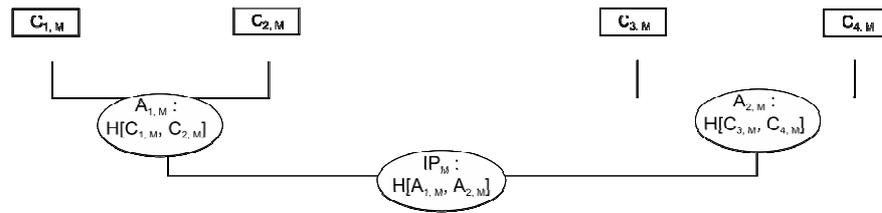


Figure 6-13 : Principe de construction du critère unique de synthèse pour l'évaluation de la performance des digues (Vuillet et al., 2012)

6.5.2.3 Application au mécanisme d'érosion interne

Sur la base de la modélisation fonctionnelle du mécanisme d'érosion interne (Figure 6-14) et après consultation du comité d'expertise, nous proposons pour la construction du critère unique de synthèse la procédure d'agrégation des critères suivante :

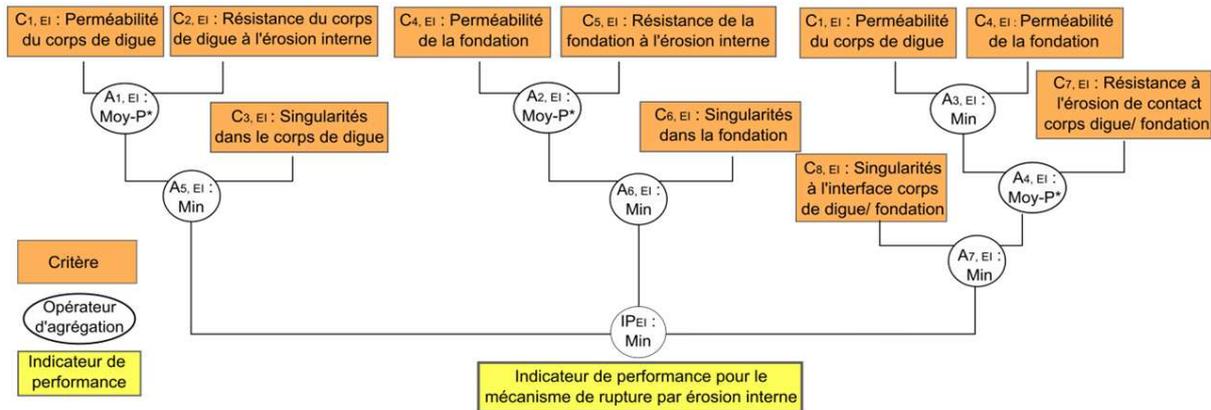


Figure 6-14 : Construction d'un critère unique de synthèse pour le tri des tronçons vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne (Vuillet et al., 2012)

La procédure d'agrégation (Figure 6-14) a suivi la logique fonctionnelle du mécanisme de rupture par érosion interne, que nous analysons ci-après.

La première séquence fonctionnelle modélise la propension d'une digue à résister à l'érosion interne, évaluée par sa perméabilité et sa résistance à l'érosion interne. Le processus d'agrégation qui traduit cette séquence fonctionnelle est une compensation entre les critères relatifs à la « perméabilité » et à la « résistance à l'érosion interne » (tableau 1). Pour l'évaluation du mécanisme d'érosion interne, la résistance à l'érosion interne est plus importante que la perméabilité du remblai. Nous proposons donc une moyenne pondérée avec les coefficients suivant : 1/3 pour le critère $C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digue et 2/3 pour le critère $C_{2, EI}$ -résistance du corps de digue à l'érosion interne. Nous proposons la même agrégation pour les critères $C_{4, EI}$ -perméabilité de la fondation et $C_{5, EI}$ -résistance de la fondation à l'érosion interne.

Pour le corps de digues et pour la fondation, nous formulons les agrégations de la façon suivante :

$$A_{1, EI}(x) = \text{Moy-P} [C_{1, EI}(x), C_{2, EI}(x)] = \text{Moy} [(1/3) C_{1, EI}(x), (2/3) C_{2, EI}(x)]$$

$$A_{2, EI}(x) = \text{Moy-P} [C_{4, EI}(x), C_{5, EI}(x)] = \text{Moy} [(1/3) C_{4, EI}(x), (2/3) C_{5, EI}(x)]$$

Pour l'interface corps de digue/ fondation, le processus d'agrégation intègre la plus mauvaise perméabilité entre le corps de digue et la fondation, d'où :

$$A_{4, EI}(x) = \text{Moy-P} [A_{3, EI}(x), C_{7, EI}(x)] = \text{Moy} [(1/3) A_{3, EI}(x), (2/3) C_{7, EI}(x)]$$

$$\text{avec } A_{3, EI}(x) = \text{Min} [C_{1, EI}(x), C_{4, EI}(x)]$$

La seconde séquence fonctionnelle modélise la présence de singularités susceptibles de provoquer des phénomènes d'érosion interne. Pour cela, nous retenons le plus mauvais score entre les caractéristiques propres à la digue à développer l'érosion interne ($A_{1, EI}$, $A_{2, EI}$ et $A_{4, EI}$) et l'évaluation des singularités susceptibles de provoquer une érosion interne. Ainsi nous agrégeons les variables $A_{1, EI}$, $A_{2, EI}$ et $A_{4, EI}$ avec les critères évaluant la présence de singularités dans l'ouvrage au moyen d'un opérateur Min :

$$A_{5, EI}(x) = \text{Min} [A_{1, EI}(x), C_{3, EI}(x)]$$

$$A_{6, EI}(x) = \text{Min} [A_{2, EI}(x), C_{6, EI}(x)]$$

$$A_{7, EI}(x) = \text{Min} [A_{4, EI}(x), C_{8, EI}(x)]$$

L'agrégation finale du critère unique de synthèse retient le score le plus défavorable pour l'érosion interne entre le corps de digue $A_{5, EI}(x)$, la fondation $A_{6, EI}(x)$ et l'interface corps de digue - fondation $A_{7, EI}(x)$:

$$IP_{EI}(x) = \text{Min} [A_{5, EI}(x), A_{6, EI}(x), A_{7, EI}(x)]$$

6.5.2.4 Résultats de la méthode du critère unique de synthèse

La mise en œuvre de la méthode du critère unique de synthèse pour les quatre cas d'études est détaillée ci-dessous (Tableau 6-8, Tableau 6-9, Tableau 6-10 et Tableau 6-11).

Cas (1) : digue constituée de graviers, très perméable, géométrie très large, bonne résistance à l'érosion interne	Scores des critères	Scores des agrégations intermédiaires (1)	Scores des agrégations intermédiaires (2)	Score de l'agrégation intermédiaire (3)	Score de l'indicateur de performance
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	3	6,3			
C2, EI : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	8		6,3	6,3	
C3, EI : Singularités dans le corps de digue	9		9		
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	3	6,3			
C5, EI : Résistance de la fondation à l'érosion interne	8		6,3	6,3	
C6, EI : Singularités dans la fondation de la digue	9		9		6,3
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	3	3			
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	3		6,3		
C7, EI : Résistance à l'érosion de contact corps de digue/ fondation	8	8		6,3	
C8, EI : Singularités interface corps de digue/ fondation	9		9		

Tableau 6-8 : Résultats de la méthode du critère unique de synthèse appliquée au mécanisme de rupture par érosion interne, cas d'étude n°1 (Vuillet et al., 2012)

Cas (2) : digue constituée de matériaux fins peu perméables, bonne géométrie ; présence de grandes discontinuités dans le remblai causées par de nombreux travaux au cours du temps	Scores des critères	Scores des agrégations intermédiaires (1)	Scores des agrégations intermédiaires (2)	Score de l'agrégation intermédiaire (3)	Score de l'indicateur de performance
C1, E1 : Perméabilité du corps de digue	8				
C2, E1 : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	4	5,3	5,3	5,3	
C3, E1 : Singularités dans le corps de digue	9	9			
C4, E1 : Perméabilité de la fondation de la digue	8	5,3			
C5, E1 : Résistance de la fondation à l'érosion interne	4		5,3	5,3	
C6, E1 : Singularités dans la fondation de la digue	9	9			5,3
C1, E1 : Perméabilité du corps de digue	8	8			
C4, E1 : Perméabilité de la fondation de la digue	8		5,3		
C7, E1 : Résistance à l'érosion de contact corps de digue/ fondation	4	4		5,3	
C8, E1 : Singularités interface corps de digue/ fondation	9		9		

Tableau 6-9 : Résultats de la méthode du critère unique de synthèse appliquée au mécanisme de rupture par érosion interne, cas d'étude n°2 (Vuillet et al., 2012)

Cas (3) : corps de digue peu perméable, faible résistance à l'érosion interne, mauvaise perméabilité de la fondation, bonne résistance à l'érosion interne => granulométries différentes à l'interface	Scores des critères	Scores des agrégations intermédiaires (1)	Scores des agrégations intermédiaires (2)	Score de l'agrégation intermédiaire (3)	Score de l'indicateur de performance
C1, E1 : Perméabilité du corps de digue	7	5			
C2, E1 : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	4		5	5	
C3, E1 : Singularités dans le corps de digue	8	8			
C4, E1 : Perméabilité de la fondation de la digue	3				
C5, E1 : Résistance de la fondation à l'érosion interne	8	6,3	6,3	6,3	
C6, E1 : Singularités dans la fondation de la digue	8	8			2,3
C1, E1 : Perméabilité du corps de digue	7	3			
C4, E1 : Perméabilité de la fondation de la digue	3		2,3		
C7, E1 : Résistance à l'érosion de contact corps de digue/ fondation	2	2		2,3	
C8, E1 : Singularités interface corps de digue/ fondation	8		8		

Tableau 6-10 : Résultats de la méthode du critère unique de synthèse appliquée au mécanisme de rupture par érosion interne, cas d'étude n°3 (Vuillet et al., 2012)

Cas (4) : corps de digue de "qualité très moyenne", fondation satisfaisante, présence de singularités de type terriers dans le corps de digue et en fondation	Scores des critères	Scores des agrégations intermédiaires (1)	Scores des agrégations intermédiaires (2)	Score de l'agrégation intermédiaire (3)	Score de l'indicateur de performance
C1, E1 : Perméabilité du corps de digue	5	5,7			
C2, E1 : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	6		3	3	
C3, E1 : Singularités dans le corps de digue	3	3			
C4, E1 : Perméabilité de la fondation de la digue	6	6,7			
C5, E1 : Résistance de la fondation à l'érosion interne	7		5	5	
C6, E1 : Singularités dans la fondation de la digue	5	5			3
C1, E1 : Perméabilité du corps de digue	5	5			
C4, E1 : Perméabilité de la fondation de la digue	6		5,7		
C7, E1 : Résistance à l'érosion de contact corps de digue/ fondation	6	6		3	
C8, E1 : Singularités interface corps de digue/ fondation	3		3		

Tableau 6-11 : Résultats de la méthode du critère unique de synthèse appliquée au mécanisme de rupture par érosion interne, cas d'étude n°4 (Vuillet et al., 2012)

Les résultats obtenus sont les suivants :

- le cas d'étude (1) obtient le score de 6,3 ce qui correspond à la modalité « tolérable » ;
- le cas d'étude (2) obtient le score de 5,3 correspondant à la modalité « médiocre » ;
- les cas d'étude (3) et (4) obtiennent respectivement les scores de 2,3 et de 3, correspondant à la modalité « mauvais ».

6.5.3 Comparaisons des résultats des deux méthodes et justification du choix du critère unique de synthèse

6.5.3.1 Comparaison des résultats

Les résultats des méthodes ELECTRE TRI et du critère unique de synthèse sont exprimés sur une échelle de préférence commune (Figure 6-11), ce qui permet d'établir une correspondance des résultats d'ELECTRE TRI exprimés en scores à ceux du critère unique de synthèse exprimés en classes. Nous proposons ainsi la comparaison des résultats donnés par les deux méthodes (Tableau 6-12) :

Résultats	Cas d'études	Cas (1)	Cas (2)	Cas (3)	Cas (4)
ELECTRE TRI	scores classes	(1) > 7 C3	$7 \geq (2) > 3$ C2	(3) > 7 C3	$7 \geq (2) > 3$ C2
Critère unique de synthèse	scores classes	6.3 C2	5 C2	2.3 C1	3 C1

Tableau 6-12 : Correspondance et comparaison des résultats

Pour le cas d'étude (1), nous observons une différence entre les résultats des deux méthodes : la méthode ELECTRE TRI classe le profil ponctuel en C3 (correspondant à un score compris entre de 7 à 10) et la méthode du critère unique de synthèse donne un score de 6,3.

Pour le cas d'étude (2), nous observons une relative concordance des résultats des deux méthodes : la méthode ELECTRE TRI classe le profil ponctuel en C2 (correspondant à un score compris entre 3 et 7), en accord avec l'application de la méthode du critère unique de synthèse, qui donne le score de 5.

Pour le cas d'étude (3), nous observons une divergence forte des résultats : la méthode ELECTRE TRI classe le profil ponctuel en C3 (score supérieur à 7), tandis le score obtenu par la méthode du critère unique de synthèse est de 2,3.

Pour le cas d'étude (4), nous observons également une divergence forte des résultats : la méthode ELECTRE TRI classe le profil ponctuel en C2 (correspondant à un score compris entre 3 à 7), tandis que le score de la méthode du critère unique de synthèse est de 3.

Ainsi, nous constatons qu'à l'exception du cas d'étude (3), les résultats donnés par les deux méthodes divergent sensiblement.

6.5.3.2 Analyse des résultats

Les divergences de résultats sont imputables à la nature des critères définis pour l'évaluation des digues. En effet les critères d'évaluation des digues ont été identifiés par l'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillance (cf. chapitre 5). Les critères sont donc associés aux séquences de défaillances des mécanismes de rupture et possèdent entre eux des liens fonctionnels du fait des liens fonctionnels entre les séquences de défaillance successives.

Ces liens sont assimilables à des dépendances (Roy, 2009), conduisant à la nécessité de prise en compte les liens fonctionnels des critères pour apprécier l'importance relative des critères dans le niveau de performance du tronçon.

Illustrons cette analyse pour le mécanisme d'érosion interne. Dans ce mécanisme, la défaillance de la fonction « limitation des flux hydrauliques » précède la défaillance de la fonction « résistance à l'érosion interne » (Figure 5.8). Considérons deux profils ponctuels de digues a et b tels que a est très peu perméable, à l'inverse de b largement perméable :

$$C_{1, EI}(a) = 8 \text{ et } C_{1, EI}(b) = 2$$

Si les scores des autres critères sont les mêmes pour les profils de digues a et b , le profil ponctuel a sera nettement préféré à b puisque $C_{1, EI}(a) > C_{1, EI}(b)$.

Cependant, nous notons que cette relation de surclassement est beaucoup plus marquée si les deux profils ponctuels a et b possèdent une très faible résistance à l'érosion interne (i.e. $C_{2, EI}(a) = C_{2, EI}(b) = 0$) que si les deux profils ponctuels résistent très bien à l'érosion interne (i.e. $C_{2, EI}(a) = C_{2, EI}(b) = 10$). En effet, dans le cas où les deux profils présentent une faible résistance à l'érosion interne, le fait qu'un profil soit très perméable conduit à de forts risques de rupture de l'ouvrage, alors qu'un ouvrage imperméable peut limiter l'occurrence du mécanisme d'érosion interne. En revanche, si les deux profils possèdent une forte résistance à l'érosion interne, le critère $C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digue a une importance relative plus faible, les deux ouvrages étant susceptibles de résister au développement du mécanisme. Nous illustrons ainsi une relation de compensation entre $C_{1, EI}$ et $C_{2, EI}$. Ces deux critères ne présentent donc pas de liens dépendance et nous pouvons mettre en œuvre une agrégation de type moyenne.

En revanche, l'agrégation avec le critère $C_{3, EI}$ diffère car l'évaluation de ce critère ne peut compenser (ou être compensée par) les évaluations de $C_{1, EI}$ et/ou $C_{2, EI}$. Les liens fonctionnels entre ces critères et $C_{3, EI}$ posent des problèmes de dépendance qui ne peuvent être modélisés par une procédure d'agrégation de type moyenne. Nous modélisons ces liens en agrégeant $C_{3, EI}$ avec le résultat de la moyenne pondérée de $C_{1, EI}$ et $C_{2, EI}$ par un opérateur de type Min. Nous remarquons qu'ainsi, l'importance relative du critère $C_{3, EI}$, dans le niveau de performance du tronçon varie en fonction de son score. Si $C_{3, EI}$ est inférieur à l'agrégation de $C_{1, EI}$ et $C_{2, EI}$, il sera retenu comme résultats. Inversement, si ce critère obtient une meilleure évaluation que l'agrégation de $C_{1, EI}$ et $C_{2, EI}$ il ne sera alors pas pris en compte.

Ceci illustre les dépendances caractéristiques de la famille de critères choisie pour les digues. L'importance relative des critères pour le décideur est liée aux séquences fonctionnelles de défaillance de chaque mécanisme.

6.5.3.3 Bilan et choix d'une méthode

La méthode ELECTRE TRI, bien que répondant à la problématique de tri, ne permet pas de modéliser les liens fonctionnels qu'ont entre eux les critères d'évaluation des digues (Roy et Bouyssou, 1993). Ces liens fonctionnels sont inhérents à la démarche méthodologique mise en œuvre (analyse fonctionnelle et AMDE)-

Ainsi les critères d'évaluation des digues sont utilisés dans la méthode ELECTRE TRI de façon totalement indépendante, alors qu'ils possèdent entre eux des liens fonctionnels qui ne sont alors pas pris en compte dans l'évaluation de la performance pour chaque mécanisme de rupture. De plus, ELECTRE TRI ne fait pas de compensation entre les critères, comme c'est le cas entre $C_{1, EI}$ et $C_{2, EI}$. Ceci explique les divergences sensibles dans la mise en œuvre des deux méthodes sur les cas d'étude (cf. § 6.5.3.1). Nous en concluons que la méthode ELECTRE TRI n'est pas parfaitement adaptée à notre recherche.

Nous avons donc retenu la méthode du critère unique de synthèse combinant des opérateurs selon des fonctions d'agrégation. Les résultats obtenus ont été acceptés par l'ensemble des membres du comité et testés sur plusieurs cas d'études. La méthode du critère unique de synthèse a fait l'objet des plusieurs séances de travail du comité d'expertise et a été conduite sur l'ensemble des mécanismes de rupture des digues. Ceci a conduit à un modèle d'aide à la décision complet couvrant l'ensemble des mécanismes des digues. Dans ce modèle, les données d'entrée sont les indicateurs d'état qui permettent de renseigner des critères d'évaluation des digues. A partir de fonctions d'agrégation analytique, nous pouvons alors calculer les indicateurs de performance pour chaque mécanisme à partir des critères d'évaluation. Nous présentons les fonctions analytiques propres à chaque mécanisme de rupture des digues en annexe G.

Les résultats du modèle d'aide à la décision ont été testés sur de multiples études de cas, analogues à celles montrées précédemment (cf. §6.4.5) Ces résultats ont été analysés par le comité d'expertise, ce qui a permis des corrections et des ajustements successifs des règles d'agrégation jusqu'à obtenir des résultats satisfaisants pour le comité d'expertise et analogues à une analyse d'ingénierie traditionnelle.

6.5.4 Construction d'un indicateur de performance globale des digues

Pour traiter le problème d'aide à la décision (2), nous proposons de retenir également la méthode du critère unique de synthèse pour l'évaluation d'un niveau de performance globale des profils de digue. La construction d'un critère unique de synthèse évaluant le score global de tous les mécanismes consiste en l'utilisation de l'opérateur Min pour agréger les niveaux de performance des quatre mécanismes de rupture en un critère unique de niveau global :

$$IP_{GLOBAL}(x) = \text{Min} [IP_{EI}(x), IP_{AFF}(x), IP_{GLI}(x), IP_S(x)]$$

avec : IP_{EI} l'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne, IP_{AFF} l'indicateur de performance du mécanisme d'affouillement, IP_{GLI} l'indicateur de performance du mécanisme de glissement et IP_S l'indicateur de performance du mécanisme de surverse.

Afin de faciliter l'aide à la décision, l'indicateur de performance global est évalué sur une échelle de décision à quatre valeurs (Figure 6-15).

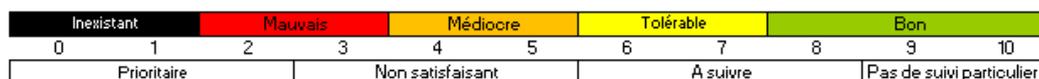


Figure 6-15 : Échelle de décision proposée pour l'évaluation de la performance globale (Vuillet et al., 2012)

6.6 Apports de la démarche et discussion

6.6.1 Apport de la démarche pour l'ingénieur et le gestionnaire de digue

Le modèle d'aide à la décision fondé sur la méthode du critère unique de synthèse est destiné à être intégré un logiciel SIG permettant une semi-automatisation des calculs d'évaluation de la performance des digues. Un tel outil SIG permet de faciliter grandement le travail d'évaluation de la performance des grands linéaires. Il comprend :

- une base de données spatialisée rassemblant l'ensemble des informations disponibles relatives aux indicateurs d'état ;
- le modèle d'aide à la décision et les équations de calculs décrits dans l'article.

La procédure de fonctionnement du logiciel repose sur les étapes détaillées ci-dessous :

- la collecte et le référencement des données relatives aux indicateurs d'état ;
- la segmentation du linéaire pour chaque critère ;
- le calcul du score des critères par l'affectation à base de règles ;
- la segmentation du linéaire pour l'identification de l'ensemble A ;
- Le calcul de la performance de chaque tronçon homogène.

La base de données permet de collecter, de référencer spatialement et d'archiver toutes les indicateurs d'état relatifs aux digues à évaluer. La base de données est renseignée par un technicien ou un ingénieur spécialisé en fonction des informations à encoder. Chaque indicateur d'état fait l'objet de champs propres et est référencé linéairement.

Exemples : renseignement de l'indicateur d'état « présence de fuites » aux points ponctuels d'observation repérés par leur abscisse ; renseignement de l'indicateur d'état « perméabilité » sur des tronçons présentant une valeur homogène pour la perméabilité et repérés entre deux abscisses.

Une requête du logiciel permet de segmenter spatialement le linéaire en tronçons homogènes. La segmentation est réalisée pour chaque critère, selon les variations des valeurs de leurs indicateurs d'état. Ainsi, à chaque critère correspond un découpage du linéaire (Figure 6-16).

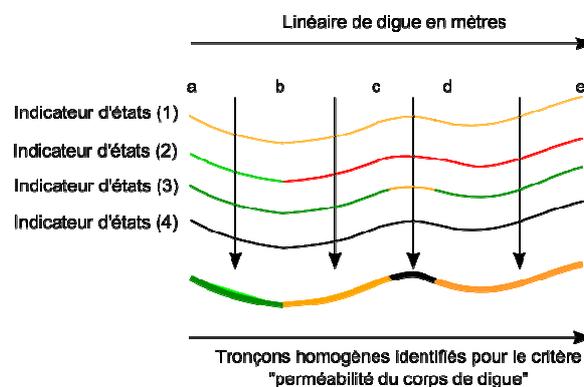


Figure 6-16 : Illustration de segmentation du linéaire pour un critère donné (Vuillet et al., 2012)

Exemple appliqué à l'évaluation du critère « perméabilité du corps de digue »: Ce critère est renseigné par quatre indicateurs d'état « perméabilité du matériau », « géométrie », « fuites » et « étanchéité de la protection amont ». On considère :

- a, b, c, d et e: cinq abscisses du linéaire de digue considéré (Figure 6-16) ;
- l'indicateur d'état « perméabilité du matériau » a été estimé *médiocre* entre [a ; e] ;
- on distingue deux tronçons pour l'indicateur d'état « profils géométriques » : *bon* entre [a ; b] et *mauvais* de [b ; e] ;
- des petites fuites ont été observées entre [c ; d] où l'indicateur d'état « fuites » a été jugé *médiocre* ;
- la digue ne comprend pas de protection amont : l'indicateur d'état « étanchéité de la protection amont » est *inexistant* sur tout le linéaire.
- pour le critère « perméabilité du corps de digue », le logiciel découpe donc le linéaire en quatre tronçons :
- un premier délimité entre [a ; b] où la perméabilité est *médiocre*, la géométrie *bonne*, et où l'on ne trouve ni fuite, ni protection amont ;
- un second délimité entre [b ; c] où la perméabilité est *médiocre*, la géométrie *mauvaise*, et où l'on ne trouve ni fuite, ni protection amont ;
- un troisième délimité entre [c ; d] où la perméabilité est *médiocre*, la géométrie *mauvaise* et où l'indicateur d'état « fuite » prend la valeur *médiocre* ;
- le quatrième délimité entre [d ; e] où la perméabilité est *médiocre*, la géométrie *mauvaise* et où l'on ne trouve ni fuite, ni protection amont.

Pour chaque tronçon homogène identifié, l'affectation à base de règles permet de renseigner automatiquement les critères d'évaluation des digues. L'ingénieur intervient dans un rôle de contrôle des règles au contexte d'utilisation. Lorsque cela est nécessaire il peut estimer directement les scores des critères.

Une nouvelle requête du logiciel SIG permet de segmenter le linéaire, par tronçons pour lesquels l'ensemble des valeurs des critères d'évaluation sont semblables. Ces tronçons correspondent à l'ensemble A de notre problème d'aide à la décision et ils sont chacun représenté par un profil ponctuel.

Le modèle d'évaluation basé sur le critère unique de synthèse permet d'obtenir automatiquement l'indicateur de performance pour chaque mécanisme de rupture IP_S , puis pour l'indicateur de performance global du tronçon IP. Les tronçons sont ainsi triés automatiquement selon la double échelle définie précédemment. L'ingénieur intervient pour le contrôle du processus et des résultats produits.

Dans l'exemple développé, le logiciel identifie les tronçons homogènes en termes de critère. Pour chaque tronçon homogène ainsi identifié, il calcule ensuite les indicateurs de performance des mécanismes et l'indicateur de performance global, permettant de trier les tronçons par niveaux de performance (Figure 6-17).

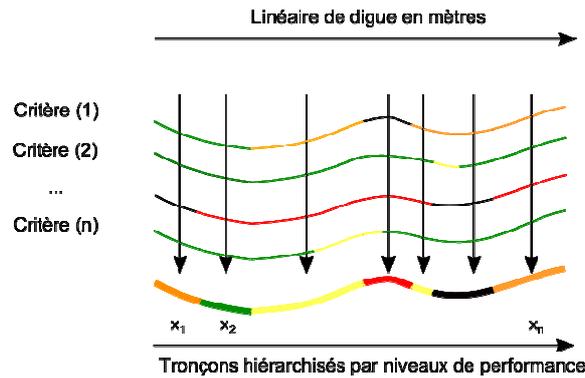


Figure 6-17 : Renseignement linéaire et score de performance (Vuillet et al., 2012)

Couplé à un logiciel SIG, le modèle d'évaluation de la performance des digues apporte une aide précieuse à l'ingénierie et aux gestionnaires de digues. La semi-automatisation de l'évaluation des digues permet de simplifier significativement le travail de l'ingénieur spécialisé pour la réalisation de diagnostic.

Dans la démarche proposée, l'ingénieur intervient principalement pour le contrôle des processus et concentre son travail d'ingénierie sur des points précis d'analyse des digues.

Par ailleurs, le logiciel SIG permet au gestionnaire de digues de mettre à jour l'évaluation de la performance des ouvrages dans le temps. Lors de chaque inspection de routine, en crue ou post crue, un technicien peut saisir à nouveau les informations relatives aux indicateurs d'état et relancer le calcul des scores de performance. Le tri automatique des tronçons en catégories permettra alors au gestionnaire de prioriser ses actions d'investigation ou de travaux.

6.6.2 Limites du modèle déterministe

La principale limite du modèle déterministe est qu'il ne fait pas la distinction entre une évaluation des indicateurs de performance produite à partir de données imparfaites (exemple : données issues d'un examen visuel fait dans de mauvaises conditions si la digue est couverte de végétation ou difficile d'accès) et une évaluation des indicateurs de performance produite à partir de données de qualité (exemple : archives détaillées, levés topographiques, étude hydraulique, examen visuel détaillé, inspection en crue, modélisation géotechnique). Par ailleurs, si l'ingénieur a un doute sur les caractéristiques d'un élément d'ouvrage, le modèle déterministe ne permet pas de modéliser cette incertitude et il est difficile pour lui de s'engager sur l'évaluation d'un critère selon une seule modalité de l'échelle. Dans un contexte où les informations relatives aux digues sont sujettes à de fortes variabilités et où les données sont généralement imparfaites, il apparaît important de prendre en compte l'imperfection des données dans le modèle d'évaluation de la performance.

6.6.3 Synthèse

Notre recherche a produit un modèle d'aide à la décision pour évaluer la performance de grands linéaires de digues. Les questions scientifiques liées à notre recherche concernent l'identification des objets de l'aide à la décision, le choix et la formulation d'une méthode multicritère d'aide à la décision adaptée aux grands linéaires de digues.

Pour cela, nous avons développé un modèle d'aide à la décision permettant d'identifier les linéaires de digue en fonction de leur performance. Sur les bases d'une analyse fonctionnelle et d'une AMDE (Serre, 2009), nous avons dans un premier temps défini les objets de l'aide à la décision. Les actions définies sont les profils ponctuels de digues repérés par leur abscisse sur le linéaire de digue. Pour le décideur, les tronçons de digues homogènes sont définis à partir de l'évaluation de la performance des profils ponctuels de digue, un tronçon de digue étant alors un ensemble continu dans l'espace de profils ponctuels correspondant à une évaluation homogène de performance.

Ensuite, nous avons identifié une famille cohérente de critères d'évaluation des digues et nous avons défini la problématique de référence. Il s'agit d'un problème de tri qui consiste à ordonner les profils de digues par classe de performance.

Deux méthodes multicritères d'aide à la décision susceptibles de traiter notre problème de tri ont été formulées pour les linéaires de digues : la méthode de surclassement ELECTRE TRI et une méthode de construction d'un critère unique de synthèse par combinaison d'opérateurs d'agrégation.

Les résultats des deux méthodes ont fait apparaître des divergences sensibles, imputables à la nature des critères définis pour l'évaluation des digues. En effet les critères d'évaluation des digues possèdent entre eux des liens fonctionnels du fait de la modélisation fonctionnelle des mécanismes de rupture des digues. Ces liens sont assimilables à des dépendances, ce qui traduit le fait que le score d'un critère peut faire varier la pondération ou l'importance d'un autre critère dans le processus d'aide à la décision.

Les résultats mettent en évidence que la méthode ELECTRE TRI ne permet pas de modéliser les liens fonctionnels qu'ont entre eux les critères d'évaluation des digues, même si ces critères ne présentent pas de dépendance structurelle. Cette limite générale de la méthode avait déjà été formulée par Roy et Bouyssou (1993). Nous en concluons que la méthode ELECTRE TRI n'est pas satisfaisante par rapport à notre recherche de modèle d'aide à la décision pour les digues.

Nous avons donc formulé une méthode de construction du critère unique de synthèse en combinant des opérateurs d'agrégation selon des fonctions analytiques.

La méthode du critère unique de synthèse a fait l'objet de plusieurs séances de travail du comité d'expertise et a été conduite sur l'ensemble des mécanismes de rupture des digues (cf. Annexe G). Ceci a conduit à un modèle d'aide à la décision complet couvrant l'ensemble des mécanismes des digues. Dans ce modèle, les données d'entrée sont les indicateurs d'état qui permettent de renseigner les critères d'évaluation des digues. A partir de fonctions d'agrégation mathématiques, nous pouvons alors calculer les indicateurs de performance pour chaque mécanisme à partir des critères d'évaluation.

Les résultats du modèle d'aide à la décision ont été testés sur de multiples études de cas, analogues à celles présentées dans ce chapitre (cf. §6.5.2.4). Ces résultats ont été analysés par le comité d'expertise, ce qui a permis des corrections et des ajustements successifs des fonctions d'agrégation jusqu'à obtenir des résultats satisfaisants pour le comité d'expertise et analogues à une analyse d'ingénierie traditionnelle.

La méthode du critère unique de synthèse formulé pour les grands linéaires de digues permet de modéliser les processus fonctionnels de défaillance des digues. Elle permet également d'établir un tri pour chaque profil ponctuel au moyen du score produit sur une double échelle continue et à modalités qualitatives. Ce tri permet ensuite au gestionnaire de digues de prioriser ses actions d'investigation, de maintenance et de réparation. La méthode du critère unique de synthèse offre également une transparence dans l'agrégation des différents critères

d'évaluation des digues, permettant au décideur de consulter les scores d'évaluation de la performance des profils ponctuels, mais aussi les scores des critères d'évaluation des digues pour chaque mécanisme de rupture.

La principale limite du modèle produit concerne la non prise en compte des incertitudes des évaluations des critères liées aux imperfections des données des digues. Cet aspect est traité dans la partie suivante de ce mémoire (cf. Partie 3).

Partie 3

**Développement d'un
modèle probabiliste
d'évaluation de la
performance des
digues**

Chapitre 7 Imperfections des données utilisées pour le diagnostic des digues

Le principe de fonctionnement du modèle d'évaluation de la performance des digues nécessite l'intervention d'un ingénieur spécialisé. Celui-ci devra interpréter les données « brutes » disponibles sur les linéaires de digues (mesures, observations, estimations etc.) pour l'évaluation de chaque critère.

La qualité des données disponibles pour le diagnostic des digues est souvent perfectible et leur quantité est encore généralement insuffisante. L'ingénieur doit ainsi évaluer les critères en se basant sur des données imparfaites.

Dans ce contexte, il apparaît important que l'ingénieur puisse se prononcer sur la fiabilité de ses évaluations des critères en fonction des imperfections des données d'entrée et de prendre en compte ces imperfections dans l'évaluation de l'indicateur de performance. Cela permettant d'associer un niveau de confiance aux indicateurs de performance produits, et, par là, de mieux définir les investigations complémentaires à mener.

Nous présentons dans ce chapitre les formes d'imperfection des données couramment évoquées dans la littérature, puis nous présentons et recensons les types d'imperfections des données des digues susceptibles d'altérer la qualité des données utilisées pour l'évaluation des critères. Cela permettra par la suite d'orienter le choix d'une démarche de traitement des imperfections pour notre modèle.

7.1 Les données imparfaites

Le terme d'imperfection décrit de manière générale les notions de qualité et de quantité de données disponibles. Classiquement on distingue *trois grands types d'imperfections* des données : *l'incertitude*, *l'imprécision* et *l'incomplétude* (Bouchon-Meunier, 1995).

7.1.1 L'incertitude

« L'incertitude résulte essentiellement d'une épreuve dont le résultat n'est pas connu a priori et pourrait changer si on la recommençait ; il représente la variabilité intrinsèque d'un phénomène » (Boissier, 1993). Bouchon-Meunier (1995) le décrit comme « un doute sur la validité d'une connaissance ». Par exemple : je crois que la date de construction d'un bâtiment date de 1852 mais je n'en suis pas sûr, (cas d'une connaissance précise mais incertaine).

L'incertitude peut être de deux natures : aléatoire ou épistémique (O'Hagan *et al.*, 2006).

On parle *d'incertitude aléatoire* pour la proportion d'occurrences d'un événement sur une longue répétition d'expériences. Selon Oberkampf *et al* (2004), *l'incertitude aléatoire* est décrite comme la variabilité, l'incertitude stochastique, ou encore l'incertitude irréductible. Elle est utilisée pour décrire les variations inhérentes associées à un système physique ou à l'environnement considéré.

Exemple : lors d'un pile ou face non pipé, on sait qu'il y a une chance sur deux de tomber sur pile ou sur face, mais l'on ne peut pas dire avec certitude de quel côté tombera la pièce.

L'*incertitude épistémique* est relative à une connaissance imparfaite pour quelque chose qui n'est pas en elle-même aléatoire et qui est en principe susceptible d'être connue. Selon Oberkampf *et al* (2004), elle est associée à l'incertitude réductible, subjective ou liée aux hypothèses de modélisation. Dans l'incertitude épistémique, nous regroupons les incertitudes liées à des données insuffisantes, aux hypothèses des modèles ou aux possibles erreurs de mesure.

Exemple : un expert doit se prononcer sur la fréquence de défaillance d'un élément de construction constitutif d'un ouvrage génie civil. Il ne connaît pas les modalités précises de construction de cet élément susceptibles de favoriser une défaillance, ni son état actuel. Il connaît, de par son expérience, la valeur la plus vraisemblable de la durée de vie du produit ainsi que des cas de défaillance précoce ou, au contraire, de longévité. Une meilleure connaissance de la construction de l'élément, des tests de résistance ou une inspection détaillée de l'ouvrage pourrait lui permettre de réduire l'incertitude de son estimation.

7.1.2 L'imprécision

L'imprécision correspond à une difficulté dans l'énoncé d'une connaissance. On lui associe les qualificatifs du type « environ », « à peu près », « dans l'intervalle », « compris entre », « approximativement » (Bouchon-Meunier, 1995).

On est certain de l'intervalle de valeurs possibles, mais on ne sait pas quelle est la valeur précise au sein de l'intervalle.

Exemple : un document atteste de l'inexistence d'un bâtiment en 1865. Un second document indique que le bâtiment existait en 1878. Si les deux documents sont fiables et sont les seuls disponibles, on est certain que la construction du bâtiment se situe entre 1865 et 1878, mais la date exacte demeure imprécise.

L'imprécision peut découler également du matériel de mesure utilisé (Favre, 2004).

Exemple : en géotechnique, les appareils de mesure de poids présentent des précisions variables en fonction du matériel et de leur qualité.

7.1.2.1 L'incomplétude

L'incomplétude correspond à une absence de données pour un paramètre quelconque. Elle peut aussi correspondre à une incomplétude partielle, lorsqu'il manque un point de mesure.

7.1.3 Liens entre les différentes formes d'imperfections

Les concepts d'incertitudes, d'imprécisions et d'incomplétudes sont liés. Les incomplétudes entraînent des incertitudes, les imprécisions peuvent de même être associées à des incomplétudes, et elles engendrent des incertitudes au cours de leurs manipulations (Bouchon-Meunier, 1995). (Lair, 2000) envisage les incomplétudes comme entraînant des incertitudes et les traite donc comme telles, les faisant apparaître sous la forme d'un « indicateur d'ignorance ». En revanche, (Masson, 2005) précise que l'incomplétude peut être interprétée comme un cas particulier de l'imprécision.

La recherche de la diminution de l'imprécision d'un énoncé tend à augmenter son incertitude. (Boissier, 2000) met ainsi en évidence deux arguments souvent conflictuels : la *fiabilité de*

l'information et son *informativité*, qui est la *quantité d'information* contenue dans son signal.

Il y a au moins pour certaines données un lien entre incertitude et imprécision. Il conviendra de déterminer l'équilibre entre imprécision et incertitude souhaitable, c'est-à-dire les degrés acceptables de précision et de fiabilité. On parle alors dans ce cas de *l'entropie d'une donnée*. En théorie de l'information, l'entropie de Shannon correspond à la quantité d'information contenue dans un signal physique (Weaver *et al.*, 1975). Par extension elle permet de mesurer l'incertitude moyenne d'une variable aléatoire (Klir, 2004). Talon (2006) précise que cette entropie est inversement proportionnelle à la certitude d'un signal.

En plus des formes d'imperfection évoquées, l'information peut être redondante et présenter des conflits, des contradictions ou encore des confortations. On parle alors d'*inconsistance*, pour traduire la présence de conflits ou de contradictions (Masson, 2005).

D'autres auteurs, tels Cooke (1991), considèrent que l'imperfection des données se divise entre incertitude et ambiguïté. L'incertitude est alors considérée comme ce qui découle d'un nombre insuffisant d'observations et l'*ambiguïté* comme ce qui est relatif à des défauts de langage. Toujours selon Cooke (1991), on doit pouvoir réduire l'incertitude d'un phénomène en augmentant le nombre d'observations et réduire l'ambiguïté des modalités de son occurrence par des conventions de langage. Cela revient à rassembler dans les incertitudes toutes les imperfections non relevant du domaine cognitif.

7.1.4 Synthèse

Nous constatons que l'imperfection des données peut être de plusieurs formes et que ces formes d'imperfection peuvent être liées. En outre, il existe des divergences entre les auteurs de référence quant à la nature et liens entre les différentes formes d'imperfections. Les formes d'imperfections les plus fréquemment citées dans la littérature sont l'incertitude, l'imprécision et l'incomplétude. Dans la suite, nous assimilerons l'inconsistance et l'ambiguïté comme des sources d'incertitude et d'imprécision.

7.2 Imperfections des données utilisées pour l'évaluation des digues fluviales

7.2.1 Typologie des imperfections des données des digues

Nous avons présenté dans le chapitre précédent le développement d'un modèle déterministe permettant d'évaluer la performance des digues. Toutefois, à l'instar des pratiques de l'ingénierie, le modèle ne permet pas de rendre compte de l'incertitude des résultats de performance des digues. Or les niveaux de performance obtenus sont sujets à de nombreuses imperfections. Leurs évaluations reposent sur l'exploitation de critères modélisant une information soumise à plusieurs types d'imperfections. Parmi celles-ci, on rencontre :

- les incertitudes aléatoires. Dans celles-ci, nous trouvons les incertitudes liées à la variabilité naturelle des propriétés des matériaux. *Exemple : nous possédons un grand nombre de mesures d'une propriété étudiée du remblai constitutif d'un corps de digue. On constate que d'un point à un autre, la propriété varie ; ceci implique, si la mesure de la propriété est considérée comme parfaite, une variabilité spatiale de cette propriété au*

sein du remblai. De même, pour un point donné la propriété mesurée peut varier au cours du temps à cause de mécanismes de dégradations ou de vieillissement.

Nous trouvons également les incertitudes liées au caractère aléatoire des sollicitations hydrauliques et hydrodynamiques. *Exemple : quelle est l'occurrence d'une crue atteignant telle hauteur critique et venant impacter une digue ?*

- les incertitudes épistémiques. Dans celles-ci nous trouvons les incertitudes liées à la dissémination des investigations le long des linéaires et la représentativité des données disponibles. *Exemple : nous disposons de sondages géotechniques renseignant de la nature d'un remblai de digue dont on souhaite connaître la performance. Nous ne sommes pas certains que les sondages soient représentatifs de l'ensemble de l'ouvrage, longitudinalement comme transversalement. Nous pouvons en revanche réduire cette incertitude épistémique en augmentant le nombre de sondages.*

Nous trouvons également les incertitudes liées aux modèles, qui reposent sur des hypothèses présentant des incertitudes. *Exemple : les résultats d'une modélisation hydraulique de la ligne piézométrique au sein de la digue dépendent des hypothèses adoptées pour la perméabilité des matériaux, la durée de sollicitation des ouvrages, etc. ;*

- les imprécisions, liées aux mesures des phénomènes physiques, liées aux conditions et au format de l'inspection visuelle des ouvrages, aux imprécisions des matériels d'investigation ou aux hypothèses sur lesquelles sont basés les essais géotechniques. *Exemple : un point bas a été levé lors de l'inspection visuelle et estimé à quelques décimètres. Mais nous ne connaissons pas sa mesure exacte de dénivelé ;*
- l'incomplétude, liée au fait que les digues sont encore généralement des ouvrages mal connus. L'absence de plan de construction, la rareté des crues critiques et l'absence de suivi des travaux, parfois même l'absence de maître d'ouvrage reconnu conduisent à un déficit général d'information.

7.2.2 Recensement des types d'imperfections des données des digues

7.2.2.1 Choix des formes d'imperfection des digues

Afin d'orienter le choix d'un format de prise en compte des imperfections que l'ingénieur devra considérer dans l'évaluation des critères, il est nécessaire de déterminer la ou les formes prépondérantes d'imperfection des informations. Nous choisissons de retenir les formes suivantes :

- l'incertitude, aléatoire et épistémique, qui regroupe les phénomènes aléatoires, la variabilité naturelle, les données insuffisantes, les hypothèses de modélisation ou les erreurs de mesures ;
- l'imprécision, liée au langage ou au matériel de mesure.

L'incomplétude est envisagée comme un cas extrême d'incertitude et d'imprécision. Elle ne sera donc pas prise en compte de manière distincte.

7.2.2.2 Méthodologie d'analyse des données des digues

Le recensement est réalisé au niveau des indicateurs d'état, jalons intermédiaires entre les données « brutes » et les critères. Nous proposons d'utiliser une échelle de notation pour quantifier la présence d'imprécision ou d'incertitude pour chaque indicateur d'état et d'affecter ensuite une pondération au score obtenu en fonction de l'importance de l'indicateur d'état dans le renseignement du critère.

Nous affectons à chaque forme d'imperfection des indicateurs d'état, incertitude ou imprécision, une note comprise entre 0 et 3 (0 traduisant l'absence de la forme d'imperfection et 3 traduisant une présence potentielle de la forme d'imperfection très importante).

Nous analysons ensuite les formes d'imperfection des indicateurs d'état en fonction des sources de données déterminées lors de l'application de l'AMDE (cf. Tableau 6.2).

Pour tenir compte de l'importance relative de la forme d'imperfection d'un indicateur d'état dans l'évaluation d'un critère, on affecte à chaque indicateur d'état une pondération comprise entre 1 et 3 (1 traduisant une importance faible et 3 traduisant une importance maximum).

Cette démarche nous permet de connaître un ordre de grandeur de la part relative des formes d'imperfection que l'ingénieur doit prendre en compte lors de l'évaluation des critères.

7.2.2.3 Résultats

Un exemple d'analyse des formes d'imperfection des indicateurs d'état associés au critère « perméabilité du corps de digue » du scénario de rupture par érosion interne est présenté ci-dessous (Tableau 7-1).

Dans cet exemple, nous avons estimé l'incertitude et l'imprécision d'indicateurs d'état relatifs aux éléments géotechniques des ouvrages, à l'observation de phénomènes, aux mesures topographiques des ouvrages ou d'estimation de l'étanchéité apporté par les protections de talus. Ils ont été notés comme fortement susceptibles d'être sujets à incertitudes (note de 3 pour l'incertitude pour les deux indicateurs d'état), avec une imprécision résiduelle due au matériel de mesure ou à l'observation des fuites (note de 1 pour l'imprécision pour les deux indicateurs d'état).

Les indicateurs d'état « géométrie » et « étanchéité de la protection amont » ont été considérés comme peu susceptibles d'être entachés d'incertitude (note de 1 pour l'incertitude) et d'imprécision (note de 1 pour l'imprécision).

Les poids affectés à l'importance des indicateurs d'état dans l'évaluation du critère permettent de relativiser l'importance de l'imperfection de l'indicateur d'état dans l'évaluation du critère. Nous considérons les indicateurs d'état « perméabilité du matériau », « fuites » et « géométrie » comme prépondérants dans l'évaluation du critère « perméabilité du corps de digue ». Nous affectons une pondération de 3 pour « perméabilité du matériau » et « fuites » et une pondération de 2 pour « géométrie ». L'indicateur d'état « étanchéité de la protection amont » jugé moins important dans l'évaluation du critère a été affecté d'une pondération de 1.

Erosion interne		Imperfections des indicateurs d'états				Imperfections des critères		
Critères (Ci)	Indicateurs d'états (IE)	Incertitude	Imprécision	Poids	Incertitude pondérée	Imperfection pondérée	Incertitude	Imprécision
"Perméabilité" du corps de digue	Perméabilité du matériau	3	1	3	9	3		
	Géométrie : hauteur/largeur	1	1	2	2	2		
	Fuites	3	1	3	9	3	21	9
	Etanchéité de la protection amont	1	1	1	1	1		

Tableau 7-1 : Exemple des formes d'imperfection dans le critère « perméabilité du corps de biadigue »

Les résultats détaillés pour chaque critère sont disponibles en annexe H. L'analyse de l'ensemble des critères a montré un total de 410 occurrences d'incertitudes pour 265 occurrences d'imprécision. Elle montre donc que la principale forme d'imperfection à prendre en compte pour les critères d'évaluation des digues est l'incertitude, qui apparait sous différentes natures : la variabilité naturelle des données géotechniques, épistémiques liées à des essais limités, de modèle (notamment hydro morphologique et hydrauliques), d'essais (notamment géophysiques).

7.2.3 Synthèse

Nous avons vu que les données des digues présentent de nombreuses sources d'imperfections et nous avons dressé une typologie des imperfections des données nécessaires à l'établissement d'un diagnostic de digue. Dans ce contexte, l'évaluation de la performance des digues fluviales est par nature imparfaite, comportant des incertitudes et des imprécisions.

Nous avons recensé les formes d'incertitude et d'imprécision que l'ingénieur doit modéliser dans l'évaluation des critères. Il est apparu que l'incertitude des données est la forme la plus présente dans les critères d'évaluation des digues.

Chapitre 8 Méthodes de prise en compte des données imparfaites

Notre travail vise à prendre en compte les imperfections des données dans le modèle d'évaluation de la performance des digues. Il s'agit de proposer une démarche de représentation et de propagation des imperfections dans ce modèle.

Le chapitre précédent a présenté les différents types d'imperfections des données digues utilisées pour l'évaluation des critères. Nous cherchons ici l'identification d'une méthode permettant à l'ingénieur de modéliser l'incertitude entachant l'évaluation des critères en considérant une information imparfaite ainsi qu'une méthode pour propager ces incertitudes dans le modèle d'évaluation de la performance.

Plusieurs théories permettent de traiter des problèmes comportant des informations imparfaites : probabilités basés sur des statistiques, probabilités subjectives (De Finetti, 1937), théorie des sous-ensembles flous (Zadeh, 1965), des possibilités (Zadeh, 1978) et des masses de croyances (Shafer, 1976). Nous les présentons ici, illustrées d'exemples, afin de déterminer si l'une d'elle convient pour la modélisation des incertitudes des évaluations des critères. Nous présentons également les principales techniques de propagation des incertitudes associées à ces théories.

8.1 La théorie des probabilités

8.1.1 Présentation

La **théorie des probabilités** est une théorie mathématique utilisée pour décrire et quantifier les situations ou phénomènes caractérisés par le hasard et/ou l'incertitude (expérience aléatoire).

Par exemple (Berglund, 2006), lors du jet d'un dé, les lois de Newton devraient en principe permettre de calculer la trajectoire exacte du dé, connaissant sa position et sa vitesse initiales, et d'en déduire sur quelle face il va tomber. En pratique, non seulement ce calcul est extrêmement difficile, mais le résultat dépend aussi de manière très sensible des conditions initiales. Il est alors plus simple de considérer cette expérience comme aléatoire et d'admettre que le dé peut tomber sur chacune de ses six faces avec la même probabilité de 1/6.

La théorie des probabilités trouve son origine au XVII^{ème} siècle, avec Fermat et Pascal, pour le traitement des problèmes de gains aux jeux de hasard (Procaccia et Suhner, 2003). Elle a été formalisée par Kolmogorov, en définissant un espace probabilisé à partir duquel sont établis les axiomes de la théorie des probabilités.

La théorie des probabilités s'intéresse à une **expérience aléatoire** (E), c'est-à-dire à une expérience dont l'issue est incertaine, mais qui appartient à un certain ensemble (univers).

L'**univers** (Ω) est l'espace de toutes les issues (w) ou résultats possibles de l'expérience E . Un **événement aléatoire** (associé à l'expérience E) est un sous-ensemble de Ω dont on peut dire au vu de l'expérience s'il est réalisé ou non. Un événement est donc une partie de Ω .

Une **tribu** (\mathbb{T}) est l'ensemble de tous les événements possibles associés à Ω , stable par intersection et réunion dénombrable, stable par passage au complément et qui contient Ω ainsi que l'ensemble vide \emptyset .

La **probabilité** (P) est une application qui, à un événement aléatoire B quelconque lié à l'expérience aléatoire E , associe un nombre réel (noté $P(B)$), de telle manière que P satisfasse les **axiomes de Kolmogorov** :

- la probabilité d'un événement est représentée par un nombre réel compris entre 0 et 1 ;
- la probabilité d'obtenir un quelconque résultat de l'univers est égale à 1 ;
- la probabilité d'un événement qui est la réunion (dénombrable) disjointe d'événements est égale à la somme des probabilités de ces événements.

Un **espace de probabilité** est un triplet composé d'un univers, d'une tribu de parties de l'univers et d'une mesure de probabilité (Ω, \mathbb{T}, P).

C'est à partir de la définition de l'espace probabilisé que l'on peut définir une variable aléatoire. On appelle **variable aléatoire** réelle toute application X de Ω dans \mathbb{R} telle que pour tout intervalle I de \mathbb{R} l'ensemble $\{\omega \in \Omega \mid X(\omega) \in I\}$ est un événement. X est discrète si l'ensemble de ses valeurs noté $X(\Omega)$ est fini ou dénombrable, continue autrement. Une variable aléatoire est donc une fonction définie sur l'ensemble des éventualités, c'est-à-dire l'ensemble des résultats possibles d'une expérience aléatoire. Il s'agit d'une variable pouvant prendre n'importe quelle valeur d'un ensemble déterminé de valeurs numériques, et à laquelle est associée une loi de probabilité. Elle est caractérisée par sa **fonction de répartition** et par sa **densité de probabilité**.

La **loi de la variable aléatoire** X , est la mesure de probabilité de la variable aléatoire X . Si X est une variable aléatoire continue, la loi de X est donnée par la connaissance de :

$$P(a \leq X \leq b) \forall a < b \in \mathbb{R}$$

La **fonction de répartition** d'une variable aléatoire X est l'application F_X de \mathbb{R} dans $[0,1]$ définie par :

$$F_X(x) = P(X \leq x), \forall x \in \mathbb{R}$$

La **densité de probabilité** d'une variable aléatoire X est la fonction $f_X(x)$ telle que :

$$P(a \leq X \leq b) = F_X(b) - F_X(a) = \int_a^b f_X(x) dx$$

La fonction de densité $f_X(x)$ est une fonction positive d'intégrale égale à 1 sur \mathbb{R} et peut s'écrire :

$$f_X(x) = dF_X(x) / dx$$

Un phénomène aléatoire ou une information imparfaite peuvent être considérés comme une variable aléatoire et modélisés par une loi de probabilité.

Les probabilités peuvent faire l'objet de deux interprétations (Villemeur, 1988):

- **L'interprétation fréquentiste ou statistique** envisage les probabilités comme basées sur un événement vérifié empiriquement, dont on est sûr qu'il se reproduira à l'identique lors d'expériences répétées ;
- **L'interprétation subjectiviste** correspond à une vue qui envisage la probabilité comme la mesure d'un état de connaissance, d'un degré de croyance ou d'un état de confiance (De Finetti, 1937). Savage (1954) indique que la probabilité mesure la confiance qu'un individu a dans la vérité d'une proposition particulière.

L'ajustement d'une loi de probabilité peut donc être effectué par différentes approches :

- à partir d'observations statistiques, lorsque l'on dispose de suffisamment de données ;
- à partir d'avis experts, pour les phénomènes rares, pour lesquels on dispose de peu de données.

Nous présentons ci-après des exemples correspondant à une interprétation fréquentiste/statistique, pour des cas où l'on dispose de séries de données. Compte tenu de leur intérêt dans notre application, nous consacrons un paragraphe spécifique aux probabilités subjectives (cf. §8.2).

8.1.2 Exemple de modélisation probabiliste des données d'entrée appliquée dans le domaine des barrages

Cet exemple est extrait des travaux de (Carvajal, 2009), qui propose la mise en œuvre de méthodes fiabilistes pour évaluer la sécurité structurale des barrages-poids en Béton Compacté au Rouleau. La méthode comporte notamment la modélisation probabiliste des propriétés des matériaux constitutifs du barrage.

La résistance à la compression des matériaux est modélisée à partir de séries de données statistiques. Pour le cas présenté, 28 valeurs de résistance à la compression ont été obtenues par des carottages répartis sur les différentes couches du barrage (Figure 8-1). Carvajal (2009) propose la modélisation par des variables aléatoires des différents paramètres permettant l'évaluation de la sécurité du barrage.

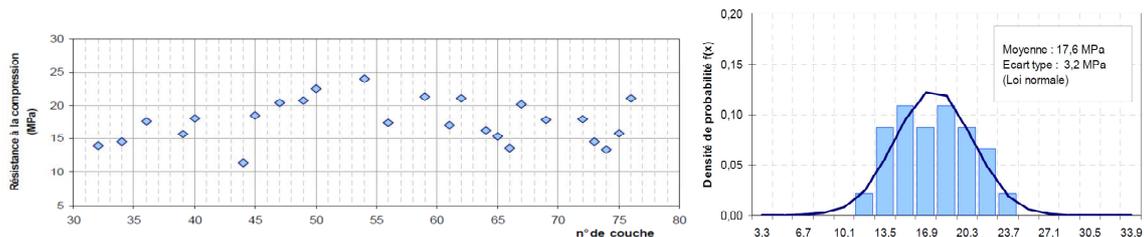


Figure 8-1 : Données de résistance à la compression disponibles et ajustement d'une loi normale pour ce paramètre à l'échelle du barrage (Carvajal, 2009)

8.1.3 Une méthode de propagation des incertitudes : les simulations de Monte Carlo

Les *simulations de Monte Carlo* sont une technique de propagation de l'incertitude fréquemment appliquées pour simuler le fonctionnement d'un système. Elles permettent d'en modéliser le comportement à partir des variations de plusieurs de ses composants.

Soit X_1 , X_2 et X_3 les variables d'entrée du modèle définie chacune par une loi de probabilité et Y le résultat du modèle. Le modèle permet de calculer Y à partir de X_1 , X_2 et X_3 selon une fonction bien définie (Figure 8-2). Si l'on connaît les variables X_1 , X_2 et X_3 , on peut déterminer Y , calculé selon la fonction d'assemblage $f(X_1, X_2$ et $X_3)$, mais dans la plupart des cas on ne peut pas déterminer de manière analytique la loi de Y à partir des lois de X_1 , X_2 et X_3 .

Si l'on dispose d'une loi de probabilité de X_1 , X_2 et X_3 , les techniques de simulations de Monte-Carlo procèdent par tirages aléatoires de X_1 , X_2 et X_3 afin de d'analyser les variations de Y et, éventuellement, d'ajuster une loi de probabilité pour Y .

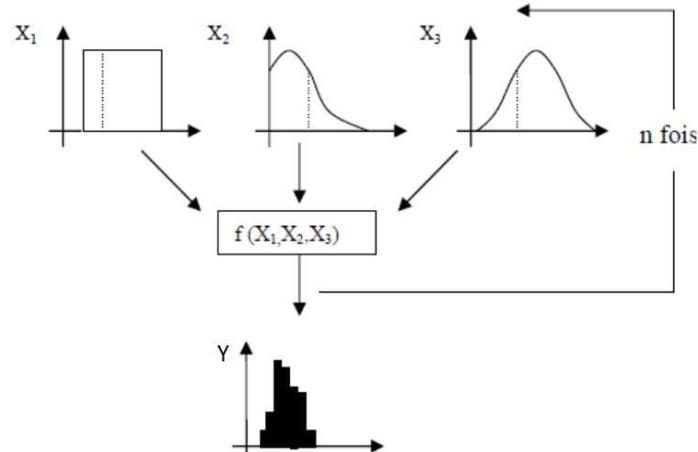


Figure 8-2 : Représentation graphique du principe des simulations de Monte-Carlo (Lair, 2000)

Deux conditions sont nécessaires :

- un modèle de comportement du système étudié capable de reproduire de manière correcte son fonctionnement et son évolution au cours du temps lorsqu'il est soumis à différents aléas (défaillance, réparation, événements extérieurs...);
- un logiciel de simulation de Monte Carlo pour effectuer des tirages aléatoires des variables d'entrée (états du système), pour réaliser des histoires du système à partir de son modèle de comportement et pour analyser statistiquement les variables de sortie.

8.1.4 Exemple de mise en œuvre des simulations de Monte Carlo pour l'évaluation probabiliste de la sécurité des barrages poids

(Carvajal, 2009) utilise des variables aléatoires pour la modélisation des paramètres variables ou incertains nécessaires à l'évaluation de la sécurité des barrages-poids. Les simulations de Monte-carlo sont mises en œuvre pour permettre l'agrégation des différentes distributions selon les fonctions mathématiques modélisant le comportement du barrage. Le facteur de sécurité est représenté sous la forme d'un histogramme et rend compte de l'incertitude des variables à partir desquelles il est calculé (Figure 8-3).

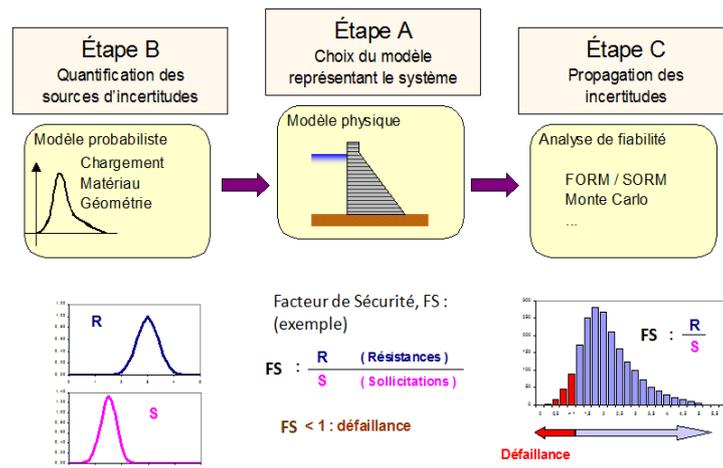


Figure 8-3 : Mise en œuvre de simulations de Monte-Carlo pour l'évaluation probabiliste des barrages-poids

8.1.5 Synthèse : intérêts et limites pour les digues

La théorie des probabilités fournit un formalisme puissant et rigoureux. L'évaluation d'une loi de probabilité à partir d'une analyse statistique est particulièrement recommandée et adaptée aux cas de traitement des incertitudes où l'on possède des séries de données conséquentes.

Les techniques de simulation de Monte-Carlo permettent d'agréger ensemble des fonctions de densité de probabilité selon des fonctions mathématiques.

8.2 Les probabilités subjectives

Nous introduisons dans cette section des concepts et démarches liés aux probabilités subjectives. Cette section est basée principalement sur les ouvrages de Cooke (1991) et O'Hagan *et al.*, (2006). Nous y présentons l'interprétation des probabilités subjectives, leurs contextes et démarches d'utilisation. Les probabilités subjectives sont présentées séparément car elles permettent de travailler avec peu de données tout en gardant le formalisme des probabilités.

8.2.1 Présentation des probabilités subjectives

L'approche subjectiviste considère la probabilité comme la force d'une opinion qui peut être appliquée à l'objet étudié. Tous les types d'informations, incluant les statistiques historiques nécessaires aux évaluations fréquentielles, sont admissibles pour la formulation de probabilités subjectives (Smith, 2005). Celles-ci ne représentent pas une propriété intrinsèque du système étudié qui peut être validée scientifiquement mais une quantité qui varie en fonction du temps, de l'information disponible, de l'état des connaissances et du jugement des évaluateurs (Spetzler, 1975; Von Thun, 1998).

L'interprétation subjectiviste envisage la probabilité comme la mesure d'un état de connaissance, d'un degré de croyance ou d'un état de confiance (De Finetti, 1937). Savage

(1954) indique que la probabilité mesure la confiance qu'un individu particulier a dans la vérité d'une proposition particulière.

Les probabilités subjectives sont utilisées pour estimer l'occurrence d'événements rares, pour lesquels on ne dispose pas de données expérimentales. Un ou des experts sont consultés et formalisent leurs avis sous format probabiliste. Nécessitant certaines précautions, les estimations expertes peuvent ensuite être exploitées dans un outil d'aide à la décision de la même manière que des probabilités basées sur les statistiques. Elles ont fait l'objet de nombreuses applications dans des domaines variés tels que le nucléaire, l'industrie, les risques naturels, etc. (O'Hagan *et al.*, 2006; Goossens, 2008).

Dans le cadre des probabilités subjectives, il existe plusieurs méthodes permettant d'éliciter des lois de probabilités à dire d'expert, chacune basée sur l'élicitation de paramètres permettant *in fine* de construire des fonctions de densité de probabilités (cf. §9.1.2).

8.2.2 Démarche méthodologique d'élicitation de l'opinion experte sous format probabiliste

8.2.2.1 Processus d'élicitation

Eliciter, c'est aider un expert à formaliser ses connaissances pour permettre de les sauvegarder et/ ou de les partager (Cooke, 1991).

Le **jugement expert** est l'expression de l'opinion, basée sur la connaissance et l'expérience, que l'expert fait en réponse à un questionnement. Plus spécifiquement, le jugement représente l'état de la connaissance de l'expert au moment de sa réponse à la question (Ortiz *et al.*, 1991).

Les probabilités subjectives utilisent l'élicitation comme le procédé permettant à l'expert de formaliser son jugement par des distributions de probabilités.

Selon (Garthwaite *et al.*, 2004), le **processus d'élicitation** se compose de quatre étapes :

1. l'étape de préparation de l'élicitation, comprenant l'identification des variables à éliciter, le choix et l'entraînement des experts ;
2. l'étape d'élicitation des éléments spécifiques des variables. Chaque expert élicite les paramètres nécessaires pour formaliser son opinion sous la forme d'une fonction de densité de probabilité. Il s'agit du cœur du processus ;
3. la construction d'une distribution de probabilité à partir des éléments fournis par l'expert. En pratique cette étape est souvent mêlée à la précédente, en ce sens que le choix des éléments à éliciter est souvent influencé par la forme de la distribution que l'on souhaite construire ;
4. l'élicitation est invariablement un processus itératif. La quatrième étape implique de vérifier que la distribution correspond bien à l'opinion de l'expert. On peut prendre l'option de revenir à l'étape 2 et de demander plus d'éléments à l'expert.

8.2.2.2 Biais et calibration des experts

La littérature psychométrique identifie certains **biais** heuristiques pouvant altérer la vraisemblance des probabilités subjectives (Kahneman *et al.*, 1982).

Chacun de ces biais pouvant altérer le raisonnement ou la formalisation de l'estimation experte, O'Hagan (2006) distingue les biais selon qu'ils sont considérés :

- en psychologie, tout processus ou influence qui produit une forme de réponse ou un comportement présentant l'occurrence d'un input ou d'un stimulus comme plus ou moins vraisemblable que ce qu'il n'est vraiment ;
- dans les statistiques fréquentistes, la différence entre l'espérance d'un estimateur et la valeur réelle du paramètre estimé.

La littérature cognitive considère les heuristiques comme générateurs de biais susceptibles d'altérer les aptitudes d'un expert à éliciter sa réelle opinion (Kahneman *et al.*, 1982). Elle considère quatre biais principaux : la *disponibilité*, la *représentation*, la *sur-confiance* et l'*ancrage* (Morgan et Henrion, 1990).

Le biais de **disponibilité** est un raccourci mental tenant compte seulement des faits les plus récents ou surestimant leur importance en raison de leur « disponibilité » en mémoire (O'Hagan *et al.*, 2006).

Exemple : les médias peuvent rapporter des faits concernant une maladie de façon fréquente et répétitive qui donnent l'impression que la probabilité de contracter la maladie est plus élevée qu'en réalité.

Le biais de **représentation** est une erreur d'estimation du degré de correspondance entre un échantillon et une population (Kahneman *et al.*, 1982). Cela se traduit par une diminution de la prise en compte de l'aspect conditionnel d'une probabilité.

Exemple (Tversky et Kahneman, 1982) : on présente à des sujets X descriptions de Bill et on leur demande d'ordonner les probabilités de plusieurs événements basés sur X.

X : Bill a 34 ans, il est intelligent mais pas imaginatif, compulsif et généralement peu actif. A l'école, il était fort en mathématiques mais faible pour les matières socio-humaines. « Ranger les éléments suivant selon leur degré de probabilité de 1 à 6 » : A-Bill est un physicien aimant jouer au poker ; B-Bill est comptable ; C-Bill joue du jazz en hobby ; D-Bill pratique le surf ; E-Bill est reporter ; F-Bill est un comptable qui joue du jazz comme hobby.

L'élément F est la représentation de B et C, avec B très représentatif et C très peu représentatif. L'élément F est d'une représentativité intermédiaire. Les sujets sans l'heuristique de représentativité vont ranger F entre B et C. N'importe comment, $p(C/X) > p(F/X)$. Dans le présent exemple, 87% des personnes ont répondu $p(F/X) > p(C/X)$, l'expérience a été répétée avec des élèves de la Stanford business school et 80% des sujets ont rangés F devant C...

Le biais d'**ancrage** se manifeste lorsque l'expert se laisse trop influencer par une première évaluation spontanée, avec ensuite un ajustement difficile de son jugement.

Exemple (Tversky et Kahneman, 1982) : on demande à des personnes d'ajuster une roue indiquant par un score de 1 à 100 le pourcentage des pays Africains parmi les membres de l'ONU. Si au démarrage de l'expérience, on met la roue sur 10, la moyenne des ajustements est 25, c'est-à-dire que les personnes interrogées estiment que 25% des pays membres de

l'ONU sont Africains. Si au démarrage de l'expérience on met la roue sur 65, la moyenne des ajustements est alors 45.

Le biais de **sur confiance** conduit l'expert à minimiser l'incertitude de ses évaluations. A contrario, le biais de *pessimisme* conduit l'expert à éliciter des distributions insuffisamment informatives.

Il existe des démarches (Morgan et Henrion, 1990; Cooke et Goossens, 2000) permettant de réduire les biais expert (cf. §9.2).

La **calibration** évalue la cohérence entre l'information produite et des valeurs expérimentales observées. (Cooke, 1991). Un expert élicitant des probabilités subjectives est dit bien calibré si, pour toutes les valeurs de probabilités r dans la classe de tous les événements pour lesquels l'expert assigne des probabilités r , la fréquence d'occurrence relative est égale à r . La calibration représente une forme de contrôle empirique sur les probabilités subjectives produites.

Les variables sur lesquelles est calculée la calibration sont appelées variables de calibration (Cooke, 1991; Pigeon, 2008). Il s'agit de variables très proches du domaine d'intérêt, pour lesquelles il existe des résultats empiriques. Plus haute est la cohérence entre les valeurs élicitées par l'expert et les valeurs observées, plus haut est le score de calibration.

Exemple (Pigeon, 2008): une compagnie d'assurance interroge des experts pour estimer les montant des indemnités liées à un éventuel accident d'avion. Trois experts interviennent et deux variables de calibration (dont on connaît les résultats) sont sélectionnées afin de construire un score de calibration pour chaque expert : le taux d'accident pour 100 000 heures de vol et le coût moyen d'un bâtiment au Québec. On compare les estimations de chaque expert relativement aux résultats de ces variables pour déterminer leurs calibrations.

Un sujet est dit bien calibré si pour toutes les valeurs des classes de probabilités r , les fréquences relatives d'occurrences réelles sont égales à r . La calibration représente une forme de contrôle empirique sur les estimations de probabilité subjectives.

Pour plus de détails sur l'exploitation de l'avis probabiliste d'un groupe d'expert basé sur la calibration et la pondération des estimations expertes, nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Cooke, 1991).

La littérature psychométrique a établi que des biais pouvaient se manifester lors de l'élicitation de distributions. Il existe des démarches permettant d'évaluer la calibration d'un expert relative des distributions de probabilités données « à dire d'expert ».

8.2.3 Exemple de mise en œuvre de probabilités subjectives

Dans le rapport des recommandations du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat en matière de bonne pratique et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux de gaz à effets de serre (GIEC., 2000), une partie des données utilisées proviennent d'exploitation d'opinions expertes fournies sous forme de distributions de probabilités. Les méthodes d'élicitation utilisées dépendent du degré de familiarité de l'expert en ce qui concerne les distributions de probabilités. C'est à l'expert de sélectionner le format avec lequel il est le plus à l'aise parmi :

- des représentations graphiques : l'expert trace une représentation graphique de ses propres distributions. Cette méthode doit être utilisée avec prudence, certains experts

étant trop sûrs d'eux pour ce qui est de la compréhension des distributions de probabilités ;

- des méthodes d'intervalles type bissectrices (cf. §9.1.2.3) ;
- parfois une plage de valeurs constitue la seule opinion d'experts disponible, avec une indication de la valeur la plus probable. Dans ce cas, les règles suivantes s'appliquent :
 - o si les experts fournissent uniquement une valeur limite supérieure et inférieure, on suppose alors que la fonction de densité de probabilité est uniforme et que la plage correspond à l'intervalle de confiance de 95 % ;
 - o si les experts fournissent également la valeur la plus probable, on adopte alors une fonction de densité de probabilité triangulaire utilisant la valeur la plus probable comme mode, et on suppose que les valeurs limites supérieures et inférieures excluent chacune 2,5% de la population.

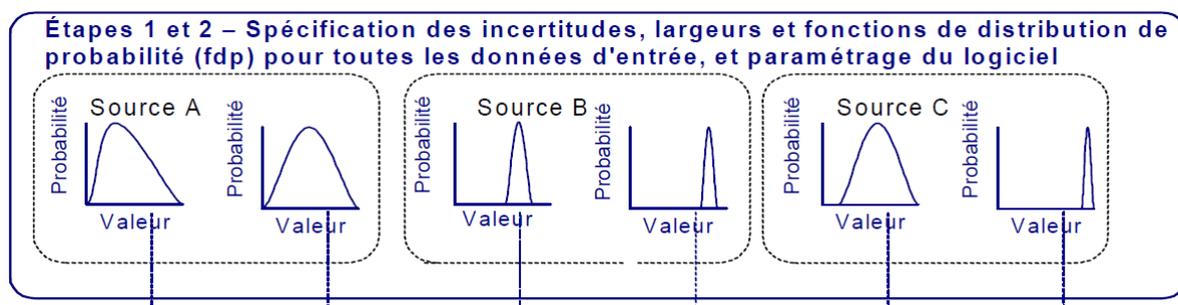


Figure 8-4 : Modélisation de l'opinion experte sous format probabiliste (GIEC., 2000)

8.2.4 Actualisation des avis experts par valeurs mesurées : les réseaux bayésiens

L'approche bayésienne mêle statistique et dire expert. Elle intègre l'opinion experte comme connaissance *a priori*, que l'on peut préciser à partir de données collectées sur le terrain.

Dans un **modèle bayésien**, on fait intervenir l'opinion experte pour bâtir des distributions de probabilités subjectives *a priori*. Les résultats empiriques disponibles sont modélisés à l'aide d'une fonction de vraisemblance, c'est-à-dire d'une fonction de probabilité conditionnelle qui décrit les valeurs d'une loi statistique en fonction de paramètres supposés connus.

On peut, ensuite, agréger la distribution *a priori* avec la fonction de vraisemblance des résultats empiriques pour obtenir une distribution *a posteriori*. La distribution *a posteriori* est assimilable à l'opinion experte renforcée de résultats empiriques. La construction d'un réseau bayésien implique :

- la réalisation d'un graphe orienté modélisant la connaissance experte des scénarios possibles;
- la définition des tables de probabilités pour chaque variable, conditionnellement à ses causes.

De manière générale, les graphes sont probabilisés par les experts eux-mêmes (probabilités subjectives), tandis que les tables de probabilités sont construites à partir de données expérimentales (Figure 8-5).

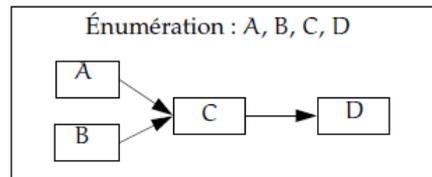


Figure 8-5 : Exemple de réseau bayésien simple (Torti et Wullemmin, 2009)

Dans la Figure 8-5, au nœud C est associée la probabilité conditionnelle $P(C \mid A, B)$. On calcule la probabilité jointe $P(A, B, C, D)$ par $P(A).P(B).P(C \mid A, B).P(D \mid C)$.

Plus généralement, si V est l'ensemble des nœuds du graphe, la probabilité de réalisation de V est donnée par :

$$P(V) = \prod_{N \in V} P(N \mid \pi_N)$$

Où π_N est l'ensemble des parents du nœud N dans le graphe.

Ce formalisme permet une représentation intuitive de la connaissance sur un domaine d'application donné et facilite la mise en place de modèles performants et clairs (Bellot, 2002). (Guyonnet *et al.*, 2005) précisent que face à une information incomplète ou imprécise, les méthodes bayésiennes font appel à des distributions de probabilité « subjectives ». Ainsi elles aboutissent toujours à des réponses précises, mais le problème réside dans le fait que cette précision peut être jugée comme étant artificielle car résultant de choix arbitraires.

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

Les modèles bayésiens présentent l'avantage de modéliser une connaissance à dire d'expert de la perfectionner au fur et à mesure de la collecte de nouvelles données. La limite de la démarche est qu'elle nécessite la construction de fonctions de vraisemblance, ce dont nous ne disposons pas actuellement pour les critères d'évaluation des digues.

8.2.5 Synthèse : intérêts et limites pour les digues

En fiabilité, le besoin de prendre en compte des événements catastrophiques rares, parfois jamais observés, a rendu nécessaire l'utilisation de probabilités dites subjectives, c'est-à-dire données « à dire d'expert ». Les méthodes développées pour l'emploi des probabilités subjectives proposent :

- des procédures d'élicitation de l'opinion experte en sous la forme de fonction densité de probabilités ;
- des méthodes d'identification et de réduction des biais pouvant affecter le jugement expert ;
- des modèles pour l'évaluation et la combinaison des avis experts.

L'estimation experte peut ainsi devenir une source de données à part entière. Cependant ce type d'information ne constitue pas une loi physique ni une donnée réellement observée et doit donc faire l'objet de traitements particuliers, notamment pour limiter les biais.

8.3 La théorie des sous-ensembles flous

8.3.1 Présentation

La *théorie des sous-ensembles flous* a été introduite par (Zadeh, 1965). L'idée de base est que, lorsqu'une classe est définie par une notion vague, on ne peut pas utiliser le concept classique d'appartenance. Il faut alors introduire une échelle –*la fonction d'appartenance*– qui permet de hiérarchiser les éléments d'un univers donné par rapport à cette propriété vague (Bouchon-Meunier, 1995). La théorie des sous-ensembles flous permet d'éviter le passage brusque d'une classe d'affectation à une autre, au moyen d'une fonction d'appartenance permettant de caractériser une appartenance graduelle à un sous-ensemble flou, c'est à dire dont les contours sont mal délimités.

8.3.2 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou

Soit X un ensemble de références. Selon (Bouchon-Meunier, 2003) et 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 $\mu_A(x)$ tel que x appartient à A et $\mu_A(x)$ est compris entre 0 et 1.

Dans un sous-ensemble flou (Figure 8-6), les valeurs jugées les plus vraisemblables constituent le noyau du sous-ensemble flou, tandis que les valeurs jugées possibles, en couronne, constituent le support.

- *le noyau* d'un sous-ensemble flou A de X, noté $\text{noy}(A)$, est l'ensemble de tous les éléments qui lui appartiennent totalement. Pour ces éléments la fonction d'appartenance est égale à 1 :

$$\text{Noy}(A) = \{x \in X | \mu_A(x) = 1\}$$

- *le support* d'un sous-ensemble flou A de X, noté $\text{supp}(A)$, est l'ensemble de tous les éléments qui lui appartiennent au moins « un petit peu » ($\mu_A(x) > 0$). Pour ces éléments la fonction d'appartenance au sous-ensemble A n'est pas nulle :

$$\text{Supp}(A) = \{x \in X | \mu_A(x) > 0\}$$

- *la hauteur* d'un sous-ensemble flou A de X, notée $h(A)$, est la valeur maximale atteinte par le support de A. Formellement :

$$h(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x)$$

$$\mu_A: \begin{matrix} R \rightarrow [0,1] \\ x \rightarrow \mu_A(x) \end{matrix}$$

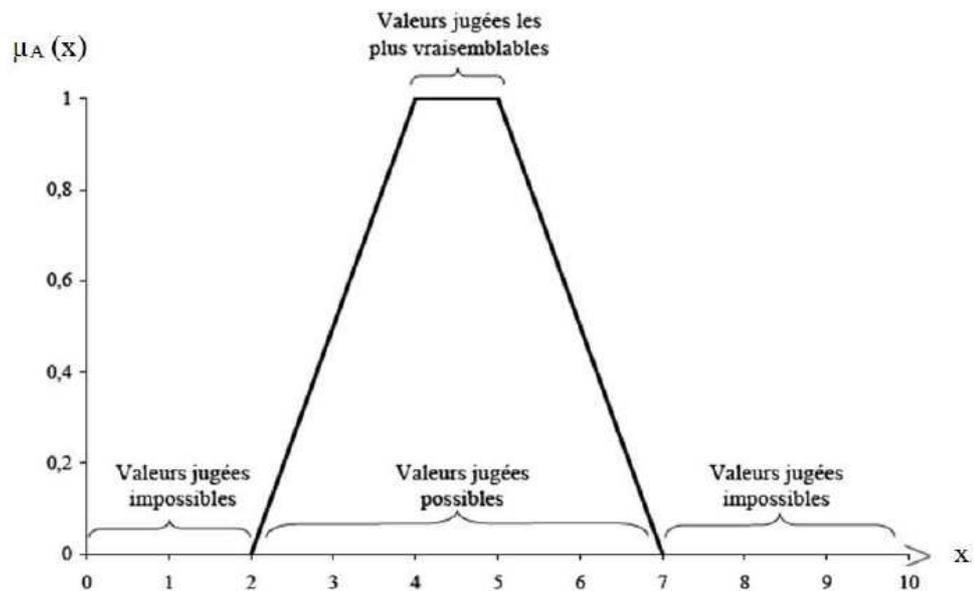


Figure 8-6 : Exemple d'un sous-ensemble flou

La figure ci-dessus (Figure 8-2) donne un exemple de sous-ensemble flou 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.

On note que le noyau comprend les éléments de l'intervalle {4-5}, alors que le support comprend les éléments {2-7}, et la hauteur est normalisée à 1.

Les α -coupes permettent de décrire un sous-ensemble flou en se référant à des sous-ensembles ordinaires. On peut réaliser une approximation d'un sous-ensemble flou en fixant un seuil inférieur sur les degrés d'appartenance. Le sous-ensemble « ordinaire » A_α de X associé à A pour le seuil α est l'ensemble des éléments qui appartiennent à A avec un degré d'appartenance au moins égal à α . On dit que A_α est l' α -coupe de A. Formellement :

$$A_\alpha = \{x \in X | \mu_A(x) \geq \alpha\}$$

et A_α est un sous-ensemble ordinaire de fonction caractéristique :

$$X_{A_\alpha}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } \mu_A(x) \geq \alpha \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On note que le noyau et le support sont deux α -coupes particulières.

La théorie des sous-ensembles flous permet de déterminer l'appartenance d'un élément parmi des classes non clairement délimitées. Dans le cas de variables linguistiques, cela évite le calage de seuils arbitraires trop rigides. La fonction d'appartenance permet de graduer l'appartenance d'un élément donné à telle ou telle classe, celui-ci pouvant ainsi appartenir simultanément à deux classes.

8.3.3 Opération sur les sous-ensembles flous

Une grande variété d'opérateurs permet d'agrèger des paramètres exprimés sous forme floue et, ainsi, de propager les imperfections dans un calcul. Parmi ces opérateurs, on trouve en particulier les moyennes, les sommes, et d'autres, plus complexes (t-normes, t-conormes, opérateurs prenant en compte les conflits ou encore les fiabilités des sources), pour lesquels nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Bloch, 2005).

8.3.4 Exemple d'application des sous ensembles flous aux réseaux d'assainissement

Cet exemple extrait de (Ibrahim, 2008) présente une proposition d'application de la théorie des sous-ensembles flous relativement aux classes d'affectation des tronçons d'un réseau d'assainissement en fonction de leurs états estimés, des dysfonctionnements constatés et des impacts des dysfonctionnements pour le gestionnaires du réseau. Lors du développement du projet (INDIGAU), l'application de la logique floue a permis de nuancer l'affectation d'une canalisation à une classe, évitant ainsi une perte d'information. Le modèle peut ainsi traiter l'imprécision des évaluations de type : « l'expert propose de classer un tronçon entre G2 et G3, peut-être plus G3 ».

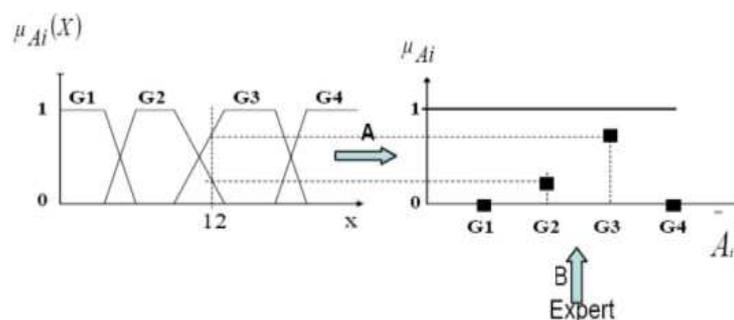


Figure 8-7 : Réponse floue sur quatre modalités d'évaluation d'un tronçon selon un indicateur flou (Le Gauffre et al., 2008)

Dans cet exemple, l'indicateur est situé entre G2 et G3. Sa fonction d'appartenance à G2 est proche de 0,33 et sa fonction d'appartenance à G3 proche de 0,66. Une évaluation « précise » l'aurait classée en G3, perdant ainsi une partie de son signal d'information. Il est volontaire de ne prendre en compte que les imprécisions relatives aux scores d'évaluation et de fusion des indicateurs de performances. Le choix de ne pas prendre en compte les incertitudes liées aux données d'entrée et aux connaissances de l'outil RERAU est justifiée par les difficultés à définir les sources d'incertitudes des données des réseaux d'assainissement (état, dysfonctionnement, impact) (Ibrahim, 2008).

8.3.5 Synthèse : intérêts et limites pour les digues

La théorie des sous-ensembles flous fournit l'outil adapté pour représenter explicitement les informations imprécises, sous la forme de fonctions d'appartenance (Zadeh, 1965).

La théorie des sous-ensembles flous présente deux intérêts principaux (Bouchon-Meunier, 1993) pour notre application :

- elle permet de modéliser des connaissances imprécises ou vagues ;

- elle est un moyen de traiter dans un même cadre des connaissances fournies numériquement, par des instruments de mesure, et des connaissances exprimées symboliquement, par un observateur humain par exemple.

Nous remarquons cependant que la théorie des sous-ensembles flous ne propose pas de modélisation des incertitudes.

8.4 La théorie des possibilités

8.4.1 Présentation

La théorie des possibilités a été introduite en 1978 par Zadeh, en liaison avec la théorie des sous-ensembles flous, dans le cadre de la logique floue. Elle permet de raisonner sur des connaissances imprécises ou vagues, en introduisant un moyen de prendre en compte des incertitudes sur ces connaissances (Bouchon-Meunier, 1993).

La théorie des possibilités utilise aussi la notion de fonction d'appartenance, mais pour modéliser cette fois non plus l'aspect graduel d'une classe, mais des états d'incertitude attachés à de l'imprécision (Berrah, 2002).

Dans cette théorie, chaque variable a une distribution de possibilités associée qui prend la forme d'un sous-ensemble flou normalisé, c'est-à-dire que la fonction d'appartenance vaut 1 ($\mu(x) = 1$) pour au moins une valeur de x .

On adjoint à cette distribution de possibilité une mesure de nécessité caractérisant le degré de certitude des données.

La construction d'une **distribution de possibilité** s'apparente à un emboîtement d'intervalles, du plus exhaustif (le support), vers celui qui rassemble les valeurs les plus vraisemblables (le noyau). On est sûr que les valeurs se trouvent dans l'intervalle délimité par le support, mais celui-ci est moins précis, tandis que le noyau est l'intervalle le plus précis, mais le moins sûr.

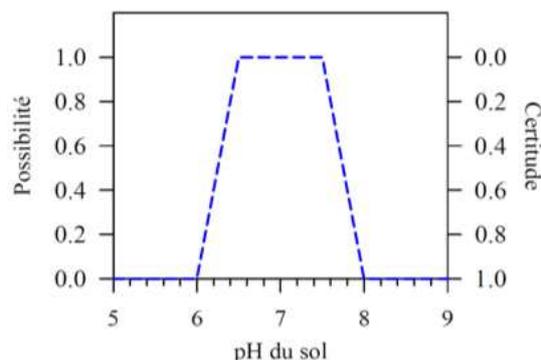


Figure 8-8 : Dualité entre certitude et possibilité (Guyonnet *et al.*, 2005)

La notion de possibilité relative aux valeurs précises appartenant aux intervalles emboîtés est complémentaire de celle de certitude relative aux intervalles eux-mêmes. Ainsi le degré de possibilité d'un intervalle peut être défini comme étant égal à 1 moins le degré de certitude que l'intervalle contient bien les valeurs (Guyonnet *et al.*, 2005).

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. Nécessité et possibilité sont liées par la relation suivante :

$$N(A) = 1 - \Pi(A^c)$$

Où A^c est le complément de A (Bouchon-Meunier, 1995) :

- le degré de possibilité d'un événement A est noté $\Pi(A)$. Il mesure le degré avec lequel l'événement est susceptible de se réaliser ;
- la nécessité d'un événement A est notée $N(A)$. Elle indique le degré avec lequel la réalisation de cet événement est certaine ($N(A) = 1$), si et seulement si celle de son complémentaire A^c est impossible $\Pi(A^c) = 0$ donc $\Pi(A) = 1$.

8.4.2 Exemple de traitement possibiliste et de fusion de données imparfaites pour l'évaluation multiparamétrique des risques de dégradation d'une installation de distribution d'eau

Cet exemple est issu des travaux de recherche de (Correc, 2005), qui ont pour objectif de construire un modèle d'évaluation flou des risques de dégradation d'une installation de distribution d'eau. L'évaluation multiparamétrique permet de traduire le futur état de dégradation sur une échelle à trois jalons (faible, moyen, fort). Il présente une démarche mettant en œuvre la théorie des possibilités pour la représentation et la propagation de l'information imparfaite. L'utilisation des α -coupes : base, noyau et intervalle médian ($\pi = 0,5$) permet d'agréger les distributions de possibilité selon des opérateurs tels que moyenne, intégrale de Choquet, ainsi appliqués à un contexte flou. En sortie de cette démarche nous obtenons pour chaque agrégation une distribution fusionnée caractérisée par une base, un noyau et l' α -coupes d'appartenance 0,5.

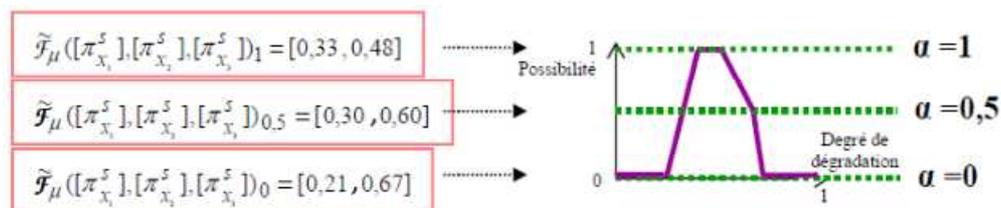


Figure 8-9 : Distribution fusionnée définie par les α -coupes base, médiane et noyau (Correc, 2005)

8.4.3 Synthèse : intérêts et limites pour notre application

La théorie des possibilités est une démarche complémentaire de la théorie des sous-ensembles flous, alternative à la théorie des probabilités pour prendre en charge la connaissance incertaine.

Nous remarquons que le formalisme de la théorie des possibilités n'est pas aisément intelligible pour les non initiés. Les opérations mathématiques de la théorie des possibilités sont similaires à ceux des sous-ensembles flous, d'où parfois une certaine confusion entre les deux théories.

8.5 La théorie des masses de croyances

Aussi appelée *théorie de Dempster-Shafer* ou théorie de l'évidence, elle est introduite et développée par (Dempster, 1967), avant d'être reprise sous un formalisme mathématique plus abouti par (Shafer, 1976).

Elle permet de manipuler l'ensemble des informations entachées d'imperfection sous un format commun. Des règles de fusion unifient des informations disponibles sous différents formats (une valeur ponctuelle par un singleton ou une valeur données sous la forme d'intervalle) et provenant de différentes sources. La fusion d'informations consiste à combiner des informations issues de plusieurs sources afin d'améliorer la prise de décision (Bloch, 2003).

8.5.1 Expression des imperfections des données d'entrée

Il faut tout d'abord définir un cadre de discernement Ω représentant l'exhaustivité et l'exclusivité des états possibles de notre système. Selon (Masson, 2005), une connaissance imparfaite est représentée par une masse de croyance définie comme une fonction de 2^Ω dans $[0,1]$ vérifiant :

$$\sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1$$

Les éléments A de Ω tels que $m(A) > 0$ sont appelés des éléments focaux de m . Le nombre $m(A)$ peut être interprété comme une fraction de la masse unité allouée à A sur la base de notre état de connaissance.

Les éléments de mesure couramment employés sont la crédibilité ou croyance (belief) $Bel(A)$ et la plausibilité $Pl(A)$, selon les expressions suivantes :

- $Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B)$
- $Pl(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B) = 1 - Bel(A^c)$

La crédibilité d'une conclusion A est la somme des masses de croyance des éléments B inclus dans A , tandis que la plausibilité de A est la somme des masses de tous les éléments qui ne sont pas en contradiction avec A .

Les indicateurs de crédibilité et de plausibilité sont fidèles à l'information disponible et ils permettent d'éviter l'hypothèse *a priori* de la répartition des probabilités. L'écart entre les deux est une mesure de notre ignorance (Guyonnet *et al.*, 2005).

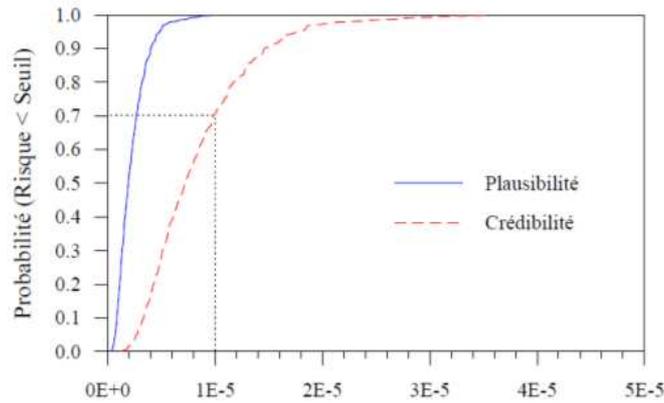


Figure 8-10 : Plausibilité et crédibilité associées au calcul d'un risque à partir d'informations imparfaites, et comparaison au seuil 10^{-5} (Guyonnet et al., 2005).

Dans la figure ci-dessus (Figure 8-10), la probabilité que le risque soit inférieur à 10^{-5} correspond à un intervalle compris entre 0.7 et 1. La différence avec les probabilités est qu'il est possible d'associer une masse de croyance aux sous-ensembles de Ω . Par rapport aux possibilités, la théorie de Dempster-Shafer permet de fusionner des intervalles non emboîtés, c'est-à-dire disjoints.

8.5.2 Exemple d'application pour l'évaluation possibiliste de la performance d'ouvrage de génie civil

(Talon et al., 2008) propose une démarche d'évaluation possibiliste de la performance des ouvrages de génie civil constituée de quatre phases : (1) l'analyse de la qualité des données disponibles, (2) la fuzzification ou transformation des données sous un format flou, (3) l'unification par fusion et/ou agrégation des données permettant d'exploiter la complémentarité des données disponibles et (4) la défuzzification ou extraction de l'information juste nécessaire pour la prise de décision. Les masses de croyances sont utilisées pour l'unification et l'agrégation des données.

Le principe de fusion de n données, définies par un intervalle de valeurs et une masse de croyance, consiste : (1) à prendre deux données et à calculer, selon une méthode de fusion, la masse affectée à l'intersection de leurs intervalles, à leur union, au cadre de discernement, (2) à réitérer ce calcul en combinant la donnée résultante et l'une des $n-2$ données restantes jusqu'à ce que les n données aient été combinées (Figure 8-11).

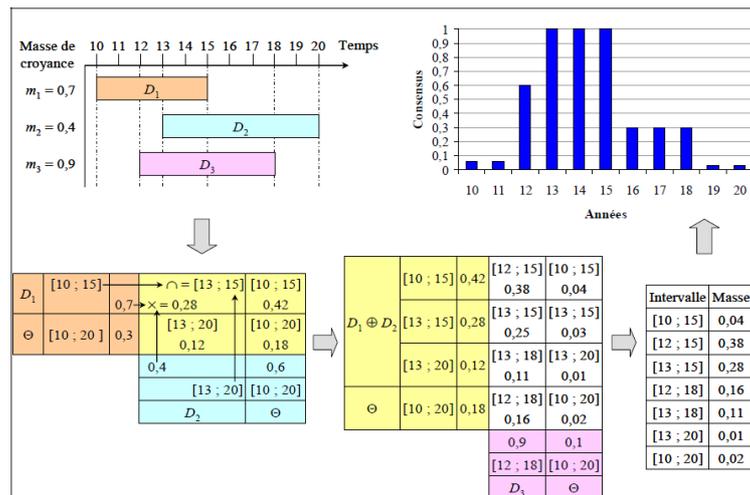


Figure 8-11 : Exemple de fusion de trois données de durées de vie d'un ouvrage génie civil (Talon et al., 2008)

8.5.3 Synthèse : intérêts et limites pour les digues

La théorie de Dempster-Shafer permet de fusionner des informations issues de plusieurs sources auxquelles on a attribué des masses de croyances. En outre elle permet de traiter dans un même formalisme les données issues de formats probabilistes et possibilistes.

8.6 Proposition de démarche pour le traitement des imperfections des données des digues fluviales

8.6.1 Contexte

Nous devons proposer une méthodologie d'application d'une ou plusieurs théories proposées dans ce chapitre pour le traitement de l'imperfection des données des digues (cf. Chapitre 7).

Notre contexte se démarque des études fiabilistes basées sur des modélisations statistiques, comme cela est réalisé sur les barrages (Carvajal, 2009) pour lesquels la demande d'un haut niveau de sécurité et le caractère ponctuel des ouvrages justifie la disponibilité de nombreuses données sur les résistances et les sollicitations. Dans le domaine des digues, les données disponibles sont le plus souvent incomplètes et disséminées tout le long des linéaires, ne permettant que très exceptionnellement de réaliser des analyses statistiques pertinentes. De fait, il est nécessaire le plus souvent de faire établir les estimations des incertitudes des données d'entrée par l'ingénieur, au moyen des éléments de contexte, de la complétude et de la qualité des données disponibles.

Nous avons vu que les imperfections relatives aux données des digues découlent principalement d'une incomplétude et des incertitudes liées à la représentativité des données disponibles sur les linéaires, tels les sondages ou les tests de perméabilité. Nous avons aussi relevé des incertitudes liées au caractère aléatoire des sollicitations lors de crue ou de l'amorce des phénomènes de défaillance. Enfin, certaines données mêlent incertitude et imprécision, comme les observations de l'inspection visuelle des ouvrages.

8.6.2 *Les méthodes permettant la modalisation de données imparfaites*

Nous avons comparé les différentes méthodes de représentation de l'information imparfaite. Nous en retenons les constats suivants :

- la théorie des probabilités offre un cadre mathématique rigoureux. Il est admis que l'incertitude est son domaine privilégié et qu'elle nécessite des séries de données empiriques conséquentes. Néanmoins la théorie des probabilités propose un cadre de traitement pour l'opinion experte selon l'approche des probabilités subjectives ;
- la théorie des sous-ensembles flous est particulièrement bien adaptée pour le traitement des cas d'imprécision/ ambiguïté ;
- la théorie des possibilités est une extension de la théorie des sous-ensembles flous qui permet de traiter l'imprécision et l'incertitude dans un format commun ;
- les masses de croyances permettent de traiter l'ensemble des cas d'imperfections, en particulier les cas d'inconsistance ;
- les théories des possibilités et des masses de croyance sont difficiles d'interprétation pour les non-initiés.

8.6.3 *Choix de la représentation des données imparfaites*

Une démarche possibiliste, telle que mise en œuvre par (Correc, 2005) conviendrait certainement à notre étude. La théorie des possibilités présente néanmoins quelques inconvénients :

- elle utilise un formalisme d'interprétation complexe pour les non initiés ;
- les critères d'évaluation des digues modélisent des phénomènes aléatoires pouvant être rares/exceptionnels : il est donc important de pouvoir représenter les extrémités des distributions, ce que ne permettent pas aisément les distributions de possibilités.

Nous proposons une démarche basée sur les probabilités subjectives pour plusieurs raisons :

- l'analyse des formes des imperfections relatives aux critères d'évaluation des digues indique que l'incertitude est la forme prépondérante. La théorie des probabilités s'avère être un cadre bien adapté à la prise en charge des données incertaines ;
- le rapprochement et la standardisation des différentes méthodologies pour le diagnostic des digues (procédure d'inspection visuelle normalisée par IRSTEA, rédaction en cours de l'International Levee Handbook etc.) augurent d'une diminution sensible des cas d'ambiguïté dans l'énoncé des données ;
- les données sur les digues sont peu abondantes et il est nécessaire de recourir au jugement expert pour l'estimation de leurs imperfections. Les probabilités subjectives proposent des outils pour le traitement de l'opinion experte, en particulier le traitement des biais heuristiques.

Compte tenu de la quantité de sources d'imperfection des données relatives aux digues, nous proposons la construction d'une démarche méthodologique basée sur les probabilités subjectives. Elles devront permettre la représentation de l'incertitude et de l'imprécision dans un format commun, au moyen de variables aléatoires élicitées par l'ingénieur spécialisé en ouvrages hydrauliques. Par ailleurs, l'utilisation des probabilités subjectives présente des avantages importants compte tenu du contexte des digues :

- la récente réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques augure d'une amélioration de la quantité et de la qualité des données disponibles pour l'évaluation des ouvrages. A terme, on disposera de données abondantes sur les digues et il devrait être possible de déterminer des probabilités de rupture à partir de données statistiques. Le choix des probabilités s'inscrit dans la dynamique selon laquelle les probabilités statistiques seront à terme plus abondantes que les probabilités subjectives ;
- la réglementation relative aux études de dangers des digues requiert l'évaluation probabiliste de la sécurité des ouvrages. L'utilisation des probabilités subjectives permet de s'inscrire dans ce format.

Il nous faudra également travailler sur la réduction des biais liés à l'élicitation du jugement expert.

8.6.4 Propagation des imperfections dans le modèle d'évaluation de la performance

Dans l'hypothèse d'une prise en compte probabiliste des imperfections, il faudra proposer une méthode qui permette la propagation des distributions de probabilité renseignant chaque critère d'évaluation selon les mêmes opérateurs d'agrégation que dans le modèle déterministe. Les techniques de simulations de Monte-Carlo (cf. §8.1.3) permettent de réaliser ces tâches de propagation et nous prévoyons donc de les utiliser.

En conclusion, après avoir construit un modèle déterministe d'évaluation de la performance des digues basé sur le critère unique de synthèse, nous proposons de mettre en œuvre une démarche qui utilise les probabilités subjectives afin de modéliser l'incertitude liée à l'évaluation de chaque critère. Le chapitre suivant est consacré à la présentation des probabilités subjectives et à leurs modalités d'application au contexte des digues.

Chapitre 9 Développement d'un modèle d'évaluation de la performance des digues basé sur les probabilités subjectives

Nous proposons dans ce chapitre de construire une démarche d'évaluation de l'imperfection des valeurs des critères, dépendantes du jugement expert et de la qualité des données disponibles, par l'utilisation des probabilités subjectives. Il s'agit de formaliser l'avis de l'ingénieur spécialisé pour chaque critère d'évaluation par une distribution de probabilité et de l'utiliser dans le processus d'aide à la décision.

Le développement d'un modèle probabiliste basé sur les probabilités subjectives pour l'évaluation de la performance présente les étapes suivantes :

- la définition d'une procédure d'élicitation de l'ingénieur ;
- le choix de lois de distribution adaptées à l'évaluation des critères des digues fluviales ;
- le traitement des biais ;
- la propagation des incertitudes dans le modèle.

9.1 Choix d'une démarche pour l'intervention experte et la construction de distributions de probabilité

9.1.1 Contexte d'évaluation des critères

Les évaluations des critères sont faites sur la base de multiples indicateurs d'états plus ou moins redondants, contenant de l'information plus ou moins complète.

Notre *objectif* est de construire une démarche permettant l'évaluation des critères sous la forme de distributions de probabilité. Pour cela, il est nécessaire d'éliciter une *tendance centrale* assortie d'un intervalle modélisant les *marges d'incertitudes* de part et d'autre de l'évaluation de performance.

Si l'intervenant estime que l'incertitude de la valeur d'un critère est plus importante vers les valeurs basses ou hautes, il doit pouvoir l'éliciter selon une loi de probabilité asymétrique.

9.1.2 Les méthodes d'élicitation de l'opinion experte

La construction d'une distribution de probabilité à dire d'expert implique l'élicitation de la forme de la distribution, sa tendance centrale et sa dispersion. Il existe plusieurs méthodes permettant d'éliciter des distributions de probabilités à dire d'expert, chacune basée sur l'élicitation de paramètres permettant *in fine* de construire des fonctions de densité de probabilité.

9.1.2.1 Démarche d'élicitation basée sur une tendance centrale et un paramètre de dispersion

Une méthode simple est l'élicitation par l'ingénieur de la moyenne et de l'écart type de la propriété étudiée (Cooke et Goosens, 2000).

Exemple : procédure développée par l'European Space Agency (Preyssl et Cooke, 1989) pour l'évaluation des fréquences de défaillances.

Elle comprend deux étapes :

- Etape 1 : l'expert indique sa meilleure estimation pour la fréquence de défaillance en question. Il est questionné sur son estimation médiane de la fréquence d'une défaillance (notée M) ;
- Etape 2 : l'expert est questionné sur quelle serait sa surprise si la vraie valeur s'avérait être un facteur 10 ou plus. La réponse est un nombre r ($0 < r < 1$) reflétant la probabilité que la vraie valeur puisse excéder le facteur médian par un facteur de 10 ou plus. Pour les estimations médianes plus grandes que 0,1, on demande à l'expert d'établir sa borne de confiance supérieure à 95 % directement.

Les nombres M et r déterminent une distribution log-normale unique. Un calcul permet ensuite de trouver la confiance des experts attachés à 5% et 95%. Les confiances attachées à 5% et 95% sont alors $M/k_{.95}$, $Mk_{.95}$ où :

$$k_{.95} \approx \left(\frac{\exp(-0.658)}{y_{1-r}} \right)$$

Et y_{1-r} est le $(1-r)^{\text{ème}}$ quantile de la distribution normale standard.

Le format d'élicitation est relativement simple et la procédure de quantification de la dispersion est bien appropriée pour l'estimation directe d'une fréquence de défaillance. En revanche, elle paraît moins bien adaptée à l'évaluation d'un niveau de performance des digues. En effet, il paraît peu approprié d'associer des facteurs de surprise aux modalités qualitatives de l'échelle d'évaluation de la performance des digues.

9.1.2.2 Démarche associant des quantiles à une tendance centrale

Une démarche classique (Cooke et Goosens, 2000) pour estimer une quantité incertaine sur un intervalle continu consiste à éliciter par un expert les quantiles 5% et 95% associés à une tendance centrale, la médiane, des distributions subjectives du paramètre étudié.

Exemple 1 : procédure présentée dans le « Procedure guide for structured expert judgement » (Cooke et Goosens, 2000).

La procédure d'élicitation est basée sur l'utilisation des quantiles 5%, 50% et 95%. Après avoir chacun estimé les valeurs médianes de leurs distributions, les quatre experts interrogés quantifient la dispersion à l'aide des quantiles 5% et 95%. La figure ci-dessous présente les estimations des quatre experts pour une variable notée «Item no 2».

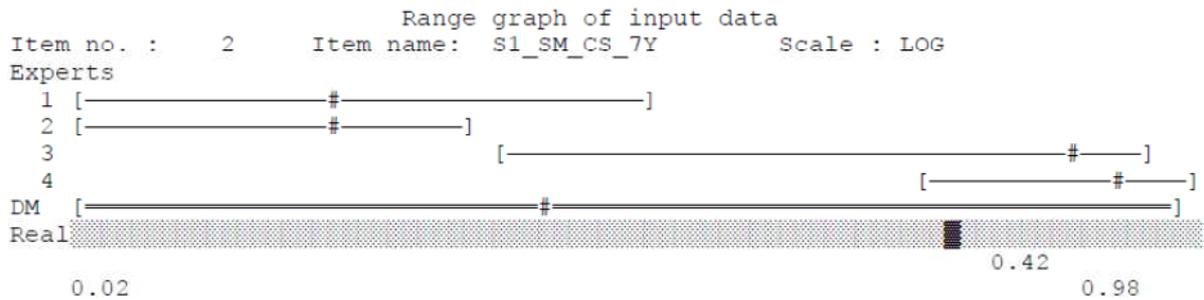


Figure 9-1 : Intervalles élicités par le panel d'experts (Cooke et Goosens, 2000)

Le format d'élicitation associant quantiles et médiane est relativement simple et peut être adapté à toute évaluation de variable aléatoire. La méthode apparaît fréquemment utilisée en analyse de risques (Cooke *et al.*, 2008).

Exemple 2 : procédure présentée dans « subjective probability distribution elicitation in cost risk analyses » (Galway, 2007).

Cet exemple présente la construction de distributions triangulaires basées sur l'élicitation des quantiles 5% et 95% et de la valeur modale. Il utilise la méthode de calcul développée par (Garvey, 2000) permettant de répartir les probabilités restantes entre les deux extrémités de la distribution, selon la dissymétrie de la distribution. La Figure 9-2 présente l'estimation du coût d'une structure de répartition du travail. Pour les quantiles précédemment cités, un expert élicite les valeurs 300, 400 et 800.

En utilisant la procédure de Garvey (2000), on obtient une distribution triangulaire avec 254 et 985 comme valeurs limites de l'intervalle. On remarque que les dix pour cent de probabilités ne sont pas distribués également de part et d'autre de la distribution. Deux pour cent sur le côté bas et huit pour cent sur le côté haut.

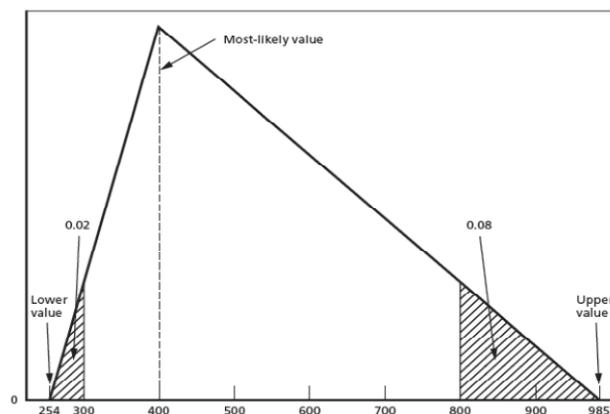


Figure 9-2 : Construction d'une distribution triangulaire élargie à partir des quantiles 5% et 95% associés à la valeur modale (Galway, 2007)

Ces exemples montrent que l'élicitation de deux quantiles et une valeur centrale est relativement simple, permettant l'élicitation d'une tendance centrale, mode ou médiane, assortie de son intervalle d'incertitudes.

9.1.2.3 Démarches basées sur l'élicitation d'intervalles

Les méthodes basées sur l'élicitation **d'intervalles fixes**, telle la roulette d'essai (Gore, 1987), consistent à diviser l'intervalle des valeurs possibles en sous intervalles d'amplitude égale. L'expert doit ensuite répartir des masses de probabilités 5% entre ces différents sous intervalles.

Exemple : la méthode de la roulette d'essai Oakley (2010), cite (Gore, 1987).

La méthode de la roulette d'essais (Figure 9-3) utilise des intervalles fixes (Gore, 1987). Elle consiste à diviser un espace d'échantillonnage θ en m intervalles et à demander à un expert de distribuer n extraits d'échantillons, correspondant à des masses de probabilités de 5%, parmi ces intervalles. La proportion d'extraits (*chips* dans la Figure 9-3) alloués à un intervalle particulier représente la probabilité qu'un extrait de θ appartienne à cet intervalle. Une fois la totalité de l'échantillon réparti dans les intervalles, on peut ensuite ajuster une distribution à l'histogramme élicité par l'expert. Si la procédure est faite de manière graphique, l'expert peut voir l'allure de la distribution formée par ses répartitions d'extraits de l'échantillon.

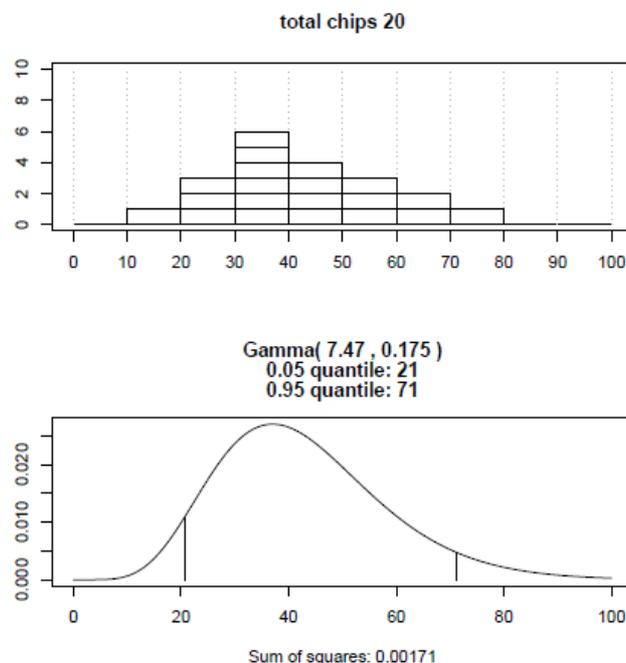


Figure 9-3 : Elicitation par méthode de la roulette d'essai et distribution associée (Oakley, 2010)

Cette méthode propose une démarche permettant à l'expert d'éliciter son opinion sous forme d'histogramme. Dans le contexte de notre recherche, l'échelle d'évaluation de la performance des digues rend difficile une telle évaluation par expertise et il paraît plus adéquat de demander à l'ingénieur d'éliciter directement la tendance centrale de la propriété et sa dispersion plutôt que d'éliciter des masses de probabilités.

La **méthode de la bissectrice** fonctionne avec l'élicitation d'**intervalles variables** (Raiffa, 1968; Oakley, 2010). Le principe de la méthode consiste à éliciter par un expert les bornes maximale et minimale de la distribution, puis de la subdiviser en intervalles plus petits de masses de probabilités égales.

Exemple : exemple d'élicitation par intervalles variables, la méthode de la bisection, Oakley (2010) cite (Raiffa, 1968).

Dans cet exemple, un expert est sollicité pour estimer la répartition d'une quantité θ contenue sur un intervalle $[0, I]$:

1. On demande à l'expert de choisir une valeur m pour laquelle il juge que les deux intervalles $[0, m]$ et $[m, I]$ ont la même probabilité de contenir θ ;
2. L'expert doit ensuite éliciter le quartile inférieur en divisant l'intervalle $[0, m]$ en deux intervalles de probabilités égales $[0, l]$ et $[l, m]$;
3. On procède à la même démarche pour l'intervalle $[m, I]$, en identifiant deux intervalles de même probabilité $[m, u]$ et $[u, I]$;
4. L'expert est ensuite poussé à réfléchir une nouvelle fois sur ses choix. On lui demande de considérer les quatre intervalles produits et de réajuster les valeurs l, m et u , selon qu'il juge que l'un ou l'autre soit plus ou moins probables que les autres.

(Oakley, 2010) propose ensuite d'ajuster une loi log-normale ou bêta aux quantiles élicités par l'expert : $l=25\%$, $m=50\%$ et $u=75\%$.

(O'Hagan *et al.*, 2006) considère que la méthode est particulièrement bien adaptée pour la modélisation de la dispersion d'une variable aléatoire. Toutefois, nous remarquons qu'il semble mal adapté de demander à un ingénieur d'affecter des masses de probabilité à plusieurs intervalles de l'échelle d'évaluation de la performance des digues.

Une autre méthode utilisant des **intervalles fixes et variables** est proposée et mise en œuvre par (O'Hagan, 1998; Low Choy *et al.*, 2009). Elle consiste à demander à un groupe d'experts d'estimer par consensus les bornes minimale L (*Lower*) et maximale U (*Upper*) de la fonction de densité de probabilités de ce paramètre. Les experts doivent ensuite estimer la valeur modale M « la plus vraisemblable » du paramètre et estimer les probabilités associées aux intervalles :

- a. (L, M) ,
- b. $(L, (L + M)/2)$,
- c. $((M + U)/2, U)$,
- d. $(L, (L + 3M)/4)$,
- e. $((3M + U)/4, U)$,

Cette procédure permet de construire un histogramme (Figure 9-4).

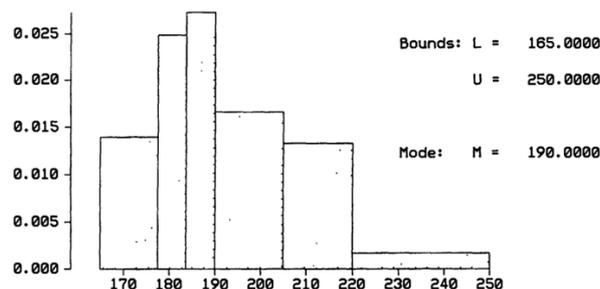


Figure 9-4 : Utilisation de la méthode de (O'Hagan, 1998) pour l'estimation de la distance entre deux villes

Cette méthode a pour avantage de permettre de construire des distributions de probabilité détaillées et de travailler finement les extrémités de distribution d'un paramètre particulier. Toutefois, elle est relativement lourde à mettre en œuvre et nous paraît mal adaptée à notre étude pour laquelle nous souhaitons adapter une procédure simple basée sur l'élicitation de la

valeur la plus vraisemblable pour chaque critère et de sa dispersion vers chaque extrémité de l'échelle d'évaluation de la performance des digues.

9.1.3 Choix d'une méthode d'élicitation

Nous proposons de développer une démarche basée sur l'élicitation : (1) des paramètres représentatifs de la tendance centrale de la distribution et (2) de son intervalle de dispersion.

(1) L'élicitation du paramètre de tendance centrale nécessite un choix parmi (Figure 9-5) :

- i) le *mode* correspondant à la valeur la plus vraisemblable pour laquelle la fonction de densité de probabilité est maximum ;
- ii) la *médiane* correspondant à la valeur qui divise une distribution en deux surfaces égales (quantile 50%) ;
- iii) la *moyenne* qui est égale à la somme des valeurs divisée par leur nombre.

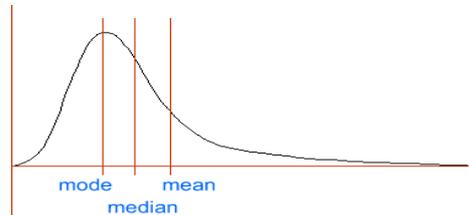


Figure 9-5 : Paramètres de la tendance centrale d'une distribution asymétrique : mode, médiane et moyenne

L'interprétation du paramètre *moyenne* n'est pas intuitive pour les ingénieurs dans les situations de distributions asymétriques et, à ce titre, elle figure dans peu d'exemples d'élicitation identifiés dans la littérature. Le paramètre *médiane* est mieux adaptée aux distributions asymétriques (O'Hagan *et al.*, 2006). Toutefois, le paramètre *mode* apparaît le mieux adapté pour notre recherche car il permet à l'ingénieur d'éliciter la modalité la plus vraisemblable du critère plutôt qu'éliciter directement des probabilités.

(2) L'élicitation de l'intervalle de dispersion nécessite le choix des bornes minimale et maximale de l'intervalle et des quantiles les mieux adaptés à l'étude. Les bornes de l'intervalle sont dictées par l'échelle d'évaluation des critères correspondant à l'intervalle continu [0 ; 10]. Les quantiles adoptés dans cette recherche sont 5% et 95% pour les raisons suivantes. Tout d'abord, ces quantiles correspondent aux grilles d'analyse des dires experts utilisées en analyse de risques des ouvrages hydrauliques. Les quantiles 5% et 95% représentent les bornes de l'intervalle hors duquel il est très peu vraisemblable que la valeur estimée se trouve (valeurs « very unlikely » et « virtually impossible » du Tableau 9-1). Ces quantiles fixent donc, selon la pratique de l'ingénierie, l'intervalle des valeurs « normales » de la distribution du paramètre étudié.

Verbal description	Probability equivalent	Low	High
"Virtually impossible"	0,01	0	0,05
"Very unlikely"	0,1	0,02	0,15
"Unlikely"	0,15	0,04	0,45
"Fairly unlikely, rather unlikely"	0,25	0,02	0,75
"Fair chance, toss-up"	0,5	0,25	0,85
"Usually, good chance, probable, likely"	0,75	0,25	0,95
"Quite likely"	0,8	0,3	0,99
"Very likely, very probably"	0,9	0,75	0,99
"Virtually certain"	0,99	0,9	1

Tableau 9-1 : Grille d'analyse des dires experts proposée pour les ouvrages hydrauliques (Vick, 1997; Hartford et Beacher, 2004)

Ensuite, les ingénieurs génie civil sont coutumiers de ces quantiles car ils correspondent à ceux adoptés pour les valeurs caractéristiques dans les méthodes semi probabilistes telles que les Eurocodes (Peyras *et al.*, 2006).

En synthèse, la méthode proposée consiste à éliciter la valeur la plus vraisemblable du critère à partir du mode et l'intervalle de dispersion par les quantiles 5% et 95%. La dispersion peut être asymétrique et traduit la confiance de l'ingénieur relative à la valeur modale élicitée.

Exemple : évaluation probabiliste du critère $C_{3, EI}$ -singularités dans le corps de digue sur un profil de digue

Les indicateurs d'état nécessaires au renseignement de ce critère sont : « terriers », « arbres/racines », « ouvrages traversant » et « contact entre le corps de la digue et les ouvrages traversants ». Pour le profil de digue étudié, les indicateurs d'état apportent les informations suivantes :

- par l'inspection visuelle, aucun terrier ni ouvrage traversant n'a été relevé ;
- en revanche, observation de nombreux pins adultes disposés en crête de digue.

L'ingénieur élicite d'abord les quantiles 5% et 95% de la distribution du critère et il choisit l'intervalle [3, 5] : il estime très peu vraisemblable que la valeur du critère se situe en dehors de cet intervalle. Enfin, il estime que la valeur la plus vraisemblable est 4 (Figure 9-6, à gauche).

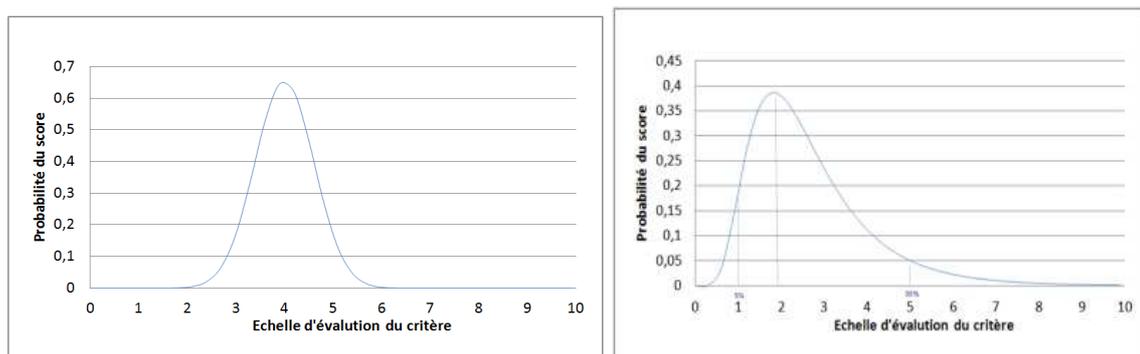


Figure 9-6 : Mise en œuvre de lois normale et log-normale pour représenter le critère $C_{3, EI}$ -singularités dans le corps de digue

Cette démarche permet de prendre en compte les incertitudes pesant sur les données d'entrée du critère. Ainsi si certains indicateurs d'états sont mal renseignés ou localement très variables, l'ingénieur a la possibilité d'augmenter les marges d'incertitude. En reprenant l'exemple précédent et s'il pesait une forte incertitude sur la qualité des inspections visuelles,

l'ingénieur pourrait, pour le critère $C_{3, EI}$ -singularités dans le corps de digue, éliciter le mode 2 associé à l'intervalle d'incertitude [1, 5] (Figure 9-6, à droite).

Le principe de l'élicitation que nous proposons repose sur l'élicitation par l'expert du mode et des quantiles 5% et 95%. Ces paramètres doivent permettre de construire une fonction de densité de probabilité modélisant fidèlement l'élicitation experte.

Nous ajoutons que lorsque l'évaluation d'un critère apparaît avec quasi certitude comme très bonne ou très mauvaise, et que l'ingénieur ne voit pas l'utilité d'éliciter trois paramètres, il pourra se contenter d'éliciter un simple intervalle délimité par des bornes Min et Max. *Exemple : un critère considéré avec beaucoup de certitude comme très satisfaisant pourra être évalué selon l'intervalle [9-10].* De même, en cas d'incertitude totale, l'ingénieur pourra éliciter l'intervalle uniforme [0, 10].

Cette démarche a pour objectif de faire gagner du temps à l'ingénieur lorsqu'il doit évaluer les critères de nombreux tronçons homogènes et que l'évaluation de certains ne nécessite pas de modélisation fine.

L'étape suivante va consister à sélectionner des lois de distribution adaptées à notre recherche.

9.1.4 Choix de lois de probabilité adaptées au contexte des digues

Nous passons ici en revue les lois de probabilité couramment évoquées dans la littérature pour la construction d'une distribution de probabilité « à dire d'expert ».

Nous souhaitons construire des lois tronquées sur l'intervalle [0, 10], pouvant être asymétriques, aussi bien du côté de la borne supérieure que de la borne inférieure. Il nous faut choisir une ou des lois adaptées à notre problème. Cinq lois continues sont fréquemment recommandées pour l'élicitation des probabilités subjectives : lois de probabilité uniforme, triangulaire, normale, log-normale, log-normale miroir et bêta (Fisher *et al.*, 2012).

La **loi uniforme** modélise l'information donnée sous la forme d'un simple intervalle. Elle permet à un expert de formaliser son opinion lorsqu'il ne peut se prononcer sur une valeur plus probable que les autres. On retient cependant qu'elle est la moins informative de toutes, ne proposant aucune distinction entre les valeurs extrêmes et les valeurs proches du centre de l'intervalle.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{pour } a \leq x < b, \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La **loi normale**, très utilisée en génie civil, permet de construire des fonctions de densité symétriques. On parle de loi normale lorsque l'on a affaire à une variable aléatoire continue dépendant d'un grand nombre de causes indépendantes dont les effets s'additionnent et dont aucune n'est prépondérante.

On appelle loi normale ou loi de Gauss de moyenne μ et d'écart type σ la loi d'une variable aléatoire de densité :

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(x - \mu)^2}{\sigma^2}\right)$$

La loi normale est définie sur l'intervalle $]-\infty; +\infty[$. Pour l'utiliser directement sur l'intervalle $[0 ; 10]$ de l'échelle d'évaluation de la performance des digues, elle nécessite d'être tronquée.

La **loi log-normale** permet de construire des fonctions de densité asymétriques. Une variable peut être modélisée par une loi log-normale si elle est le résultat de la multiplication d'un grand nombre de facteurs indépendants.

Si X est log-normale, de variance σ^2 , sa densité de probabilité est :

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(\ln(x) - \mu)^2}{\sigma^2}\right)$$

L'espérance et la variance sont donnés par :

$$E[X] = \exp\left(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right) ; \text{Var}[X] = (\exp \sigma^2 - 1) \cdot \exp(2\mu + \sigma^2)$$

La **loi log-normale miroir** est une expression particulière de la loi log-normale et sa densité de probabilité présente une dissymétrie inversée. Mathématiquement, elle peut être obtenue par un changement de variable (Figure 9-7).

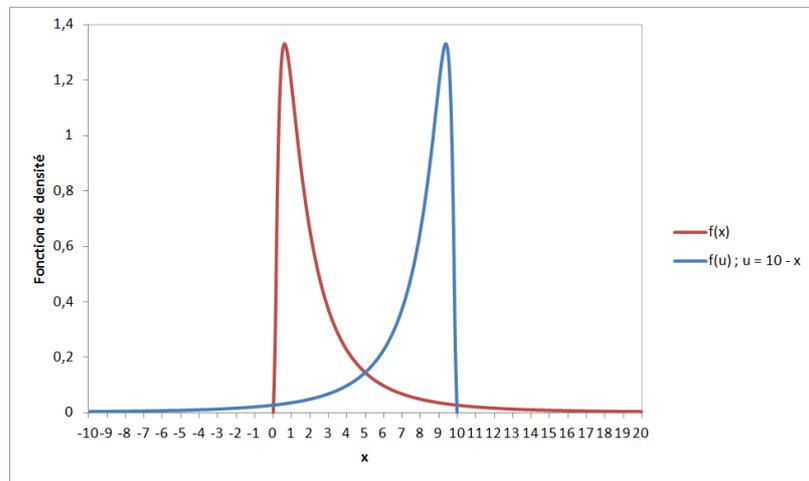


Figure 9-7 : Loi log-normale $f(x)$ et log-normale miroir $f(u)$ associée

Par exemple, la Figure 9-7 montre la fonction de densité de probabilité $f(x)$ et la loi log-normale miroir $f(u)$ où $u = 10 - x$ (correspondant à « un miroir placé à 10 »).

Les lois normales et log-normales sont très utilisées en statistique et en ingénierie et sont des outils familiers à la communauté du génie civil. Leurs formulations répondent à la modélisation de phénomènes additionnels ou multiplicatifs, comme les indicateurs d'états de chaque critère. Enfin les lois log-normales et log-normales miroir permettent de construire des distributions asymétriques. Ces lois sont définies sur des intervalles ouverts. Elles ne peuvent pas être utilisées telles quelles sur l'intervalle $[0 ; 10]$ et elles nécessitent d'être tronquées.

La **loi Bêta** est une distribution de probabilité continue définie sur l'intervalle 0 à 1. Deux paramètres permettent de définir sa forme : α et β (Figure 9-8).

Soit X une variable aléatoire avec une distribution Bêta, on écrit $X \sim \text{Bêta}(\alpha, \beta)$ et sa fonction de densité est :

$$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \cdot x^{(\alpha-1)} \cdot (1-x)^{(\beta-1)}$$

où $B(\alpha, \beta)$ est appelée la fonction bêta, définie par :

$$B(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} \text{ où } \Gamma(a) \text{ est une fonction gamma.}$$

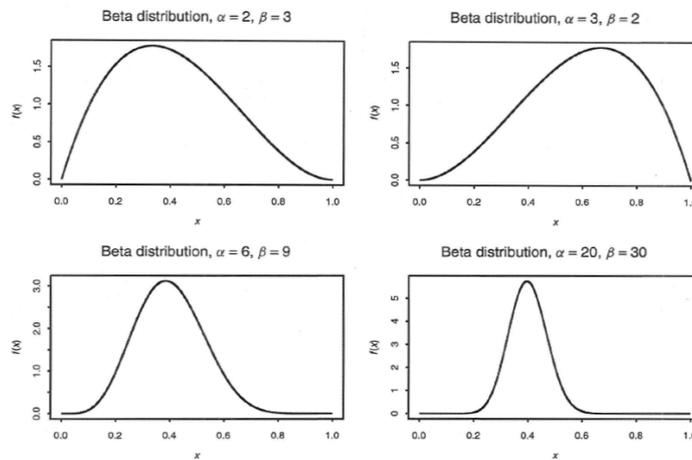


Figure 9-8 : Formes variées de fonction de densité de probabilités suivant une loi bêta (O'Hagan et al., 2006)

Son intervalle de définition borné et la variété de ses formes font de la loi Béta une bonne option pour la représentation des opinions expertes par des probabilités subjectives (O'Hagan et al., 2006). Toutefois l'interprétation physique de la loi Béta est difficile et il n'est pas aisé d'identifier les phénomènes qu'elle modélise. En outre, elle est peu connue des ingénieurs génie civil.

Cette analyse conduit à utiliser pour notre recherche les lois normales et log-normales pour prendre en charge l'incertitude pesant sur les critères. En effet, les critères d'évaluation des digues traduisent les mécanismes se produisant sur les ouvrages. Ils répondent à des lois de comportement physique ou mécanique et sont dus à la superposition de nombreux paramètres régissant ces comportements – résistances des matériaux, géométrie, facteurs environnementaux, sollicitations naturelles, etc. -, plus ou moins indépendants. Il en résulte qu'il est raisonnable de considérer que les lois normales et log-normales les représentent de manière efficace.

Les lois normales et log-normales proposées dans notre recherche doivent être tronquées sur l'intervalle $[0 ; 10]$, correspondant à l'échelle proposée pour l'évaluation des digues.

Par ailleurs, nous proposons d'utiliser les lois uniformes dans les cas d'incertitude complète ou, inversement, de quasi absence d'incertitude (cf. §9.1.3).

9.1.5 Intervention de l'ingénieur et ajustement de lois de probabilités aux paramètres élicités

9.1.5.1 Détermination des lois de probabilité

L'ajustement d'une loi de probabilité pour l'évaluation de chaque critère dépend des paramètres élicités par l'ingénieur. Deux situations peuvent alors se rencontrer :

(1) Si l'ingénieur élicite les trois paramètres - quantile 5%, quantile 95% et mode -, nous proposons d'ajuster une loi normale, log-normale ou log-normale miroir, tronquée sur l'intervalle $[0, 10]$:

- soit l'ingénieur élicite un mode équidistant aux quantiles 5% et 95% sur l'échelle d'évaluation de la performance des digues, auquel cas nous proposons d'ajuster une loi de probabilité normale tronquée sur l'intervalle $[0, 10]$;
- soit l'ingénieur élicite un mode asymétrique aux quantiles 5% et 95% et plus proche du quantile 5%, auquel cas nous proposons d'ajuster une loi de probabilité log-normale tronquée sur l'intervalle $[0, 10]$;
- soit l'ingénieur donne un mode asymétrique aux quantiles 5% et 95% et plus proche du quantile 95%, auquel cas nous proposons d'ajuster une loi de probabilité log-normale miroir tronquée sur l'intervalle $[0, 10]$. La fonction de densité de probabilité de cette loi correspond à la fonction de densité de probabilité de la loi log-normale tronquée sur laquelle on effectue un changement de variable $u = 10 - x$ (Figure 9-9).

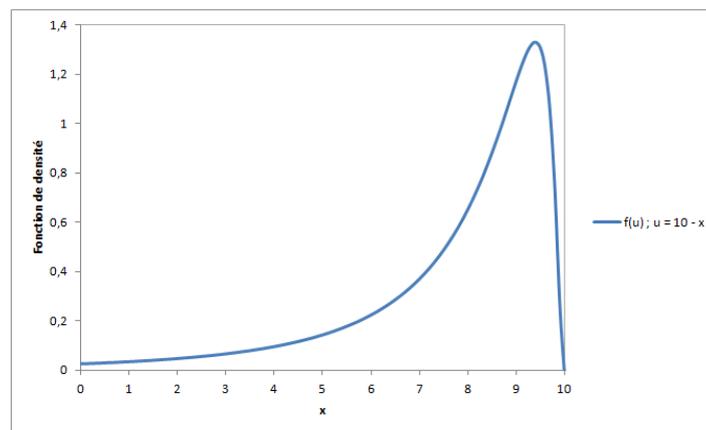


Figure 9-9 : Loi log-normale miroir tronquée sur l'intervalle $[0, 10]$

(2) Si l'ingénieur élicite deux paramètres - bornes Min et Max -, nous proposons d'utiliser une loi de probabilité uniforme.

9.1.5.2 Ajustement de lois normales, log-normales et log-normale miroir tronquées

Les lois normales, log-normales et log normales miroir tronquées sur $[0 ; 10]$ sont déterminées par deux paramètres : moyenne et écart type. Or nous avons retenu trois paramètres pour notre procédure d'évaluation des critères. Nous devons donc proposer une démarche permettant d'ajuster au mieux ces lois aux trois paramètres élicités par l'ingénieur. Ce travail présente des difficultés pour les raisons suivantes :

- le caractère symétrique de la loi normale (non tronquée) permet l'identification analytique des paramètres moyenne et écart type à partir du mode (confondu avec la moyenne pour une loi normale) et du quantile 5% ou 95%. Cependant, les quantiles 5% et 95% d'une loi normale non tronquée peuvent varier significativement par rapport à ceux d'une loi normale tronquée $[0, 10]$, notamment si un de ces quantiles se trouve aux abords d'une borne de cet intervalle ;
- dans le cas des lois log-normale et log-normale miroir, les écarts du mode à chaque quantile ne sont pas les mêmes. De plus, le mode est différent de la moyenne de la distribution (cf. Figure 9-5). Il n'est donc pas possible d'utiliser une formule analytique pour identifier les paramètres des lois log-normal et log-normal miroir s'ajustant aux paramètres élicités par l'ingénieur ;
- au final pour ces différentes lois, il n'existe pas de solution analytique exacte permettant de vérifier les trois paramètres élicités.

Nous proposons donc une démarche basée sur l'application de la méthode des moindres carrés : il s'agit, parmi plusieurs lois potentielles proches des trois points élicités par l'ingénieur, de déterminer celle qui minimise la somme des écarts au carré entre les paramètres élicités et les trois paramètres des lois envisagées – quantiles 5%, 95% et mode.

Sur la base de cette démarche, trois traitements sont possibles :

- Par le développement d'un algorithme d'optimisation permettant de déterminer le couple [moyenne et écart-type] de la loi minimisant la somme des écarts au carré. Ce type de démarche a été adoptée par (O'Hagan, 1998; Oakley, 2010) pour l'identification des paramètres de la loi bêta approchant au mieux l'avis d'un groupe d'experts. Toutefois, le développement d'un tel algorithme dans notre étude est complexe du fait de la non connaissance de l'expression analytique des trois paramètres – quantiles 5%, 95% et mode – des lois normales, log-normales et log-normale miroir tronquées ;
- Par des simulations de plusieurs lois correspondant à de multiples moyennes et écarts-types pris au hasard (par des simulations de Monte Carlo) – ou par balayage dans l'intervalle $[0 ; 10]$. La difficulté de ce traitement est liée à des temps de calcul importants ;
- Par des simulations sur quelques lois choisies proches des trois paramètres élicités par l'ingénieur : par des ajustements successifs des paramètres [moyenne et écart type] de la loi, il est possible de déterminer celle correspondant le mieux aux trois paramètres élicités. Il s'agit en fait de la démarche précédente ciblée sur des lois a priori bien adaptées.

Dans notre étude, nous avons utilisé ce dernier traitement et nous avons adopté une démarche itérative reposant sur plusieurs étapes (Figure 9-10) :

- proposition d'une loi normale, log-normale ou log-normal miroir non tronquée pressentie comme minimisant les écarts avec les paramètres modes, quantiles 5% et 95% élicités par l'ingénieur. Cette loi est définie par une valeur moyenne et un écart type ;
- détermination des quantiles 5%, 95% et du mode de la loi normale et log normale tronquée : cette étape est faite par simulations de Monte-Carlo, permettant de construire un échantillon artificiel de la loi tronquée sur $[0, 10]$ et permettant ensuite de déterminer les 3 paramètres - quantiles 5%, 95% et mode – de cette loi ;

- comparaison des trois paramètres de l'échantillon produit par simulation avec ceux élicités par l'ingénieur et évaluation de la somme des écarts au carré ;
- relance de la procédure par ajustement au centième des paramètres moyenne et écart type jusqu'à la détermination de la loi pour laquelle la somme des écarts au carré est minimale.

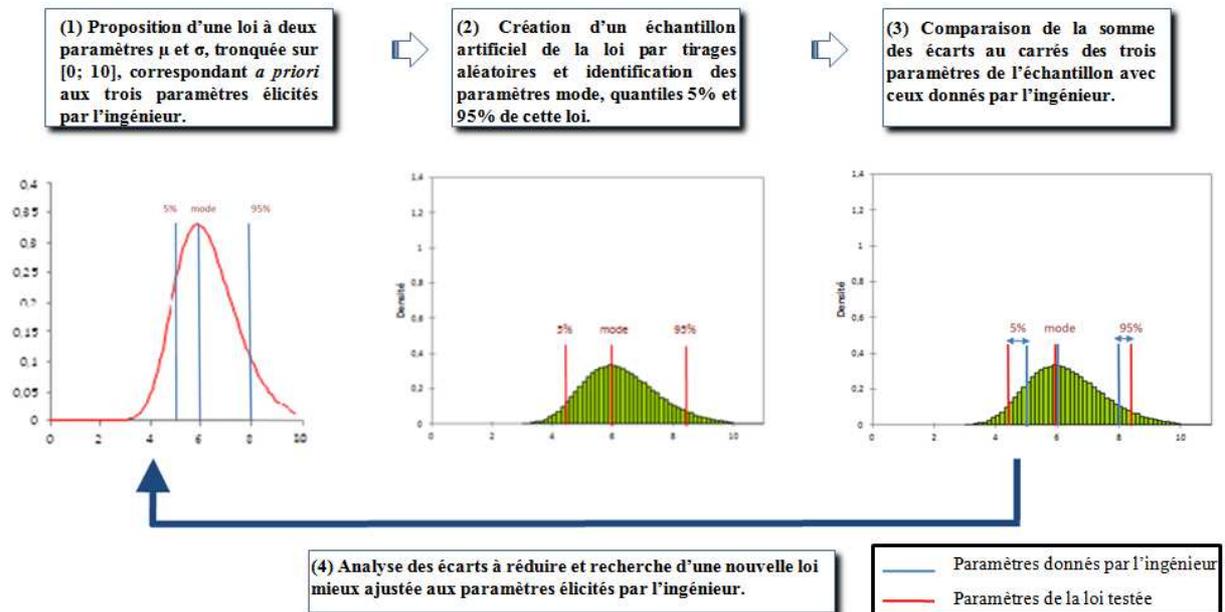


Figure 9-10 : Procédure d'ajustement d'une loi log-normale tronquée aux paramètres élicités par l'ingénieur quantiles 5% = 5, 95% = 8 et mode = 6.

Cette démarche permet d'ajuster la meilleure loi aux trois paramètres élicités par l'ingénieur. Toutefois, remarquons qu'elle conduit à donner la même importance au paramètre de la tendance centrale qu'aux paramètres de dispersion, ce qui n'est pas parfaitement satisfaisant du point de vue de la répartition des probabilités. En pratique, nous nous satisferons de cette démarche car ce choix permet de s'approcher au mieux de l'évaluation de l'ingénieur et ne conduit pas à des erreurs significatives.

Ce travail a été fait pour l'ensemble des combinaisons discrètes possibles des trois paramètres (quantiles 5%, 95% et mode), sur les valeurs $\{0; 1; 2; \dots; 10\}$. Nous avons pu ainsi produire les effectifs des distributions correspondant à toutes les combinaisons d'élicitation possibles de l'ingénieur. Ces distributions sont rassemblées dans une base de données. Ainsi, lorsque l'ingénieur élicite les paramètres d'évaluation d'un critère (mode, quantile 5% et quantile 95%), le modèle d'évaluation de la performance des digues dispose déjà de la distribution correspondante et peut l'exploiter automatiquement sans avoir de calcul à effectuer pour l'ajustement de lois.

Nous utilisons une démarche qui permet d'ajuster les deux paramètres des lois normales, log-normales et log-normale miroir tronquées en minimisant les écarts avec les trois paramètres élicités par l'ingénieur. Les distributions correspondant à l'ensemble des combinaisons possibles des paramètres élicités par l'ingénieur ont été identifiées et sont rassemblées dans le modèle.

Une perspective d'amélioration possible est le développement d'un algorithme d'optimisation, tel qu'évoqué précédemment. Cela permettrait de raccourcir les temps de

calcul, mais surtout pourrait permettre l'utilisation de paramètres continus sur l'intervalle [0; 10] pour les quantiles 5%, 95% et le mode.

9.1.5.3 Ajustement de lois uniformes

Dans les cas d'incertitude complète ou de quasi absence d'incertitude, l'élicitation du mode et des quantiles peut présenter un intérêt très limité. L'ingénieur pourra préférer éliciter un intervalle défini par des bornes min et max tel que [0, 1] ou [8, 10], lorsqu'il est quasi certain de la bonne ou de la mauvaise évaluation du critère, ou, *a contrario*, de l'intervalle [0, 10], dans le cas d'une incertitude complète, ne donnant ainsi aucune information sur le critère.

Dans ces cas, on adopte simplement une loi uniforme à partir des bornes données par l'ingénieur (Figure 9-1).

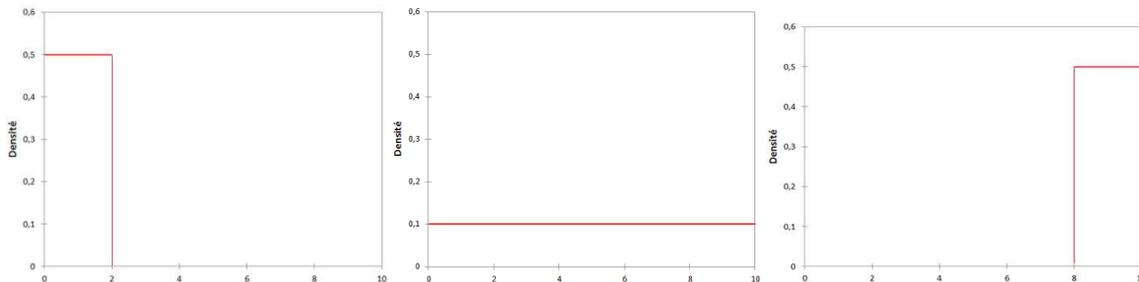


Figure 9-1 : utilisation de la loi uniforme pour modéliser les cas extrêmes d'élicitation de l'ingénieur

9.1.6 Synthèse

Nous avons proposé une démarche d'évaluation des critères basée sur l'élicitation de trois paramètres : mode, quantiles 5% et 95%. Cette démarche utilise des lois normales, log-normales et log-normales miroir pour modéliser l'incertitude des évaluations des critères. Ces lois sont tronquées sur l'intervalle [0, 10]. Pour les cas particuliers, il est possible d'adopter une loi uniforme à partir de l'élicitation de deux paramètres : borne min et borne max.

Sur ces bases, nous avons défini une méthodologie pour construire des lois de probabilités sur les paramètres élicités par les ingénieurs.

9.2 Démarche proposée pour la réduction des biais

Nous avons vu les principaux biais liés à l'élicitation de l'opinion experte (cf. §8.2.2.2). Ces biais peuvent également se manifester lors de l'évaluation des critères des digues et nous rencontrons :

(1) Le biais de disponibilité :

Exemple : l'ingénieur a tendance à donner trop d'importance à un mécanisme de rupture en cause dans une catastrophe largement relayée par les médias.

(2) Le biais de représentation :

Exemple : l'ingénieur néglige l'impact des conduites traversantes sur la sécurité des ouvrages, alors qu'un pourcentage important de rupture de digue est imputable à ce type de phénomène.

(3) Le biais de sur confiance :

Exemple : un ingénieur est trop confiant dans la représentativité d'un sondage et minimise l'incertitude liée à la variabilité de disposition des matériaux.

(4) Le biais d'ancrage :

Exemple : après consultation de documents d'archive, l'ingénieur évalue un critère selon une modalité la plus vraisemblable correspondant à son premier jugement, puis ne parvient pas à l'ajuster à la lumière d'autres éléments nuanciant ou contredisant cette appréciation.

Plusieurs démarches ont été mises au point pour la réduction ou la prise en compte des biais : une présentation détaillée des différents biais pour une meilleure prise de conscience par l'expert (Cooke et Goosens, 2000), l'utilisation de procédures d'élicitation particulières (Morgan et Henrion, 1990), la réalisation d'exercices d'entraînement (Cooke et Goosens, 2000; O'Hagan *et al.*, 2006).

Dans cette recherche, nous proposons plusieurs modalités d'élicitation afin de réduire les différents biais :

- le biais de sur-confiance : lors de l'élicitation, l'ingénieur spécialisé doit indiquer quelles conditions auraient pu amener les quantiles 5% et 95% à être estimés plus bas/ haut et pourquoi ils ne le sont pas. Il doit ainsi être amené à donner une attention particulière à la justification de l'incertitude qu'il associe à chaque critère évalué ;
- le biais d'ancrage : on propose d'éliciter les valeurs extrêmes de la distribution avant la valeur centrale. Cette démarche doit amener l'ingénieur à considérer l'ensemble des aspects de l'évaluation du critère avant d'éliciter la valeur qu'il considère la plus vraisemblable ;
- les biais de disponibilité et de représentation : lors du renseignement des critères par l'ingénieur, le modèle met à sa disposition toutes les informations à considérer pour l'évaluation de la performance des ouvrages. Ainsi, l'ingénieur est amené à considérer l'ensemble des critères d'évaluation des digues et, par là, à réduire les biais liés aux éléments qu'il a le plus en mémoire (biais de disponibilité) ou liés à une mauvaise appréciation de la représentativité des éléments (biais de représentation).

Nous proposons la construction d'un *manuel d'emploi des probabilités subjectives* (cf. annexe I), incluant :

- Une introduction à la théorie des probabilités subjectives :
 - o à quoi correspondent une probabilité et une fonction de densité de probabilité ?
 - o présentation de l'interprétation subjectiviste des probabilités.
- Une sensibilisation aux concepts des biais :
 - o présentation et définitions des principaux biais décrits dans la littérature ;
 - o exemple de manifestation de chacun des biais.
- Une explication détaillée du modèle d'évaluation de la performance et des variables à évaluer :

- liste et définition des critères d'évaluation des digues ;
- détails des indicateurs d'état, informations nécessaires et sources à considérer pour l'évaluation de chaque critère ;
- les formes d'imperfections modélisées par chaque critère (représentativité linéaire des données, imperfections du langage, phénomène aléatoire).

Nous proposons également des *exercices* de familiarisation à l'utilisation des probabilités subjectives pour l'estimation des critères d'évaluation des digues. Ils sont basés sur une étude de cas de digue illustrant les raisonnements menant à l'élicitation des distributions de probabilité pour les critères d'évaluation (cf. Partie 4). L'ingénieur peut comparer ses distributions et ses raisonnements à ceux du comité d'expertise associé à nos recherches (Figure 9-11). Cet exercice « d'auto calibration » doit amener l'ingénieur à mieux identifier les biais susceptibles d'entacher ses évaluations des critères :

- disponibilité et représentation, s'il surestime ou néglige certains indicateurs d'état ;
- sur confiance, s'il a tendance à sous estimer ou surestimer les imperfections des données des digues ;
- mauvais ancrage, si les valeurs modales sont systématiquement divergentes.

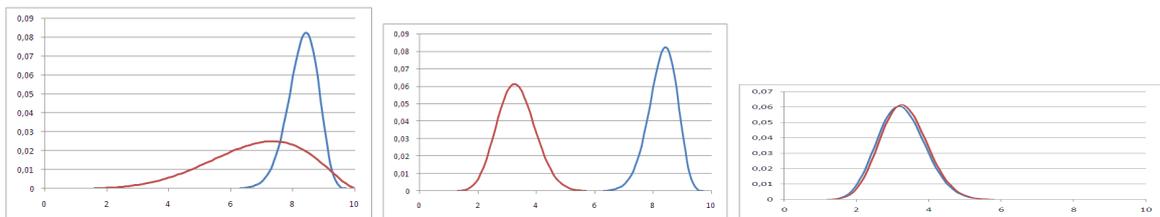


Figure 9-11 : Calibration de l'ingénieur lors des exercices, en rouge les distributions données par le manuel et en bleu celle de l'ingénieur. De gauche à droite : manifestations possibles des biais de surconfiance, mauvaise calibration résultant d'ancrage et/ou de disponibilité et/ou de représentation, enfin une calibration « idéale »

Nous proposons une démarche pour la réduction des biais pouvant entacher l'évaluation des critères par l'ingénieur. Elle repose sur plusieurs points :

- une procédure d'élicitation permettant de réduire les biais de sur-confiance, de disponibilité, de représentation et d'ancrage ;
- un manuel présentant les probabilités subjectives, la définition des biais pouvant altérer les évaluations de l'ingénieur ;
- des exercices de calibration à partir des cas d'études utilisés par le comité d'expertise qui suit notre recherche.

9.3 Propagation des incertitudes dans le modèle

9.3.1 Démarche

A partir du modèle d'évaluation de la performance des digues développé en partie 2, nous proposons de propager les incertitudes des évaluations des critères par la méthode des simulations de Monte-Carlo (cf. §8.1.3).

Cette méthode permet de modéliser le comportement d'un système en procédant à des tirages aléatoires pour les différents paramètres d'entrée, puis à déterminer le résultat obtenu à partir des séquences d'agrégations constitutives des indicateurs de performance. En répétant cette opération n fois, nous obtenons un échantillon permettant de construire les histogrammes et les fonctions de densité de probabilité pour les indicateurs de performance (Figure 9-17).

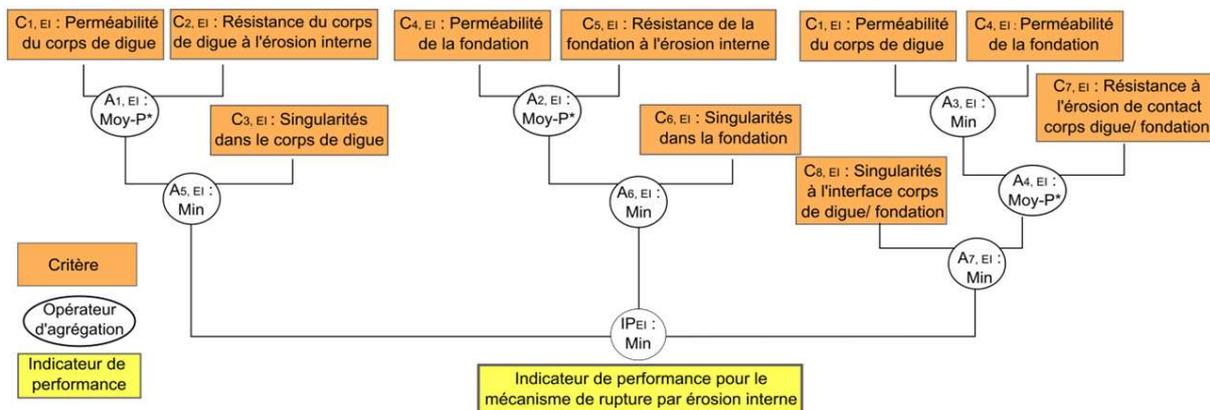


Figure 9-12 : Schéma d'agrégation de l'indicateur de performance pour le mode de rupture par érosion interne

Exemple : propagation des incertitudes pour l'indicateur de performance « Erosion interne »

L'indicateur de performance pour le mode de rupture par érosion interne agrège les différents critères selon les fonctions d'agrégation présentées dans la partie précédente (cf. §6.5.2.2). Il permet de mesurer l'indicateur de performance d'un profil de digue représentatif d'un tronçon homogène. Il est composé de trois parties :

- les séquences d'agrégation des critères $C_{1, EI}$ à $C_{3, EI}$ sont relatives à l'évaluation de la performance du corps de digue ;
- les séquences d'agrégation des critères $C_{4, EI}$ à $C_{6, EI}$ à la performance de la fondation ;
- les séquences d'agrégation des critères $C_{7, EI}$ et $C_{8, EI}$ à la performance de l'interface corps de digue/ fondation.

Afin d'illustrer notre démarche, nous proposons de détailler par la suite la procédure de propagation des incertitudes au sein des séquences d'agrégation relatives au corps de digue (critères $C_{1, EI}$ à $C_{3, EI}$). Dans cet exemple, les séquences d'agrégation des critères relatives au corps de digue sont constituées d'une moyenne pondérée et d'un Minimum.

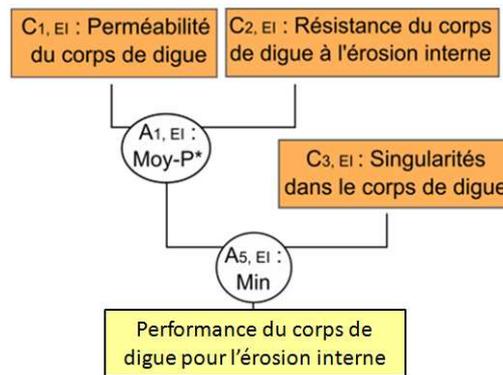


Figure 9-13 : Séquences d'agrégation de l'indicateur de performance érosion interne relatives au corps de digue

9.3.2 Evaluation des variables d'entrée

Les simulations de Monte-Carlo permettent d'introduire les lois de probabilité des différentes variables d'entrée, variables au sein desquelles le logiciel de simulation va effectuer les tirages aléatoires.

Dans notre exemple, il s'agit des critères d'évaluation des digues :

- $C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digue ;
- $C_{2, EI}$ -résistance du corps de digue à l'érosion interne ;
- $C_{3, EI}$ -singularités dans le corps de digue.

Pour le critère $C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digue, l'ingénieur spécialisé a évalué les quantiles 5% et 95% de la distribution du critère comme étant respectivement 5 et 9 et son mode 8.

Suivant la procédure décrite précédemment (cf. §9.1.5.2), nous avons ajustée une loi log-normale tronquée aux paramètres de la distribution inverse sur l'intervalle $[0, 10]$, à savoir 1 et 5 pour les quantiles 5% et 95%, et 2 pour la valeur la plus vraisemblable (Figure 9-14).

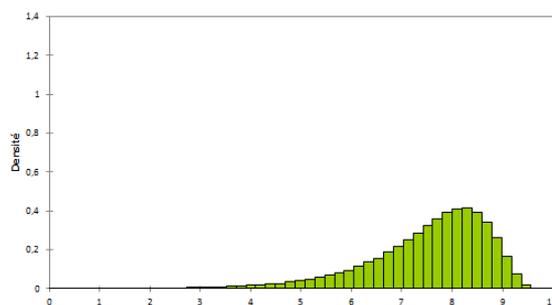


Figure 9-14 : Loi log-normale miroir tronquée correspondant au critère $C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digue

Pour le critère $C_{2, EI}$ -résistance à l'érosion interne du corps de digue, l'ingénieur a évalué les quantiles suivant : $Q5\% = 3$, $Q95\% = 7$, et 5 pour le mode. L'aspect symétrique de la distribution conduit à utiliser une loi normale tronquée sur l'intervalle $[0, 10]$.

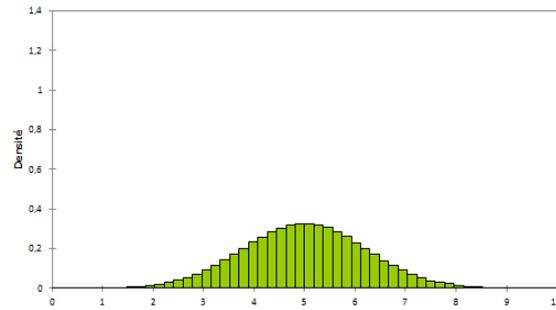


Figure 9-15 : Loi normale tronquée correspondant au critère $C_{2, EI}$ -résistance du corps de digue à l'érosion interne

L'ingénieur a évalué que les bornes de la distribution du critère $C_{3, EI}$ -singularités dans le corps de digue sont 8 et 10. Nous ajustons une loi uniforme (Figure 9-16).

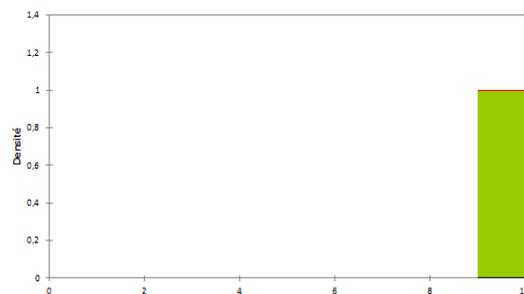


Figure 9-16 : Loi uniforme correspondant au critère $C_{3, EI}$ -singularités dans le corps de digue

9.3.3 Propagation des incertitudes dans le modèle

La suite de la procédure comprend des tirages aléatoires à partir des lois élicitées pour les critères. Nous paramétrons la procédure de calcul agréant les critères selon la fonction d'agrégation de la séquence de défaillance. Les simulations permettent d'obtenir une distribution empirique pour l'indicateur de performance du mécanisme étudié (Figure 9-17). A partir de 10 000 tirages, nous obtenons le résultat suivant :

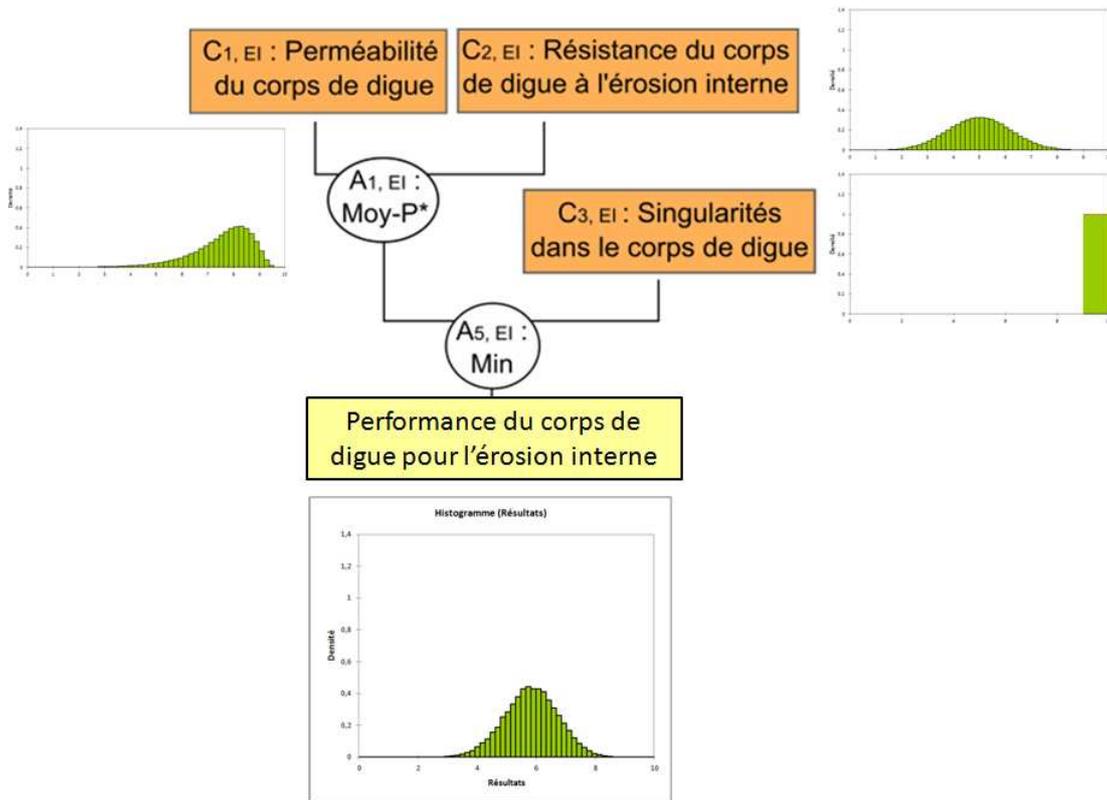


Figure 9-17 : Exemple de simulation de Monte Carlo pour obtenir la performance du corps de digue vis-à-vis du mécanisme érosion interne

La distribution empirique permet de déterminer le mode, représentatif de la tendance centrale de l'indicateur de performance, et les fractiles 5% et 95%, représentatifs de l'incertitude sur la connaissance de l'indicateur (Figure 9-18).

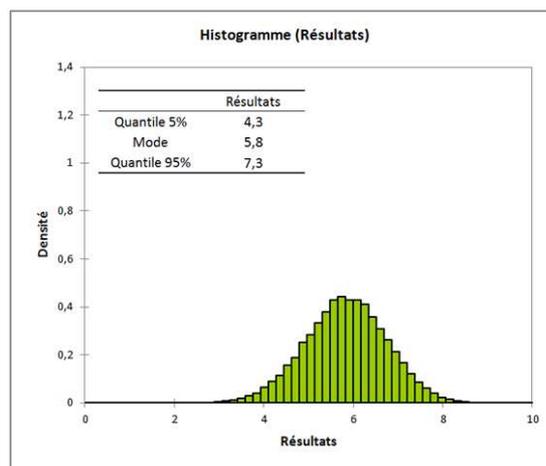


Figure 9-18 : Distribution empirique de l'indicateur de performance pour le mécanisme d'érosion interne

9.3.4 Représentation linéaire

Les résultats obtenus peuvent être représentés par profils homogènes tout au long du linéaire. Cela permet de visualiser, pour chaque profil, la valeur la plus vraisemblable de l'indicateur de performance et l'incertitude pesant sur cette valeur (Figure 9-19).

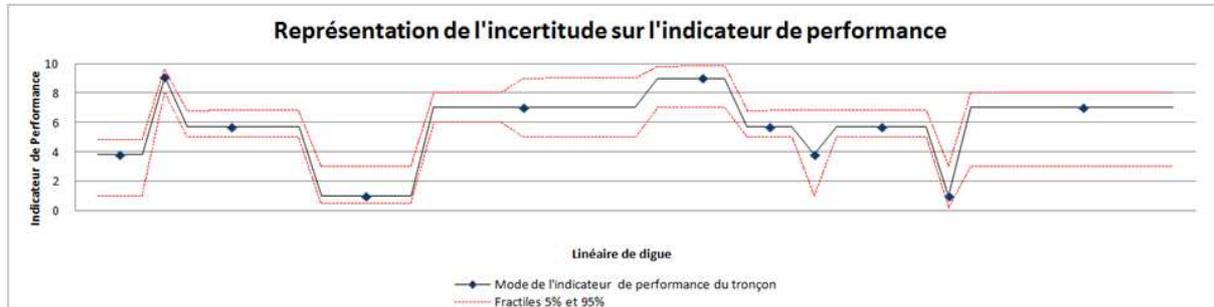


Figure 9-19 : Mode et fractiles 5%-95% de l'indicateur de performance, tout au long du linéaire de digue

A partir de ce graphique, l'ingénieur peut identifier :

- les tronçons pour lesquels un suivi s'impose, par exemple lorsque le fractile 5% est inférieur à 6, c'est-à-dire à la modalité *tolérable*.
- Les tronçons pour lesquels il faut intervenir en urgence, par exemple lorsque le fractile 5% est inférieur à 3.

9.3.5 Analyse de sensibilité

Pour ces tronçons, l'ingénieur souhaite connaître le ou les critères contribuant majoritairement à la distribution obtenue pour l'indicateur de performance. Il peut ainsi identifier la contribution des critères à un indicateur de performance et mieux définir ces recommandations en termes d'investigation et/ou de confortement de l'ouvrage. Nous proposons pour cela une analyse de sensibilité des résultats produits par le modèle.

Une **analyse de sensibilité** vise à évaluer le poids d'un paramètre ou d'une variable d'entrée et à identifier l'influence de sa variation sur l'évaluation d'une variable de sortie. Nous cherchons à définir un coefficient de sensibilité s_i permettant de connaître l'influence globale de chaque critère dans le résultat de l'indicateur de performance. (Lemaire *et al*, 2005) définit un coefficient de sensibilité s_i visant à évaluer la variation d'une variable de sortie y lors de l'évaluation d'une variable d'entrée x et s_i peut-être calculé selon la relation suivante :

$$s_i = \frac{\partial y}{\partial x}$$

Nous nous intéressons dans notre recherche à évaluer la variation d'un indicateur de performance IP lors de l'évolution d'un critère C_i . Selon (Lemaire *et al*, 2005), nous pouvons donc définir un coefficient de sensibilité s_i permettant de connaître l'influence globale de chaque critère dans le résultat de l'indicateur de performance, de la façon suivante :

$$s_i = \frac{\partial IP}{\partial C_i}$$

Sachant que dans notre application l'ingénieur évalue les critères en élicitant les valeurs des quantiles 5%, 95% et le mode, nous proposons de calculer le coefficient de sensibilité s_i pour chaque critère C_i de la manière suivante :

$$s_i = \frac{\partial IP}{\partial C_i} \approx \frac{\Delta IP}{\Delta C_i} = \frac{IP(C_{i_{95\%}}) - IP(C_{i_{5\%}})}{C_{i_{95\%}} - C_{i_{5\%}}}$$

avec :

- $C_{i_{95\%}}$ et $C_{i_{5\%}}$ correspondent respectivement aux valeurs des quantiles 95% et 5% du critère C_i .
- $IP(C_{i_{95\%}})$ correspond au calcul de l'indicateur de performance IP en prenant la valeur du quantile 95% du critère C_i et le mode pour les autres critères impliqués dans l'indicateur de performance.
- $IP(C_{i_{5\%}})$ correspond au calcul de l'indicateur de performance IP en prenant la valeur du quantile 5% du critère C_i et le mode pour les autres critères impliqués dans l'indicateur de performance.

Le coefficient de sensibilité s_i représente la variation de l'indicateur de performance IP obtenu pour les quantiles 95% et 5% de C_i , par rapport à la dispersion du critère C_i (exprimée par la différence entre les quantiles 95% et 5% de C_i). Le coefficient de sensibilité s_i vise à identifier les critères ayant le plus de poids sur la variation d'un indicateur de performance.

En suivant ce calcul et en adoptant les valeurs de l'exemple de la section précédente (cf. §9.3.2 et 9.3.3), nous obtenons les résultats suivants (tableau 9-2) :

	$C_{1, EI}$	$C_{2, EI}$	$C_{3, EI}$
Quantile 5% ou $C_{i_{5\%}}$	5	3	9,05
Mode (moyenne si distribution uniforme)	8	5	9,5
Quantile 95% ou $C_{i_{95\%}}$	9	7	9,95
IP ($C_{i_{95\%}}$)	6,33	7,33	6
IP ($C_{i_{5\%}}$)	5	4,67	6
s_i	0,33	0,67	0

Tableau 9-2 : Application étude de sensibilité

Les coefficients de sensibilité obtenus sont les suivants :

- 0,33 pour $C_{1, EI}$, -perméabilité du corps de digue ;
- 0,67 pour $C_{2, EI}$, -résistance du corps de digue à l'érosion interne ;
- 0,00 pour $C_{3, EI}$, -singularités dans le corps de digue.

Ces résultats indiquent dans ce cas que le critère ayant le plus d'importance dans l'évaluation de la performance du tronçon est le critère $C_{2, EI}$, -résistance du corps de digue à l'érosion interne. Si l'ingénieur souhaite améliorer la performance du tronçon, c'est aux phénomènes modélisés par ce critère qu'il doit accorder le plus d'attention.

Le coefficient de sensibilité du critère $C_{3, EI}$, -singularités dans le corps de digue est de 0. Cela est dû à la formulation de l'indicateur qui agrège la valeur de ce critère avec le résultat de la moyenne pondérée des critères $C_{1, EI}$ et $C_{2, EI}$ par un min. Dans l'illustration proposée, l'évaluation du critère étant très bonne, il n'intervient pas dans le résultat de performance. Si ce critère avait été évalué défavorablement, son coefficient de sensibilité pourrait être important voire prépondérant.

9.3.6 Synthèse

Nous avons proposé l'utilisation des simulations de Monte-Carlo pour la propagation des incertitudes dans le modèle d'aide au diagnostic. Cette méthode permet de :

- prendre l'ensemble des lois de probabilité élicitées ;
- propager les incertitudes selon les séquences et les fonctions d'agrégation définies dans le modèle d'agrégation multicritère ;
- construire des distributions empiriques aisément exploitables pour l'aide à la décision.

Enfin, nous proposons une démarche d'analyse de sensibilité permettant de déterminer le ou les critères prépondérants dans les niveaux de performance produits.

9.4 Synthèse

Nous avons présenté dans la partie 2 un modèle d'aide au diagnostic des digues qui permet, par agrégation de critères, d'obtenir une information synthétique sous forme d'indicateurs de performance.

Toutefois, les informations des digues constituant les données d'entrée du modèle présentent de nombreuses imperfections de différentes natures et le caractère linéaire des ouvrages induit des informations présentant une grande variabilité spatiale. Dans ce contexte, les recherches exposées dans cette partie ont visé à :

- l'utilisation du jugement de l'ingénieur spécialisé pour évaluer les critères, en tenant compte de la quantité et de la qualité de l'information utilisée ;
- le développement d'un modèle probabiliste d'évaluation de la performance des digues renseignant la fiabilité de l'information produite.

Ainsi, cette recherche a permis de développer un modèle d'évaluation de la performance des digues basé sur l'utilisation des probabilités subjectives. Le modèle considère les critères d'évaluation des digues comme des variables aléatoires, prises en charge par des lois normales, log-normale, log-normale miroir ou uniforme. La démarche a consisté alors à construire une méthodologie d'élicitation des dires experts basée sur l'élicitation des paramètres des lois de probabilités : les quantiles 5%-95% et la valeur modale.

La propagation des incertitudes est réalisée au moyen de simulations de Monte Carlo, permettant in fine de connaître la distribution des indicateurs de performance du tronçon de digue étudié pour chacun des mécanismes. Des analyses de sensibilités permettent ensuite de connaître les critères prépondérants dans les résultats donnés par les indicateurs de performance.

Un tel modèle prenant en compte l'incertitude des données d'entrée est précieux pour l'ingénieur et le gestionnaire. Il permet d'apprécier la confiance qui peut être accordée à une évaluation et de guider le choix des tronçons de digues sur lesquels les investigations doivent être priorisées. Il permet également de guider le choix des actions techniques pour améliorer la performance d'un tronçon de digue.

Partie 4

Applications et

valorisation

Chapitre 10 Validation du modèle par application à une étude de cas

Ce chapitre présente l'application du modèle probabiliste d'évaluation de la performance proposé à une digue située le long du Rhône. Cette digue a fait l'objet d'une étude diagnostic approfondie récente. Le modèle est testé sur plusieurs profils transversaux représentatifs de tronçons homogènes pour lesquels la performance est homogène.

Menée en interaction avec un groupe d'ingénieurs senior spécialisés dans les ouvrages hydrauliques, l'application comprend l'évaluation qualitative des indicateurs d'état et l'évaluation probabiliste des critères des profils de la digue, ainsi que la propagation des incertitudes dans le modèle pour chaque mécanisme de rupture. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à ceux de l'étude de diagnostic.

10.1 Présentation de l'étude de cas et démarche d'application du modèle

L'étude de cas est une digue destinée à protéger des eaux du Rhône, longue de 10 km environ, située dans le département du Gard. Comme la grande majorité des digues du bas Rhône, elle est constituée en remblai homogène et comporte plusieurs profils différents, en termes de géométrie, d'âge et de constitution.

Les digues du bas Rhône remontent pour partie à l'époque romaine, généralement implantées sur des bourrelets alluviaux, déjà surélevés par rapport à la plaine (Figure 10-1). Elles sont essentiellement constituées de matériaux argilo-sableux et construites sur des dépôts alluvionnaires sablo-limoneux de l'Holocène, renfermant localement des couches de galets. La digue a connu de nombreuses réparations, confortements et reconstructions au cours du temps, notamment suite aux dégâts causés par les crues de 1840, 1856, 1993-1994, 2002 et 2003.

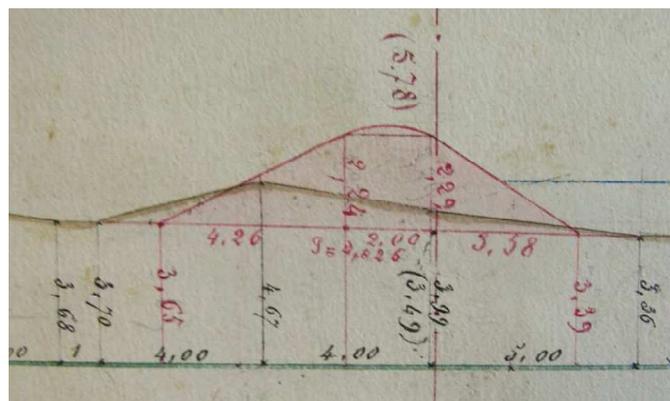


Figure 10-1 : Coupe type d'une digue du Rhône ancienne construite sur un bourrelet alluvial

Cette digue a fait l'objet d'un diagnostic récent (2008), relevant de la pratique classique de l'ingénierie. Ce diagnostic s'appuie entre autres sur la réalisation d'investigations géophysiques et géotechniques très complètes.

Pour notre travail de validation, nous avons sélectionné six profils (Figure 10-2) représentatifs de tronçons homogènes de manière à couvrir des cas variés :

- les profils 1 et 4 correspondent à des sections courantes de la digue, parfois localement confortées par des engraissements de talus amont et aval ;
- le profil 2 correspond à une brèche rebouchée, vraisemblablement à la suite de crues du XIX^{ème} siècle ;
- le profil 3 correspond à un secteur où les pentes des talus sont très asymétriques, très douces côté Rhône et raides côté zone protégée ;
- le profil 5 correspond à un contexte morpho-dynamique de resserrement de l'espace inter-digue ; le pied de digue y est relativement proche du Rhône ;
- le profil 6 est semblable au profil 5 mais comporte un ouvrage traversant.

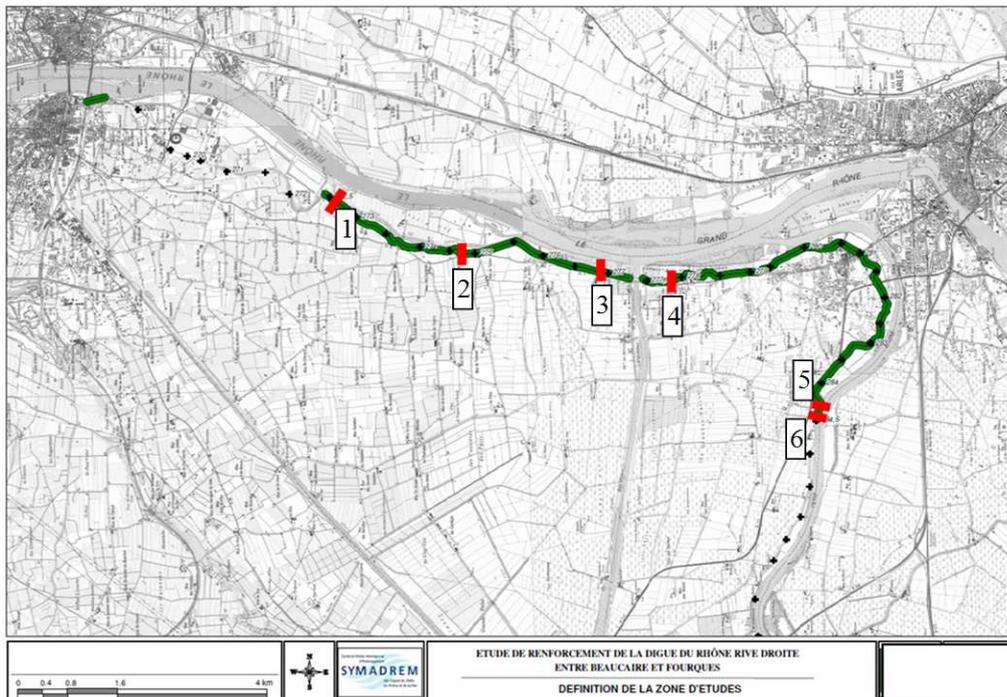


Figure 10-2 : Profils de digues sélectionnés pour la validation du modèle (plan orienté est-ouest)

Le groupe d'ingénieurs intervenant pour la validation du modèle est composé de six ingénieurs senior spécialisés dans le domaine des ouvrages hydrauliques, du génie civil et de la géotechnique.

L'application du modèle d'évaluation de la performance des digues s'est déroulée selon les étapes suivantes :

- remise aux ingénieurs d'un dossier présentant les données disponibles pour chaque profil : informations générales, géométrie, résultats de modélisations hydrauliques, reconnaissances géophysiques et géotechniques ;
- visite in situ des profils de digue par le groupe d'ingénieurs ;
- application du modèle :

- renseignement qualitatif des indicateurs d'état à partir des données obtenues lors de la visite des profils, de l'interprétation des investigations géophysiques et géotechniques conduites lors du diagnostic,
 - évaluation probabiliste des critères par les ingénieurs du comité expertise. Les critères ont été évalués sous format probabiliste selon la démarche présentée dans la partie 3. Les ingénieurs ont élicité par consensus les quantiles 5% et 95%, ainsi que la valeur modale de chaque critère,
 - propagation des incertitudes dans le modèle et exploitation des résultats,
- validation du modèle par comparaison avec les résultats du diagnostic de l'ingénierie.

10.2 Application du modèle pour un profil de l'étude de cas

Nous présentons dans le rapport l'application du modèle sur le profil n°1 de l'étude de cas et pour le mécanisme d'érosion interne. Les applications pour les autres mécanismes et profils ont été traitées mais, pour des raisons de commodités liées à la longueur des développements, ne sont pas présentées dans le mémoire.

10.2.1 Présentation du profil n°1

Le profil n°1 est localisé au PK (point kilométrique) 272,550 (Figure 10-3).



Figure 10-3 : Localisation du profil de digue n°1



Figure 10-4 : Vue du profil de digue n°1

Les caractéristiques du profil n°1 sont les suivantes :

Cote de la digue et des crues de référence (NGF) :

- Cote de la crête : ~ 10,85 m
- Cote TN amont : ~ 8,50 m
- Cote TN aval : ~ 7,00 m
- Cote de la crue de décembre 2003 (11 500 m³/s): ~ 10,50 m
- Cote de la crue de sureté (14 160 m³/s): ~ 10,95 m

Hauteur / largeur/ de la digue en mètre et fruit H/V:

- Hauteur de la digue coté val : 3,40 m
- Hauteur de la digue coté berge : 2,90 m
- Largeur en crête : 7,20 m
- Fruit aval : 1,42 H/V
- Fruit amont : 1,73 H/V

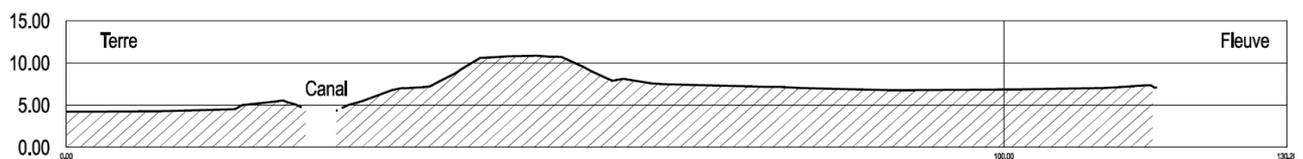


Figure 10-5 : Coupe topographique du profil

Des reconnaissances géophysiques par méthode Slingram et panneaux électriques ont été menées pour l'ensemble du linéaire de digue. Le profil transversal réalisé aux panneaux électriques le plus proche se situe 200 mètres en aval du profil n°1 (Figure 10-6) et donne les résultats suivants :

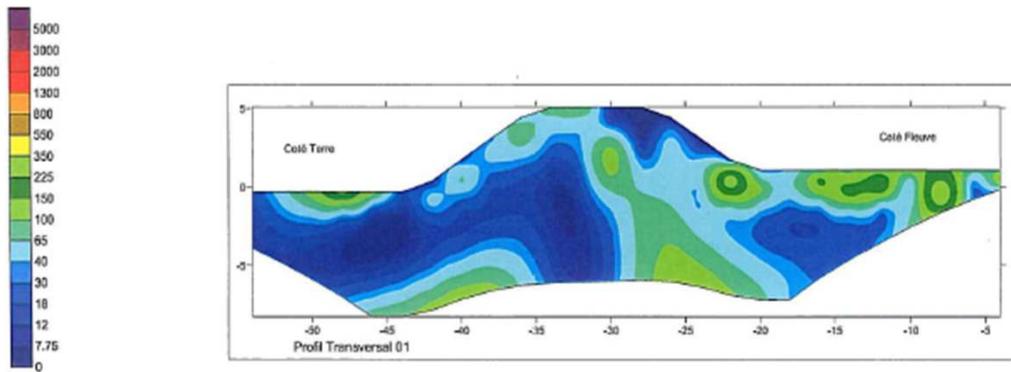


Figure 10-6 : Reconnaissances géophysique de la digue 200 mètres en aval du profil 1

Elles montrent que les valeurs de résistivité des matériaux constitutifs de la digue présentent une grande variabilité expliquée par une variabilité de la disposition des matériaux et/ou une hétérogénéité intrinsèque de la digue.

En ce qui concerne les données géotechniques, les ingénieurs ont extrapolé les résultats de reconnaissances géotechniques effectuées à proximité du profil n°1 (entre 150 mètres et 350 mètres). Celles-ci sont :

- une caractérisation des matériaux en laboratoire à partir du sondage carotté, notamment analyses granulométriques et essais triaxiaux, permettant de préciser que selon la profondeur du sondage, la digue est constituée de silt et de limon ;
- quatre essais de pénétration statique ;
- un sondage carotté complété d'essais d'eau de type Lefranc et Nasberg ;
- un sondage à la tarière ;
- un essai au permeafor ;
- un essai au piezocone et essai de dissipation de pression interstitielle en pied de digue.

10.2.2 Evaluation des critères du profil n°1

Le profil n°1 a été évalué pour une crue d'occurrence millénaire, correspondant à un débit estimé de 14 160 m³/s et une sollicitation des ouvrages de 4 à 5 jours. Nous détaillons l'évaluation des trois critères de l'indicateur de performance associé au mécanisme de rupture par érosion interne du corps de digue : $C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digues-, $C_{2, EI}$ -résistance du corps de digue à l'érosion interne- et $C_{3, EI}$ -singularités dans le corps de digue-.

Le même travail a été produit pour les cinq autres critères relatifs à la fondation et à l'interface digue-fondation (cf. Partie 2, Tableau 6.3).

10.2.2.1 Evaluation du critère $C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digue

Le premier critère évalué est le critère $C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digues, en tenant compte des informations relatives aux indicateurs d'état : « perméabilité du matériau », « géométrie hauteur/largeur », « fuites » et « étanchéité de la protection amont ».

Pour l'indicateur d'état « perméabilité du matériau », les essais Lefranc et Nasberg réalisés au PK 273,400 donnent des valeurs moyennes de $2,3 \cdot 10^{-05}$ m/s (essai Lefranc) et de $4,5 \cdot 10^{-05}$ m/s (modèle de Nasberg).

Les reconnaissances géophysiques et géotechniques indiquent une grande variabilité des matériaux au sein du corps de digue. Les résistances de pointes indiquées par le CPT sont relativement variables (Figure 10-7) passant de moins de 2 MPa à plus de 22 MPa. Les sondages et diagrammes de Robertson ont permis d'établir que la digue était localement constituée d'argiles, de limons et de sables. Les résultats confirment les profils transversaux réalisés aux panneaux électriques (Figure 10-6) et indiquent que la nature des matériaux et leurs positions spatiales présentent une grande variabilité.

Considérant ces éléments et la présence de sables, les ingénieurs ont estimé que l'indicateur d'état « perméabilité du matériau » constitutif de la digue était *médiocre* (cf. Partie 2 Figure 6-10).

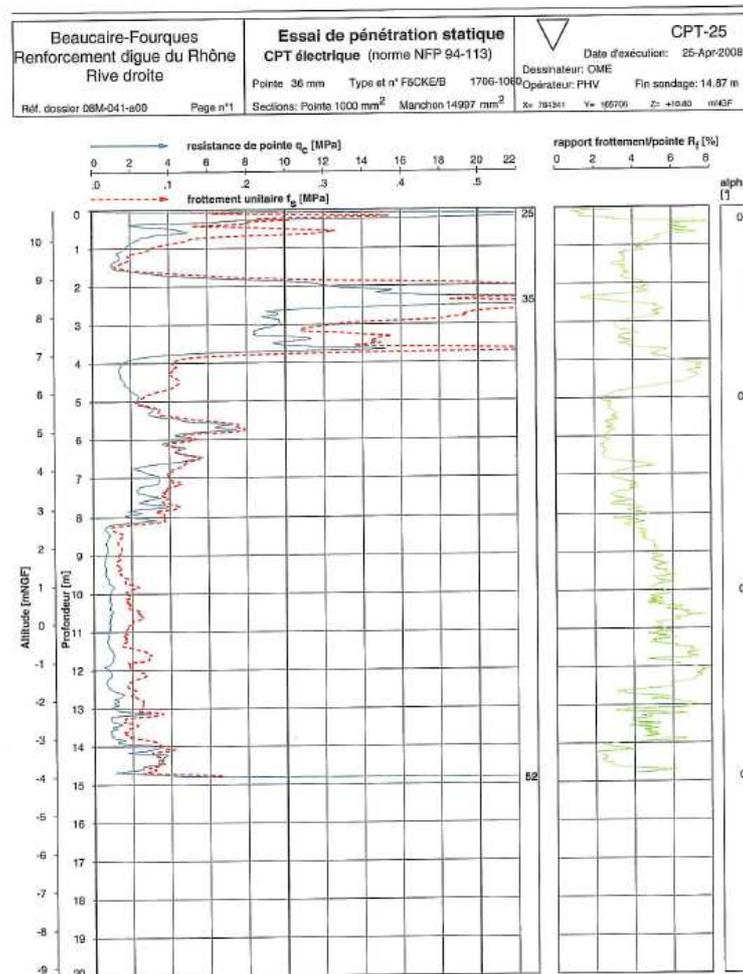


Figure 10-7 : Essais CPT au point kilométrique 272,400

L'indicateur d'état « géométrie hauteur/largeur » du corps de digue, vérifié sur le terrain avec clisimètre et décimètre, apparaît favorable, l'ouvrage étant relativement large. Les ingénieurs évaluent cette situation comme *bonne*.

L'indicateur d'état « fuite » n'a pu être renseigné, aucune fuite n'ayant été localement rapportée en période de crue. L'indicateur d'état « étanchéité de la protection amont » a été

renseigné comme *inexistant*, la digue ne présentant pas de protection amont susceptible de limiter les infiltrations d'eau dans le remblai.

Compte tenu de ces éléments et de l'appréciation qualitative des indicateurs d'état, les ingénieurs ont évalué le critère $C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digue comme vraisemblablement compris entre *médiocre* et *bon* (cf. Partie 2, Figure 6-12) et ont ainsi élicité les valeurs 5 et 9 pour les quantiles 5% et 95%. Ils ont ensuite élicité la valeur 7 pour le mode, correspondant à un état *tolérable* (Figure 10-8).

10.2.2.2 Evaluation du critère $C_{2, EI}$ -résistance du corps de digue à l'érosion interne

Le second critère est $C_{1, EI}$ -résistance du corps de digue à l'érosion interne, évalué selon les indicateurs d'état : « composition du remblai », « discontinuités du remblai », « gradient critique », « durée de la crue », « fontis » et « fuites chargées ».

Nous avons déjà vu qu'aucune fuite n'a été rapportée lors de crue. L'indicateur d'état « fuites chargées » n'a donc pas pu être renseigné. L'inspection visuelle des ouvrages permet d'établir qu'il n'y a pas de fontis sur la digue et les ingénieurs ont évalué l'indicateur d'état « fontis » comme *bon*. Tenant compte de la variabilité de la granulométrie des matériaux constitutifs du corps de digue comprenant des sables et des argiles, les ingénieurs ont évalué l'indicateur d'état « composition du remblai » comme allant de *mauvais* à *tolérable*. En revanche, la digue ne comprend pas de discontinuités et les ingénieurs ont évalué l'indicateur d'état « discontinuité du remblai » comme *bon*.

Les ingénieurs ont considéré que la nature et la variabilité des matériaux rendaient l'évaluation de la vulnérabilité de la digue à l'érosion interne délicate. A priori peu favorable, la vulnérabilité du corps de digue à l'érosion interne peut être néanmoins aggravée par la présence simultanée de sables et d'argiles. Les ingénieurs ont évalué le critère $C_{2, EI}$ -résistance du corps de digue à l'érosion interne comme vraisemblablement compris entre *mauvais* à *bon* et ont ainsi élicité les valeurs 3 et 8 pour les quantiles 5% et 95%. Ils ont ensuite élicité 6 pour la valeur modale, correspondant à un état *tolérable*.

10.2.2.3 Evaluation du critère $C_{3, EI}$ -singularités dans le corps de digue

Le troisième critère est $C_{3, EI}$ -singularité dans le corps de digue, évalué selon les indicateurs d'état « arbres/racines », « terriers », « ouvrages traversant » et « contact entre le corps de digue et les ouvrages traversants ». Constatant que le corps de digue présentait un enherbement régulier bien entretenu, ne comportait ni arbres, ni terrier, ni ouvrages traversants susceptibles de favoriser les phénomènes d'érosion interne, les ingénieurs ont renseigné ces quatre indicateurs d'état comme *bon*. La quasi-certitude d'absence de singularités menaçant la sécurité de la digue a conduit les ingénieurs à évaluer le critère comme vraisemblablement *bon* et ont ainsi élicité les valeurs 8 et 10 pour les quantiles 5% et 95%. Ils ont ensuite élicité 9 pour la valeur modale, correspondant à un état *bon*.

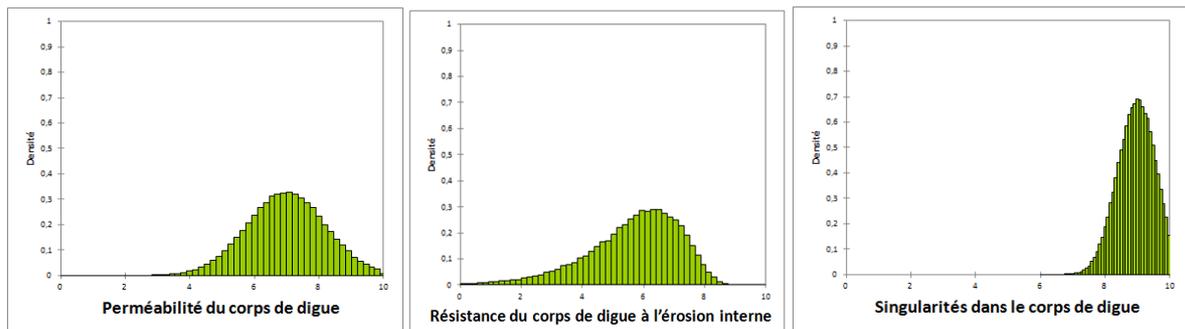


Figure 10-8 : Ajustement de lois normales et log normale miroir tronquées aux critères du mécanisme d'érosion interne relatifs au corps de digue

10.2.2.4 Calcul de la performance du profil

Une fois tous les critères évalués, la distribution de l'indicateur de performance au niveau du profil étudié est obtenue par simulations de Monte-Carlo (Figure 10-9).

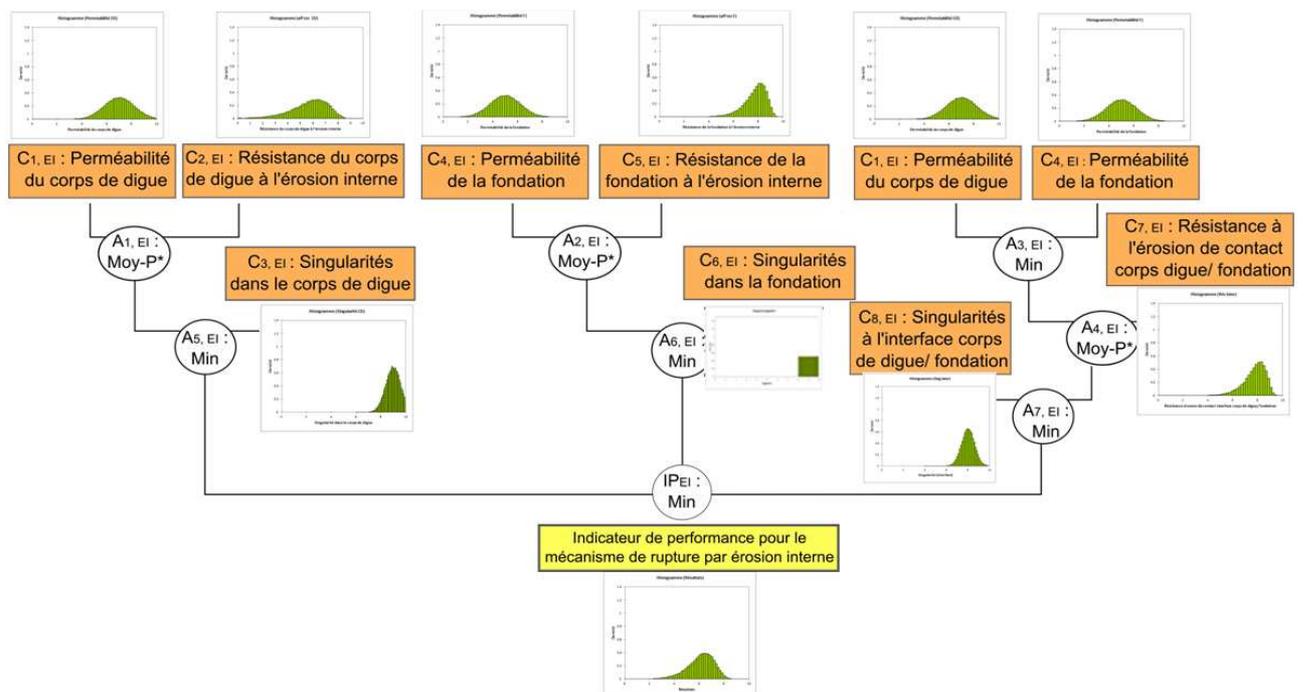


Figure 10-9 : Propagation des incertitudes des critères par simulations de Monte Carlo pour l'indicateur de performance érosion interne

Nous identifions ensuite les quantiles 5% et 95%, ainsi que le mode de la distribution (Figure 10-10).

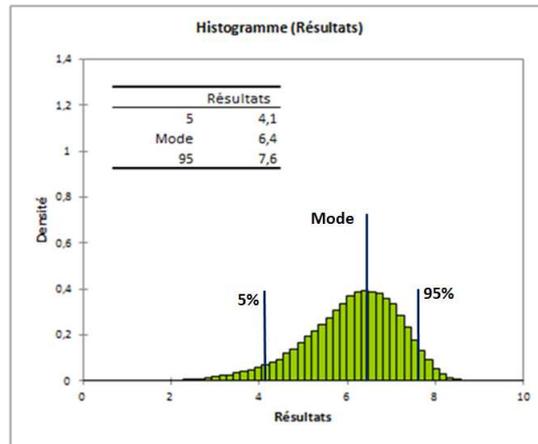


Figure 10-10 : Distribution empirique de l'indicateur de performance pour le mécanisme d'érosion interne

Les résultats obtenus pour le profil n°1 (Figure 10-10) montrent que, la performance du profil de digue vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne est vraisemblablement comprise entre *médiocre* et *bon*, avec les valeurs 4,1 et 7,6 pour les quantiles 5% et 95%, et que son niveau le plus vraisemblable est *tolérable*, avec une valeur de 6,4 pour le mode. Ce résultat, au premier abord satisfaisant, doit être nuancé par une incertitude importante.

10.3 Comparaison des résultats du modèle à l'étude de diagnostic

10.3.1 Démarche de comparaison

Selon la même démarche que présenté pour le profil n°1, les ingénieurs ont évalué les critères des six profils de digues pour l'ensemble des mécanismes de rupture. Les résultats obtenus par le modèle probabiliste d'évaluation de la performance ont été comparés aux conclusions de l'étude diagnostic de l'ingénierie.

L'évaluation réalisée par l'étude diagnostic est une évaluation des risques de rupture de la digue vis-à-vis des différents mécanismes et non une évaluation de la performance de la digue. Nous avons donc du établir une correspondance entre l'échelle utilisée par le bureau d'études et l'échelle proposée pour l'évaluation de la performance des digues (Tableau 10-1).

Echelle utilisée	Performance	Etude ingénierie
Inexistant	0	Rupture quasi certaine
	1	Risque très fort
Mauvais	2	Risque fort
	3	
Médiocre	4	Risque moyen
	5	
Tolérable	6	Risque faible
	7	
Bon	8	Risque très faible
	9	
	10	Risque nul

Tableau 10-1 : Correspondance entre l'échelle proposée dans notre étude et l'échelle utilisée dans l'étude diagnostic de l'ingénierie

Même si le vocabulaire diffère, nous remarquons que le risque de rupture mentionné par l'étude est assimilable au niveau de performance de l'ouvrage.

10.3.2 Comparaison pour le mécanisme d'érosion interne

Un extrait de la comparaison réalisée est présenté ci-dessous pour le mécanisme d'érosion interne (Tableau 10-2). L'analyse des résultats amène les éléments suivants :

- le modèle probabiliste d'évaluation de la performance montre les mêmes tendances et variations que les résultats issus du diagnostic de l'ingénierie ;
- en valeur absolue, les résultats issus du diagnostic de l'ingénierie se situent autour du quantile 5% de la distribution de l'indicateur de performance calculé par le modèle probabiliste. Cela indique que la pratique déterministe adopte une évaluation « prudente » des ouvrages se situant statistiquement autour du quantile 5%.

Seul le profil n°2 nuance ce constat. Il correspond à une ancienne brèche rebouchée. Les discontinuités possibles ont incité les ingénieurs à être plus prudents que l'étude diagnostic et les résultats du modèle présentent une dispersion plus importante vers les valeurs basses.

Profil de digue	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4	Profil 6
Résultats du modèle pour le mécanisme de rupture par érosion interne					
	5% Mode 95%				
	4,1 6,4 7,6	1,8 5 6,4	4,7 5,8 6,7	4,3 5,9 7	4,4 6,4 7,3
Résultats étude diagnostic	Risque moyen, indicateur de performance compris dans [4-5]	Risque moyen, indicateur de performance compris dans [4-5]	Risque moyen, indicateur de performance compris dans [4-5]	Risque moyen, indicateur de performance compris dans [4-5]	Risque moyen, indicateur de performance compris dans [4-5]

Tableau 10-2 : Comparaison des résultats du modèle et de l'étude pour le mécanisme de rupture par érosion interne

10.3.3 Généralisation et validation du modèle

Nous présentons ici succinctement la comparaison entre les résultats du modèle et de l'étude diagnostic pour les indicateurs de performance des mécanismes de rupture par glissement aval, surverse et affouillement. L'étude diagnostic ne prend pas en compte le risque de rupture par glissement amont et l'indicateur de performance relatif à ce mécanisme n'a donc pas pu être comparé.

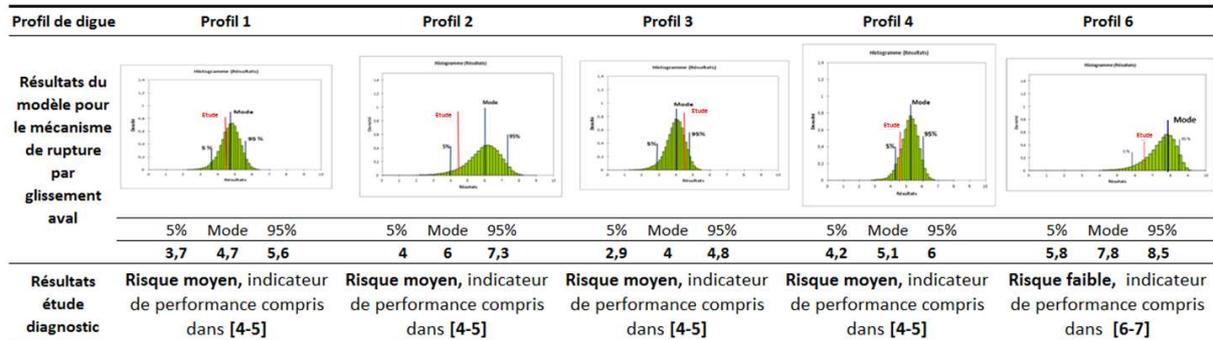


Figure 10-11 : Comparaison des résultats du modèle et de l'étude pour le mécanisme de rupture par glissement aval

Les résultats obtenus pour le mécanisme de rupture par glissement aval sont sensiblement les mêmes que pour l'érosion interne (Figure 10-11). Si les résultats de l'étude diagnostic sont parfois plus près de la valeur modale (cas du profil 1), ou du quantile 95% (cas du profil 3), nous remarquons qu'ils demeurent contenus dans l'intervalle d'incertitude des résultats du modèle et qu'il n'y a donc pas de contradiction entre les deux.

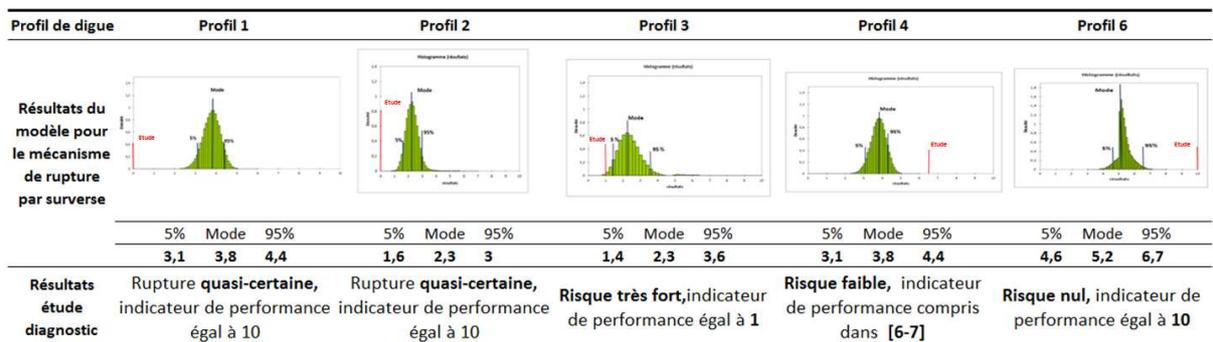


Figure 10-12 : Comparaison des résultats du modèle et de l'étude pour le mécanisme de rupture par surverse

Les résultats obtenus pour le mécanisme de rupture par surverse présentent des divergences avec l'étude diagnostic (Figure 10-12). Les raisons sont liées au fait que les évaluations de l'étude diagnostic correspondent à des profils plus défavorables que ceux pour lesquels les ingénieurs se sont prononcés (cas des profils 1 et 2) et ne sont donc pas comparables. Pour les profils 4 et 6, les ingénieurs sont en désaccord avec l'étude et assument un choix plus pessimiste.

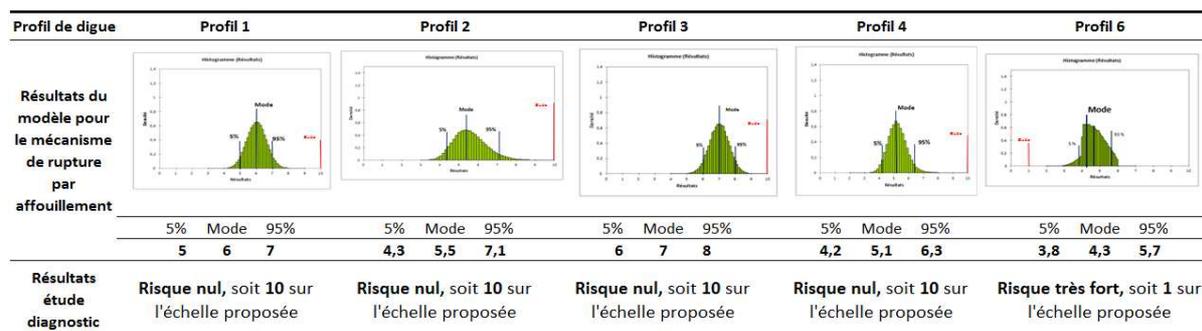


Figure 10-13 : Comparaison des résultats du modèle et de l'étude pour le mécanisme de rupture par affouillement

Les résultats obtenus pour le mécanisme de rupture par affouillement présentent des divergences importantes avec l'étude diagnostic (Figure 10-13). Ces divergences découlent principalement de différences d'interprétation, du contexte morpo-dynamique et de l'impact possible de chocs d'embâcles, entre le groupe d'ingénieurs et l'étude diagnostic. Le groupe d'ingénieur a considéré possible la présence de corps flottants susceptibles d'endommager la digue.

10.4 Synthèse

Nous avons mis en œuvre le modèle d'évaluation de la performance des digues sur des profils transversaux représentatifs de tronçons de digues homogènes, pour lesquels nous disposons d'informations abondantes et d'un diagnostic complet récent. Les données collectées et rassemblées lors de l'étude ont été exploitées comme données sources pour l'élicitation des lois de probabilités des critères des digues de chaque profil. Des distributions de performance ont pu être obtenues pour chaque mécanisme, ce qui permet de dégager les quantiles 5%, 95%, et le mode pour chaque indicateur de performance.

La comparaison des résultats du modèle avec ceux du diagnostic classique de l'ingénierie montre une concordance des évaluations de performance pour les mécanismes d'érosion interne et de glissement aval. Pour les mécanismes de surverse et d'affouillement, les résultats présentent des divergences, expliquées par le choix des profils, pour le mécanisme de surverse, et à une différence d'interprétation des contextes hydrauliques et morpho-dynamique, pour le mécanisme d'affouillement. Au final, ce travail permet de valider le modèle sur les pratiques de l'ingénierie

Toutefois le modèle proposé apporte plusieurs avantages supplémentaires par rapport à la pratique de l'ingénierie, car il permet de rendre compte de l'incertitude des évaluations de performance en fonction des incertitudes des données utilisées pour l'évaluation des digues. Cet avantage permet d'apprécier la robustesse d'une évaluation et les facteurs explicatifs des incertitudes. Cela peut conduire à approfondir les investigations sur les critères contribuant le plus à l'incertitude de la performance de l'ouvrage.

Chapitre 11 Valorisation : application dans le cadre d'une étude diagnostic opérationnelle

Dans le cadre de nos recherches, nous avons confronté le modèle probabiliste d'évaluation de performance des digues à une situation d'étude opérationnelle. Cette étude est un linéaire de digue disposé le long d'une rivière torrentielle des Alpes du sud. L'application du modèle a été menée dans le cadre d'une étude de diagnostic de la digue, objet d'un marché public.

A l'opposé de l'étude de cas précédente, nous ne disposons pour cette digue que de peu de données. Dans ce contexte, l'application permet d'apprécier l'utilité du modèle pour l'identification et la priorisation des investigations complémentaires à mener.

Nous présentons successivement le linéaire de digue sélectionné, la démarche d'application du modèle, l'identification de tronçons homogènes, l'évaluation d'un tronçon pour le mécanisme d'affouillement, puis les résultats obtenus, pour le tronçon et pour l'ensemble du linéaire.

11.1 Présentation de la digue et démarche d'application du modèle

11.1.1 Présentation de l'ouvrage

Situé dans les Alpes du sud, l'ouvrage a été construit au XVIII^{ème}, afin de gagner des terres agricoles nouvelles, dans le lit d'une rivière torrentielle alors en tresses. Le linéaire objet de notre application représente près de 1400 mètres (Figure 11-1).

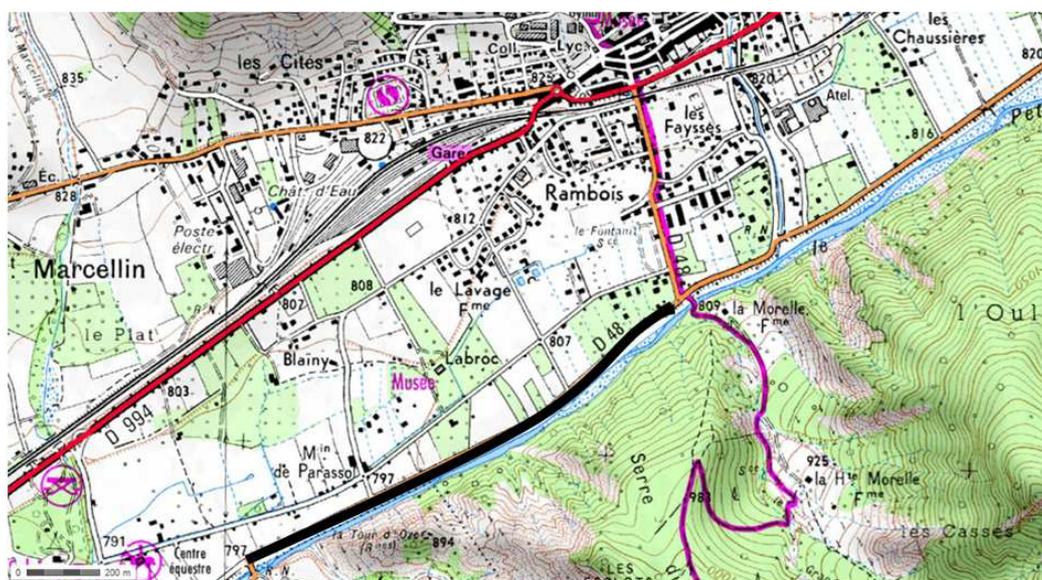


Figure 11-1 : Localisation de la digue cas d'étude

La digue possède un profil semblable aux ouvrages de rivières torrentielles des Hautes-Alpes construits aux XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles (Figure 11-2). Elle présente un talus côté rivière

relativement raide, protégé par un perré de pierres maçonnées, le pied du perré étant ancré sous le lit de la rivière et recouvert d'enrochements anti-affouillement.

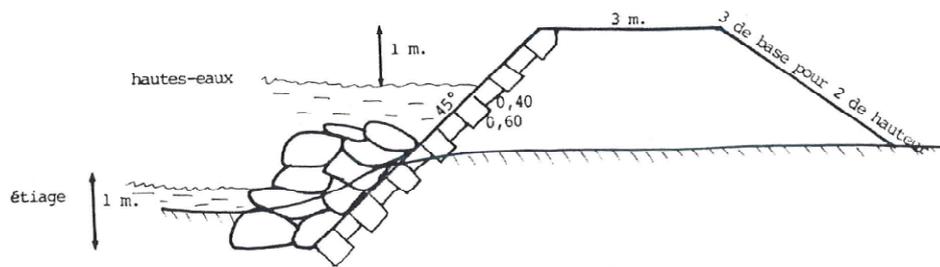


Figure 11-2: Profil type des digues de rivière torrentielle construites dans le secteur (Gauthier, 1992)

Au cours du XX^{ème} siècle, l'entretien de la digue a été relativement négligé et ses talus ont été largement envahis par la végétation. La crête de l'ouvrage a été goudronnée et est devenue une route départementale. Localement les talus ont été engraisés pour l'élargissement de la route (côté zone protégée) ou par des dépôts de déblais et/ou gravats (côté rivière). Localement un petit canal d'irrigation suit le pied de digue côté zone protégée.



Figure 11-3 : Section courante de la digue, route départementale en crête et végétation importante sur le talus côté rivière (gauche de la photo)

Nous remarquons que le contexte morpho-dynamique a une grande importance dans le diagnostic de l'ouvrage. Des extractions de matériaux dans les lits mineurs de la rivière et de ses affluents ont provoqué un important encaissement du lit au droit de l'ouvrage, augmentant la section d'écoulement des eaux de crues, mais menaçant à terme de déstabiliser les pieds d'ouvrages. La diminution récente de ces extractions conduit aujourd'hui à un exhaussement (encore limité) du lit de la rivière, susceptible à terme d'augmenter la hauteur des crues.

11.1.2 Démarche d'application du modèle d'évaluation de la performance des digues

Notre démarche comprend les étapes suivantes :

- 1) recueil et analyse de la documentation disponible sur la digue et visite de l'ouvrage par le groupe d'ingénieurs. Cette étape permet de déterminer les données disponibles : informations générales, géométrie, comptes rendus d'inspections visuelles, modélisations hydrauliques, observations ponctuelles de l'état des protections de la digue ;
- 2) identification des tronçons de digue homogènes par caractérisation du linéaire selon les indicateurs d'état définis dans le modèle d'évaluation de la performance des digues ;
- 3) mise en œuvre du modèle : évaluation probabiliste des critères d'évaluation des digues, détermination des distributions de probabilité pour les indicateurs de performance des tronçons homogènes et représentation graphique des indicateurs de performance des digues tout au long du linéaire.

Nous présentons ci-après les étapes 1 et 2. L'étape 3 est présentée de façon complète sur un seul tronçon et les résultats d'évaluation de la performance pour l'ensemble du linéaire.

11.1.3 Documentation disponible sur la digue

Les documents disponibles exploités pour l'identification des tronçons homogènes et le renseignement des critères sont les suivants :

- des investigations relatives à un diagnostic succinct de la digue réalisé en 2002, contenant notamment des sondages ponctuels menés à la pelle mécanique sur le talus de digue côté rivière destinés mettre à jour et évaluer l'état du perré, une inspection visuelle des ouvrages décrivant notamment l'état des enrochements de pied de digue, une comparaison de la topographie des ouvrages avec la modélisation de la crue d'occurrence centennale ;
- des résultats de sondages : caractérisation des matériaux et tests de perméabilité récents, réalisés sur parties des linéaires en amont et en aval du tronçon cas d'étude ;
- des documents historiques ;

Nous avons par ailleurs conduit une inspection visuelle complète de la digue sur tout le linéaire.

11.1.4 Identification de tronçons homogènes

Nous avons identifié des tronçons homogènes en caractérisant les sections de linéaire présentant des caractéristiques identiques pour les indicateurs d'état (cf. Partie 2, §6.6). Cela permet ensuite de découper le linéaire en tronçons homogènes pour l'évaluation de chaque critère.

Le linéaire est construit d'un seul tenant : il n'y a pas de brèche connue sur cette portion de linéaire ni de travaux de confortement récent. De fait, les indicateurs d'état relatifs à la constitution de l'ouvrage (« perméabilité du matériau », « caractérisation mécanique des sols », etc.) n'interviennent pas. Les indicateurs d'état déterminant le découpage du linéaire en tronçons homogènes sont les suivants : « géométrie hauteur/largeur », « profil en long de la crête de digue », « hauteur de la crue », « type de la protection du corps de digue », « état de

la protection du corps de digue », « type de protection de la fondation », « état de la protection de la fondation », « fontis » et « ouvrage traversant ».

De cette manière, nous avons identifié quatre tronçons homogènes et deux profils singuliers (Figure 11-4) :

- le tronçon n°1 est représentatif du profil courant de la digue. Il se caractérise par :
 - l'indicateur d'état « géométrie hauteur/largeur », qui le décrit comme un profil classique des digues de torrent des Alpes du sud (Figure 11-3),
 - les indicateurs d'état « profil en long de la crête de digue » et « hauteur de la crue », qui permettent de calculer sa revanche sur la crue centennale à 20 cm,
 - les indicateurs d'état « type de protection du corps de digue » et « type de protection de la fondation » sont considérés comme satisfaisant, pour le corps de digue et pour la fondation,
 - les indicateurs d'état « état de la protection du corps de digue » et « état de la protection de la fondation », décrivent les protections comme dans un état a priori acceptable mais présentant une végétation importante,
- le tronçon n°2 est caractérisé par :
 - l'indicateur d'état « géométrie hauteur/largeur » le décrit comme correspond au profil classique des digues de torrent des Alpes du sud (Figure 11-3),
 - les indicateurs d'état « profil en long de la crête de digue » et « hauteur de la crue », qui permettent de calculer sa revanche sur la crue centennale à 83 cm,
 - les indicateurs d'état « type de protection du corps de digue » et « type de protection de la fondation » sont considérés comme satisfaisants pour le corps de digue, moins pour la fondation,
 - les indicateurs d'état « état de la protection du corps de digue » et « état de la protection de la fondation », décrivent les protections comme dans un état a priori acceptable mais présentant une végétation importante,
- le tronçon n°2P1 est un profil ponctuel sur le tronçon n°2 correspondant à la présence d'un fontis :
 - les indicateurs d'état sont identiques au tronçon n°2 à l'exception de l'indicateur d'état « fontis », pris en compte pour les critères $C_{5, EI}$ -résistance à l'érosion interne de la fondation et $C_{2, EI}$ -résistance à l'érosion interne du corps de digue, tous deux constitutifs de l'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne ;
- le tronçon n°3 est caractérisé par :
 - l'indicateur d'état « géométrie hauteur/largeur », qui le décrit comme un profil classique des digues de torrent des Alpes du sud (Figure 11-3),
 - les indicateurs d'état « profil en long de la crête de digue » et « hauteur de la crue », qui permettent de calculer sa revanche sur la crue centennale à 72 cm,
 - les indicateurs d'état « type de protection du corps de digue » et « type de protection de la fondation » sont considérés comme satisfaisants pour le corps de digue, moins pour la fondation,

- les indicateurs d'état « état de la protection du corps de digue » et « état de la protection de la fondation », décrivent les protections comme dans un état a priori acceptable mais présentant une végétation importante,
- le tronçon n°3P1 est un profil ponctuel sur le tronçon n°3 correspondant à la présence d'une conduite traversante bétonnée pour l'évacuation des eaux vers la rivière.
 - ses indicateurs d'état sont les mêmes que pour le tronçon n°3 à l'exception de les indicateurs d'état « ouvrages traversants » et « contact entre le corps de digue et l'ouvrage traversant », qui interviennent pour le renseignement du critère C_{3, EI} - singularités dans le corps de digue ;
- le tronçon n°4 est caractérisé par :
 - l'indicateur d'état « géométrie hauteur/largeur », qui le décrit comme élargi par rapport au profil classique des digues de torrent des Alpes du sud (Figure 11-3), le talus côté rivière a été fortement engraisé (Figure 11-5),
 - les indicateurs d'état « profil en long de la crête de digue » et « hauteur de la crue », qui permettent de calculer sa revanche sur la crue centennale à 46 cm,
 - les indicateurs d'état « type de protection » et « état de la protection », considérés comme satisfaisant pour le corps de digue et pour la fondation.



Figure 11-4 : Tronçons homogènes identifiés pour le linéaire de digue cas d'étude

11.2 Application pour le tronçon n°4

11.2.1 Présentation du tronçon n°4

Le tronçon n°4 est caractérisé par un profil transversal large consécutif à un fort engraissement du talus côté cours d'eau réalisé par des déblais disposés a priori sans moyens de compaction (Figure 11-5).

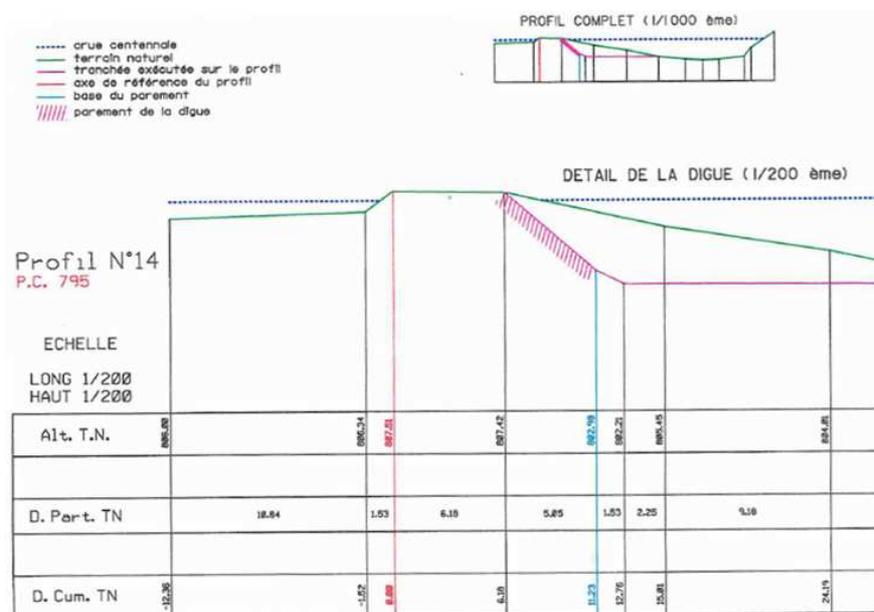


Figure 11-5 : Profil du tronçon n°4 (en vert), tranchée effectuée lors de sondage et perré mis à jour (en rose)

Par ailleurs, une importante végétation recouvre l'ensemble du talus amont (Figure 11-6) et il n'est pas possible d'observer directement l'état des protections, décrit comme satisfaisant lors des sondages à la pelle mécanique. Il reste néanmoins vraisemblable que des racines d'arbres aient pu localement les dégrader.



Figure 11-6 : Vue générale du tronçon n°4

Pour caractériser la constitution de la digue, les sondages réalisés sur les linéaires aval et amont ont été exploités dans la mesure où il semble que ces linéaires soient de constitution identique aux tronçons n°4. Toutefois, la représentativité de ces sondages pour le tronçon n°4 présente des incertitudes.

L'analyse des sondages indique que le linéaire est constitué majoritairement de graves sablo-limoneuses. Les graves sont, dans l'ensemble, peu compactes et contiennent une faible proportion de fines. Les sondages n'ont pu être réalisés à grandes profondeurs, le rapport géotechnique mentionnant que la fondation semble présenter des matériaux plus sableux. Les

essais de perméabilité réalisés en amont et en aval de la digue ont donné des résultats de $k \sim 10^{-3}$ m/s à 10^{-5} m/s, selon la localisation de l'essai.

11.2.2 *Evaluation des critères pour le mécanisme de rupture par affouillement*

Pour les digues de rivières torrentielles, le mécanisme d'affouillement est généralement admis comme le plus préjudiciable. Nous présentons ici l'élicitation des quatre critères intervenant dans ce mécanisme :

- $C_{1, AF}$ -résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau ;
- $C_{2, AF}$ -résistance à l'érosion externe du corps de digue ;
- $C_{3, AF}$ -résistance à l'affouillement de la protection de la fondation ;
- $C_{4, AF}$ -résistance à l'affouillement de la fondation.

11.2.2.1 *Evaluation du critère $C_{1, AF}$ -résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau*

Pour le critère $C_{1, AF}$ -résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau, les indicateurs d'état intervenant dans l'élicitation sont : « type de protection du corps de digue », « état de la protection du corps de digue », « vitesse locale d'écoulement » et « embâcles érosifs ».

La protection du corps de digue est constituée d'un perré recouvert de terre végétale où l'on trouve des arbres et arbustes. Des sondages effectués en 2003 ont permis de mettre à jour le perré localement et indiquent que son état est satisfaisant. Nous remarquons la présence de grands arbres dont il est possible que les racines aient localement dégradé le perré. Dans ce contexte, la chute d'un arbre est susceptible d'entraîner une partie de l'ouvrage.

Dans ces conditions, les ingénieurs ont estimé l'indicateur d'état « type de protection du corps de digue » comme *bon*, alors que l'indicateur d'état « état de la protection du corps de digue », présentant une incertitude importante, allant de *médiocre* à *tolérable*. Les indicateurs d'état « vitesse locale d'écoulement » et « embâcles érosifs » ont été considérés comme *médiocres*.

Les ingénieurs ont évalué le critère $C_{1, AF}$ -résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau comme pouvant aller de *médiocre* à *tolérable*. Ils ont élicité les valeurs des quantiles 5% et 95% comme étant respectivement de 4 et 7, et la valeur modale comme étant 6 (Figure 11-7).

11.2.2.2 *Évaluation du critère $C_{2, AF}$ -résistance à l'érosion externe du corps de digue*

Pour le critère $C_{2, AF}$ -résistance à l'érosion externe du corps de digue, intervenant dans l'élicitation sont : « vitesse locale d'écoulement », « embâcles érosifs », « résistance mécanique du remblai » et « avancement de l'érosion du corps de digue ».

Les deux premiers ont déjà été évalués ci-dessus (cf. §11.2.2.1), tandis que l'indicateur d'état « résistance mécanique du remblai » a été évalué comme *mauvais*. Si le perré vient à disparaître lors d'une crue, le remblai ne devrait pas tenir longtemps. L'indicateur d'état

« avancement de l'érosion du corps de digue » a été évalué comme *bon*, puisque le corps de digue, protégé par le perré, ne présente pas de signe d'érosion.

Les ingénieurs ont évalué le critère $C_{2, AF}$ -résistance à l'érosion externe du corps de digue- comme pouvant aller de *mauvais* à *tolérable*. Ils ont élicité les valeurs des quantiles 5% et 95% comme étant respectivement de 3 et 6, et la valeur modale comme étant 5 (Figure 11-7).

11.2.2.3 Évaluation du critère $C_{3, AF}$ -résistance à l'affouillement de la protection de la fondation-

Pour le critère $C_{3, AF}$ -résistance à l'affouillement de la protection de la fondation, les indicateurs d'état intervenant dans l'élicitation sont : « vitesse locale d'écoulement », « embâcles érosifs », « type de protection de la fondation », « état de la protection de la fondation » et « contexte morpho-dynamique tendance du cours d'eau ».

Les deux premiers indicateurs d'état : « vitesse locale d'écoulement » et « embâcles érosifs », ont été évalués de la même manière que pour le corps de digue.

Les indicateurs d'état « type de protection » et « état de la protection » n'ont pu être appréciés directement par les ingénieurs compte tenu du fort engraissement du talus par de la terre végétale et vraisemblablement des dépôts alluvionnaires. Les protections de la fondation ont été jugées comme satisfaisantes lors des sondages et observations réalisés en 2003. La présence d'une importante végétation sur ces dépôts indique qu'ils n'ont *a priori* pas connu de sollicitations dues au contexte morpho-dynamique depuis lors. Cependant, compte tenu de la possible chute d'un arbre entraînant les protections de la digue, les ingénieurs ont évalué ces indicateurs d'état, avec une relative incertitude, comme allant de *médiocre* à *bon*.

Compte tenu de l'incertitude entourant l'exhaussement du lit du cours d'eau escompté, les ingénieurs ont évalué l'indicateur d'état « contexte morpho-dynamique tendance du cours d'eau » comme allant de *médiocre* à *tolérable*.

Compte tenu de l'appréciation qualitative des indicateurs d'état, les ingénieurs ont évalué le critère $C_{3, AF}$ -résistance à l'affouillement de la protection de la fondation du profil n°4 comme allant de potentiellement *médiocre* à *bon* et ont ainsi élicité les valeurs 5 et 8 pour les quantiles 5% et 95%. Ils ont ensuite élicité la valeur 7 comme valeur modale, correspondant à un état *tolérable* (Figure 11-7).

11.2.2.4 Évaluation du critère $C_{4, AF}$ -résistance à l'affouillement de la fondation-

L'évaluation du critère $C_{4, AF}$ -résistance à l'affouillement de la fondation- est basée sur les indicateurs d'état : « vitesse locale d'écoulement », « embâcles érosifs », « résistance mécanique du sol » et « avancement de l'érosion de la fondation ».

Les deux premiers indicateurs d'état ont déjà été évalués précédemment (cf. §11.2.2.1), tandis que l'indicateur d'état « résistance mécanique du remblai de la fondation » a été évalué comme *mauvais*. Si les protections de la fondation viennent à disparaître lors d'une crue, le remblai ne devrait pas tenir longtemps. L'indicateur d'état « avancement de l'érosion de la fondation » a été évalué comme *bon*, puisque la fondation, protégée par le perré et des enrochements, ne présente pas de signe d'érosion direct.

Les ingénieurs ont évalué $C_{4, AF}$ -résistance à l'affouillement de la fondation comme allant de potentiellement *mauvais* à *tolérable* et ont ainsi élicité les valeurs 3 et 6 pour les quantiles 5% et 95%. Ils ont ensuite élicité la valeur 5 comme valeur modale, correspondant à un état *médiocre* (Figure 11-7).

La Figure 11-7 présente l'ajustement de loi de probabilité aux paramètres élicités par les ingénieurs pour l'évaluation des critères de l'indicateur de performance pour le mécanisme de rupture par affouillement.

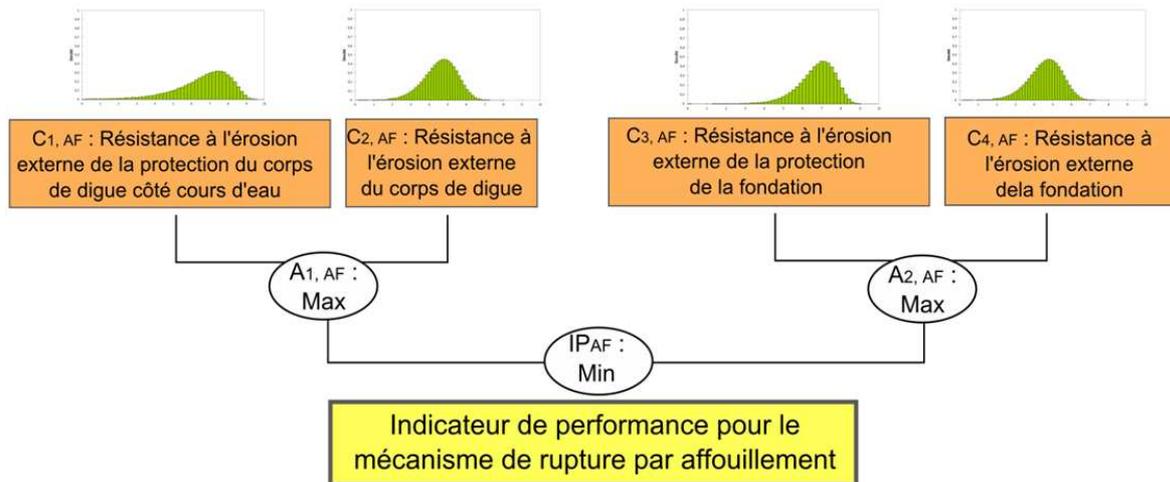


Figure 11-7 : Lois modalisant les critères du tronçon n°4 pour le mécanisme de rupture par affouillement

11.3 Résultats et discussion

11.3.1 Résultats pour le tronçon n°4

Nous avons mis en œuvre le modèle d'évaluation de la performance des digues pour l'ensemble des mécanismes de rupture et sur les quatre tronçons et les deux profils ponctuels de l'étude de cas. Nous présentons ci-dessous les résultats relatifs au tronçon n°4 (Figure 11-8).

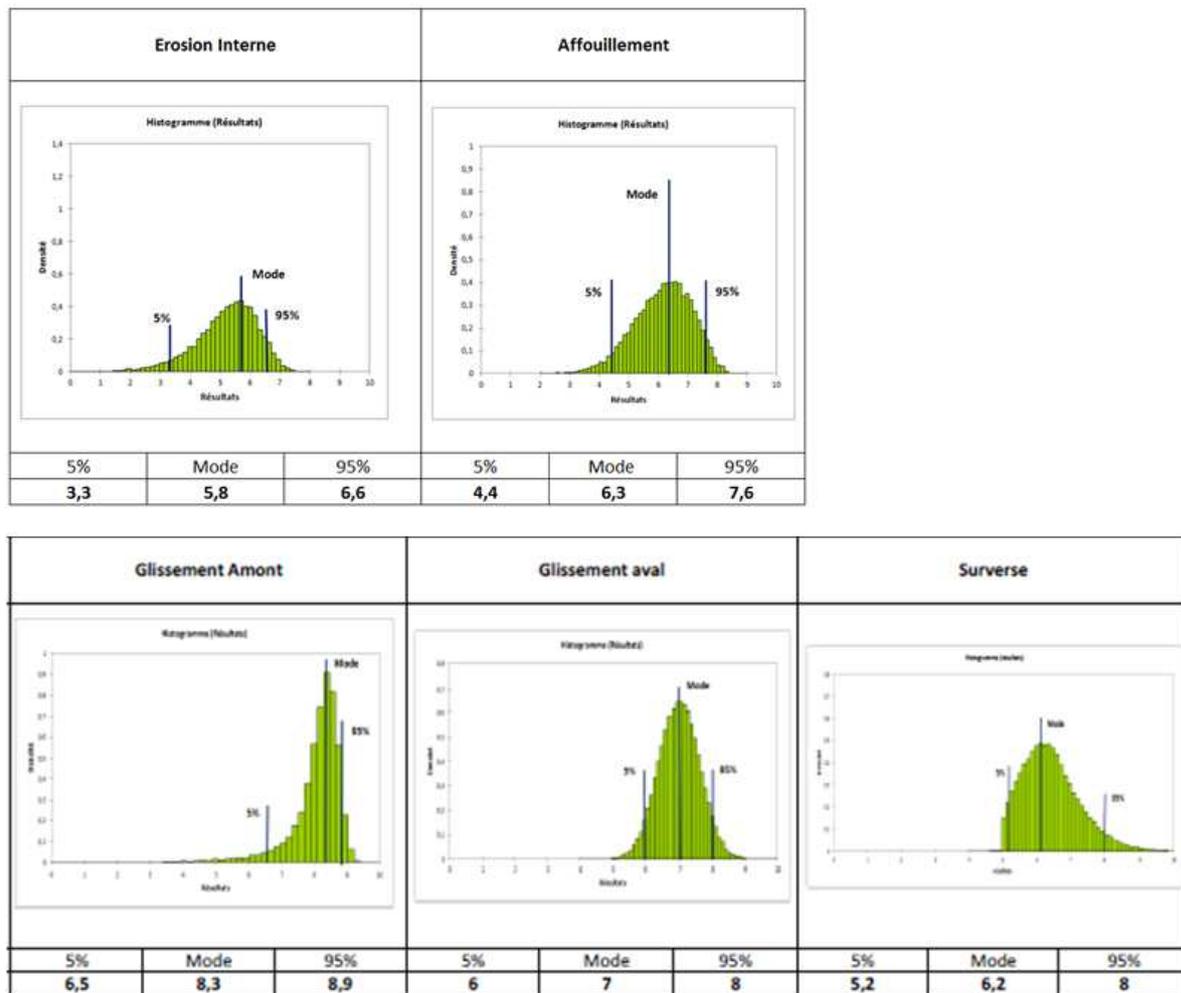


Figure 11-8 : Résultats des indicateurs de performance du tronçon n°4

Les résultats montrent que le tronçon n°4 obtient des indicateurs de performance variés selon les mécanismes :

- *tolérable* à *bon* pour les indicateurs de performance des mécanismes de glissement amont et de glissement aval, les quantiles 5% et 95% de leurs résultats correspondant respectivement aux valeurs 6,5 et 8,9 pour le glissement amont, 6 et 8 pour le glissement aval. Les valeurs obtenues respectivement pour leurs modes sont de 8,3 et 7 ;
- *médiocre* à *tolérable* pour les indicateurs de performance des mécanismes de surverse et d'affouillement, les quantiles 5% et 95% de leurs résultats correspondant respectivement aux valeurs 5,2 et 8 pour le mécanisme de surverse, 4,4 et 7,6 pour le mécanisme d'affouillement. Les valeurs obtenues respectivement pour leurs modes sont de 6,2 et 6,3 ;
- *mauvais* à *tolérable* pour l'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne, les quantiles 5% et 95% de ses résultats correspondent aux valeurs 3,3 et 6,6, tandis que le mode obtenu est de 5,8.

Les indicateurs de performance des mécanismes de glissement amont et de glissement aval sont tous deux satisfaisants, avec une incertitude relativement faible. Nous estimons que ces mécanismes de rupture ne présentent pas ou peu de risques pour la sécurité de digue.

L'indicateur de performance du mécanisme de surverse présente des résultats plus mitigés, avec un quantile 5% correspondant à *médiocre* et une incertitude importante. Cette incertitude prend en compte le contexte morpho-dynamique et la possibilité d'un exhaussement du lit conduisant à une élévation de la hauteur de crue. Il conviendra de préconiser un traitement du problème, par rehaussement de la crête de digue ou réaménagement des sections d'écoulement de la rivière.

L'indicateur de performance du mécanisme d'affouillement présente des résultats relativement défavorables, avec un quantile 5% de 4,4 et une valeur modale de 6,3. L'étude de sensibilité (Figure 11-9) a permis de déterminer que ces résultats sont imputables aux critères $C_{1, AF}$ -résistance à l'érosion externe de la protection de digue côté cours d'eau et $C_{3, AF}$ -résistance à l'affouillement de la protection de la fondation, du fait des indicateurs d'état « état de la protection », pour le corps de digue et pour la fondation, pénalisés par la possible chute d'un arbre lors d'une crue.

Critères	Contribution
$C_{1, AF}$ -résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau	60,90%
$C_{2, AF}$ -résistance à l'érosion externe du corps de digue	0,41%
$C_{3, AF}$ -résistance à l'affouillement de la protection de la fondation	38,59%
$C_{4, AF}$ -résistance à l'affouillement de la fondation	0,10%

Figure 11-9 : Etude de sensibilité pour les critères de l'indicateur de performance du mécanisme affouillement

L'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne est le plus défavorable, avec un quantile 5% de 3,3 et une valeur modale de 5. L'étude de sensibilité (Figure 11-10) a permis de déterminer les principales causes de ces résultats. Ils sont imputables aux évaluations défavorables et incertaines des critères $C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digue et $C_{2, EI}$ -résistance du corps de digue à l'érosion interne, dues d'une part à la méconnaissance du remblai en l'absence de sondage, et, d'autre part, à la variabilité naturelle supposée des matériaux, telle que l'attestent les sondages disponibles. Le critère $C_{3, EI}$ -singularités dans le corps de digue, contribue aussi à ce résultat, à cause de la présence de grands arbres.

Critères	Contribution
$C_{1, EI}$ -perméabilité du corps de digue	17,16%
$C_{2, EI}$ -résistance du corps de digue à l'érosion interne	79,09%
$C_{3, EI}$ -singularités dans le corps de digue	3,48%
$C_{4, EI}$ -perméabilité de la fondation	0,07%
$C_{5, EI}$ -résistance de la fondation à l'érosion interne	0,02%
$C_{6, EI}$ -singularités dans la fondation	0,18%
$C_{7, EI}$ -résistance à l'érosion de contact corps de digue/fondation	0,00%
$C_{8, EI}$ -singularités à l'interface corps de digue/fondation	0,00%

Figure 11-10 : Etude de sensibilité pour les critères de l'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne

11.3.2 Représentation graphique des résultats

Les résultats peuvent être représentés graphiquement pour l'ensemble du linéaire (Figure 11-11). Les tronçons homogènes sont numérotés sur l'axe des abscisses (T1, T2, T3, T4, TP2 et TP3.), tandis que l'axe des ordonnées représente l'échelle d'évaluation de l'indicateur de performance des digues comprise entre 0 et 10.

Les tronçons 2P1 et 3P1 n'apparaissent que pour l'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne, la singularité « ouvrage traversant » et le désordre « fontis » n'étant pas pris en compte par les critères des autres indicateurs de performance.

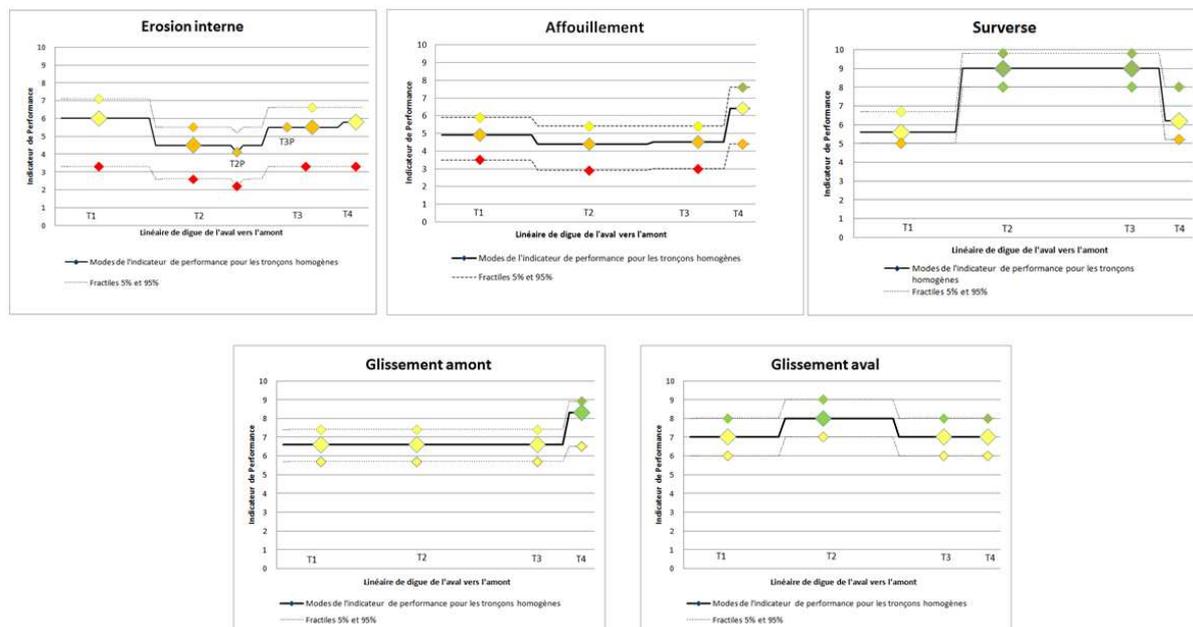


Figure 11-11 : Représentation graphique des résultats pour les indicateurs de performance des mécanismes d'érosion interne, affouillement, surverse, glissement aval et glissement amont

Nous observons que les résultats des tronçons T2 et T2P sont, pour l'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne, les plus défavorables sur l'ensemble du linéaire. Il s'agit aussi des résultats les plus incertains. Une part de cette incertitude est épistémique et pourrait être réduite par la réalisation de reconnaissances géotechniques complémentaires. Une autre part aléatoire est relative à l'occurrence des crues et à la variabilité naturelle des propriétés des matériaux constitutifs de la digue.

Les résultats de l'indicateur de performance du mécanisme d'affouillement est variable, mais défavorable pour l'ensemble du linéaire. L'incertitude des résultats est principalement associée au caractère aléatoire de la chute d'un arbre lors d'une crue. La recommandation qui est émise pour les résultats du modèle est qu'il conviendra de traiter la végétation présente sur l'ouvrage, voire de conforter la digue pour augmenter sensiblement sa performance vis-à-vis de ce mécanisme. Plus particulièrement, les tronçons 2 et 3 pourront faire l'objet d'un traitement prioritaire commun.

Enfin, nous notons que les résultats de l'indicateur de performance du mécanisme de surverse présentent également une variabilité importante.

A partir de ces résultats, nous identifions les tronçons 1 et 4 comme vulnérables à un risque de rupture par surverse. Ces deux tronçons pourraient faire l'objet d'un programme de confortement commun.

11.3.3 Discussion

Ces résultats donnés sous format probabiliste sont précieux pour l'ingénieur et le gestionnaire. Ils permettent d'apprécier la confiance qui peut être accordée à l'indicateur de performance.

Cela permet de guider le choix des tronçons de digue sur lesquels les actions d'inspection et d'investigation complémentaires doivent être prioritaires pour réduire l'incertitude sur la connaissance de la performance.

Par ailleurs des études de sensibilité peuvent être conduites à partir du modèle pour déterminer quels critères vont permettre de réduire l'incertitude et améliorer l'indicateur de performance. Cela permet de guider le choix des actions techniques à mener en termes d'inspection, maintenance et réparation pour améliorer la performance d'un tronçon de digue.

La mise en œuvre du modèle pour le tronçon n°4 a permis de cibler les investigations complémentaires à mener, à savoir :

- la réalisation de sondages et de reconnaissances géophysiques, permettant de mieux caractériser la nature et la disposition des matériaux constitutifs du corps de digue ;
- la réalisation d'une étude spécialisée pour le traitement de la végétation selon son impact réel sur les protections des ouvrages et le risque de chute d'un arbre lors de crue.

La représentation graphique des résultats permet d'identifier les tronçons homogènes d'un linéaire selon leurs résultats de performance et l'incertitude qui y est attachée. Ils permettent ainsi de favoriser les préconisations de l'ingénieur relatives aux :

- investigations complémentaires pour réduire les marges d'incertitude de la performance des ouvrages ;
- confortements des ouvrages, visant à augmenter leurs niveaux de performance.

Le modèle apporte ainsi une aide à l'ingénierie, non seulement pour quantifier l'incertitude de l'information produite, mais aussi pour définir et prioriser les investigations successives à mener lors d'un diagnostic. L'ingénieur peut, de manière itérative, renseigner les critères, identifier une première série d'investigations, modifier les évaluations des critères pour lesquels de nouvelles données sont disponibles et ainsi de suite jusqu'à une réduction satisfaisante de l'incertitude épistémique.

Un gestionnaire peut également utiliser le modèle pour favoriser le suivi dans le temps de l'évolution de la performance des linéaires dont il a la charge, au fil des diagnostics périodiques et des travaux de confortement des ouvrages. La formalisation du raisonnement de l'ingénieur, par le renseignement des indicateurs d'état et des critères, permet de faciliter la mise à jour des diagnostics et l'interprétation par le gestionnaire des raisonnements de l'ingénieur.

11.4 Synthèse

Nous avons mis en œuvre le modèle probabiliste d'aide à la décision sur un linéaire de digue, dans un contexte de faible quantité de données.

La caractérisation du linéaire sur les indicateurs d'état définis dans le cadre de ces recherches a permis l'identification de tronçons homogènes selon chaque critère. Les ingénieurs ont ainsi pu se prononcer sur l'évaluation de critères représentatifs de larges sections du linéaire, économisant un temps certain.

L'évaluation probabiliste des ouvrages permet d'attacher des marges d'incertitudes aux niveaux de performances des ouvrages. La représentation graphique des résultats du modèle

permet d'identifier les tronçons du linéaire nécessitant une priorisation d'investigations et ou de confortement. Il permet aussi d'identifier quel mécanisme représente le plus de danger pour la sécurité de la digue et, par des études de sensibilités appliquées à chaque critère, quels aspects de la digue nécessitent d'être investigués et/ou améliorés.

Le modèle présente également des intérêts pour la priorisation des investigations nécessaires à l'établissement d'un diagnostic complet et le suivi de la performance des ouvrages dans le temps.

Conclusion

Les digues fluviales sont des ouvrages à grands linéaires. Leur rôle est d'empêcher la venue d'eaux dans des espaces naturellement inondables. Lors d'événements extrêmes, il arrive cependant que des ouvrages rompent, occasionnant parfois des dommages très importants. Tenant compte des exigences de sécurité de la société civile, la réglementation sur la sécurité des ouvrages a récemment été renforcée (décret du 11 décembre 2007). Elle impose dorénavant aux gestionnaires la réalisation de diagnostics périodiques et la réalisation d'études de dangers intégrant l'évaluation probabiliste de la sécurité des digues. Actuellement, la complexité des mécanismes de rupture des digues et la nécessité d'interpréter une grande variété de données généralement imparfaites font de l'expertise l'approche privilégiée pour le diagnostic de ces ouvrages.

Pour l'aide au diagnostic des digues, nous avons développé un modèle probabiliste d'évaluation de la performance destiné aux ingénieurs. Ce modèle a pour vocation d'être utilisé en situation de diagnostics à la fois rapides et approfondis, en valorisant toutes les données disponibles, allant des données issues d'inspections visuelles jusqu'aux données complexes - résultats d'investigations géotechniques, modélisations numériques... Le modèle permet d'identifier les tronçons homogènes d'une digue, de prioriser et de localiser les investigations à mener, d'évaluer la performance des ouvrages pour les différents mécanismes de ruptures et de préciser les niveaux d'incertitude des résultats produits en fonction de l'imperfection des données disponibles.

Notre première famille de résultats concerne l'élaboration d'un modèle d'aide à la décision déterministe pour l'évaluation de la performance des digues. Elle comporte des résultats en recherche et en développement.

En recherche, nous avons mis en œuvre un modèle d'aide à la décision pour l'évaluation de la performance des digues au moyen d'indicateurs de performance. Le problème de décision posé par le diagnostic des digues est un problème de tri par niveau de performance des tronçons. S'appuyant sur la modélisation fonctionnelle, nous identifions les critères d'évaluation de la performance des digues, les indicateurs d'état permettant de renseigner les critères et les sources de données associées. Nous construisons des indicateurs de performance pour chaque mécanisme de rupture selon une méthode de construction de critère unique de synthèse. Le modèle repose sur la combinaison de fonctions d'agrégation, permettant de modéliser les processus fonctionnels de défaillance des digues.

En développement, nous proposons une modélisation fonctionnelle des mécanismes de rupture des digues en remblai homogène. Sur la base du travail de Serre (2005), nous avons mis en œuvre des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement et du Raisonnement Qualitatif : l'analyse fonctionnelle, l'analyse des modes des défaillances et de leurs effets et les graphes causaux. La modélisation fonctionnelle des mécanismes permet la représentation des processus fonctionnels de défaillance s'opérant dans les digues et l'identification des paramètres intervenant dans l'évaluation de la performance.

La deuxième famille de résultats s'intéresse à l'élaboration d'un modèle probabiliste d'évaluation de la performance des digues. Elle comporte aussi des résultats en développement et en recherche.

En recherche, nous proposons une démarche de prise en compte des incertitudes des données d'entrée du modèle dans le cadre des probabilités subjectives. Après avoir caractérisé les imperfections des données des digues, nous proposons une démarche probabiliste incluant : i) une procédure d'évaluation des critères et de leurs marges d'incertitudes par l'ingénieur, ii)

des démarches de réduction des biais pouvant altérer les évaluations, iii) une technique de propagation des incertitudes dans le modèle, iv) une démarche pour l'étude de sensibilité des résultats relatifs aux indicateurs de performance. Le modèle probabiliste proposé permet à l'ingénieur d'intégrer dans le modèle les incertitudes pesant sur les critères d'évaluation des digues et d'apprécier la contribution de ces incertitudes sur les indicateurs de performance au moyen de distributions de probabilité.

En développement, nous avons conduit une démarche de validation du modèle. Elle a consisté à confronter le modèle probabiliste d'évaluation à un diagnostic classique de l'ingénierie. Conduit sur plusieurs profils d'une digue test, ce travail a permis d'analyser les différences et d'ajuster complètement le modèle. Au final, le modèle apparaît pertinent pour évaluer la performance des digues dans le cadre de diagnostics approfondis.

Dans un cadre applicatif, nous avons conduit une étude opérationnelle sur une digue réelle en mettant en œuvre le modèle probabiliste d'évaluation de la performance. L'analyse critique des résultats obtenus montre que :

- 1) Le modèle apporte une aide précieuse pour l'identification des tronçons homogènes de digue au regard de chaque indicateur de performance. Nous exploitons pour cela la caractérisation des digues tout le long de leur linéaire selon chaque indicateur d'état. Cette analyse des indicateurs d'état, réalisée par l'ingénieur dans l'état actuel des recherches, pourra être automatisée dans le cadre de développement mettant en œuvre les méthodes de spatialisation de l'information ;
- 2) le modèle apporte une aide pour l'évaluation de la performance des digues. L'ingénieur évalue les critères des tronçons indépendamment les uns des autres et le modèle détermine une distribution de performance pour chaque tronçon. L'ingénieur analyse ensuite les résultats du modèle et peut concentrer son attention sur les tronçons les plus fragiles. Les limites actuelles du modèle sont un traitement discret des paramètres élicités par l'ingénieur et une amélioration consisterait à développer un algorithme d'ajustement des lois de probabilité à toutes valeurs continues élicitées ;
- 3) le modèle permet par des analyses de sensibilité de déterminer quelle est la part explicative de chaque critère dans les distributions obtenues pour les indicateurs de performance, favorisant ainsi l'identification des investigations complémentaires et des travaux d'amélioration.

Au final, nous avons proposé un modèle probabiliste d'évaluation de la performance des digues apportant une aide aux ingénieurs pour le diagnostic des ouvrages. Le modèle est destiné à être utilisé en situation de diagnostics rapides ou approfondis et valorise toutes les données disponibles. Le modèle a montré tout son intérêt pour : la modélisation des mécanismes de rupture des digues, l'identification des tronçons homogènes des digues et l'évaluation de leur performance dans un contexte de données imparfaites. Le modèle permet d'apprécier la confiance qui peut être accordée aux résultats et de guider le choix des tronçons de digues sur lesquels les investigations doivent être prioritaires. Il permet également de guider le choix des actions techniques ou des travaux destinés à améliorer la performance d'un tronçon de digue.

Ce travail ouvre plusieurs perspectives :

- un premier axe de recherche concerne l'élaboration d'un modèle d'aide à la décision à destination des gestionnaires intégrant simultanément des indicateurs de performance

des digues – tels que nous les avons proposés - et des indicateurs de vulnérabilité des zones protégées. Ces indicateurs de vulnérabilité, sur le principe des analyses coût/bénéfices, ont été développés dans le cadre du projet de recherche Digsure (Vuillet *et al.*, 2012). Ils pourraient être pris en compte dans une analyse multicritère pour prioriser les actions des gestionnaires parmi les tronçons présentant un niveau de performance insuffisant. Un tel modèle peut apporter une aide précieuse sur des questions liées à l'aménagement des territoires. A moyen terme, une suite à cet axe de recherche concernerait le développement d'un modèle de résilience des territoires protégés par les digues, notamment les territoires urbanisés soumis au risque inondation. Un tel travail pourrait croiser des modèles de vulnérabilité des territoires protégés par les digues – vulnérabilités sociales, économiques et environnementales (Allouche *et al.*, 2012) – et d'organisation des territoires tels que ceux développés dans le projet ANR RESILIS (Toubin *et al.*, 2012).

- un deuxième axe de recherche est l'intégration dans le modèle d'une démarche Bayésienne, permettant de mettre à jour et de préciser les évaluations de performance de l'ingénieur lors de la collecte de nouvelles données à l'occasion d'investigations complémentaires ou d'apparition de désordres. Ce point constitue un axe de recherche particulièrement pertinent dans le domaine des digues, où l'expertise tient un rôle essentiel.
- un premier axe de développement vise l'intégration du modèle probabiliste d'évaluation de la performance des digues dans un SIG spécifique. Cette action est en cours de développement et comprend des enjeux importants de valorisation pour les partenaires de la présente thèse et du projet Digsure ;
- un deuxième axe de développement pourrait comprendre l'extension du modèle vers des digues fluviales en profil zoné ou mur poids.

Bibliographie

-
- AFNOR** (1988). "Norme expérimentale X60-500 Terminologie relative à la fiabilité - maintenabilité - disponibilité": 44.
- AFNOR** (2001). "Norme homologuée NF EN13306 Terminologie de la maintenance": 59.
- Ali, B.** (2006). "Modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées : application à l'analyse de l'orniérage". *Rapport de thèse*, Ecole Polytechnique Universitaire de Lille. Lille.
- Allouche, A., Nicolas, L., Tourment, R.** (2012). "Approche socio-anthropologique pour l'évaluation de la vulnérabilité sociale des zones protégées par les digues fluviales du Rhône aval". *Congrès SHF : "Evènements extrêmes fluviaux et maritimes"*. Paris: 8 p.
- Asnaashari, A.** (2007). "Modélisation de la défaillance des réseaux d'eau : Approches Statistique, Réseaux de Neurones et Survie". *Rapport de thèse*, Université des sciences et technologies de Lille, 182 p.
- Azibi, R.** (2003). "Construction de critères en aide à la décision : aspects méthodologiques, techniques et pratiques". *Rapport de thèse*, Université Paris Dauphine. Paris, 160 p.
- Bana e Costa, C.A., Vansnick, J.C.** (1997). "Applications of the MACBETH approach in the framework of an additive aggregation model". *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* Vol.6 (2). pp.107-114.
- Baroth, J., Schoefs, F., Breysse, D.** (2011). *Fiabilité des ouvrages*, Paris, 380 p.
- Barraqué, B., Isnard, L.** (2010). "Long term management of infrastructure in France ". *available tools and use difficulties*. Metropolitan Water District California.
- Bellot, D.** (2002). "Fusion de données avec des réseaux bayésiens pour la modélisation des systèmes dynamiques et son application en télémédecine ". *Rapport de thèse*, Université Henri Poincaré. Nancy 1., 175 p.
- Ben Mena, S.** (2000). "Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision" *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* , volume 4(2), pp. 83-93.
- Benayoun, R., de Montgolfier, J., Roy, B.** (1971). "Linear programming with multiple objective functions : STEP Method (STEM)" *Mathematical Programming 1*, pp. 366-375.
- Berglund, N.** (2006). "Théorie de probabilités". N. d. cours. FRUMAM, CPT-CNRS Luminy, PHYMAT, Université de Toulon: 76 p.
- Berrah, L.** (2002). *L'indicateur de performance : Concepts et Applications*. Cépadués-Editions, Toulouse, 170 p.
- Bloch, I.** (2003). *Fusion d'informations en traitement du signal et des images*. Edition Hermès, Paris, 319 p.

-
- Bloch, I.** (2005). "Fusion d'informations numériques : panorama méthodologique ". *Actes des 5e Journées Nationales de la recherche en Robotique*. Guidel: pp. 79-88.
- Boissier, D.** (2000). "Décision et incomplétude" *Revue Française de Géotechnique*, volume 93, pp. 81-92.
- Boissier, D., Al-Hajjar, J.** (1993). "Système interactif d'aide à la décision (SIAD) et incertain en génie civil ". *EUROPIA'93 Delft*, 21-24 juin 1993.
- Bollinger, D., Maystre, L. Y.Slowinski, R.** (1997). "Un cas concret de la contribution de l'aide multicritère à la décision à la coordination inter-cantonale pour l'incinération des déchets urbains ". *45ème Journées du Groupe de Travail Européen "Aide Multicritère à la Décision"*. Celakovice, République Tchèque.
- Bonnefous, C.Courtois, A.** (2001). *Indicateurs de performance*. Editions HERMES Science Publication, Paris, 285.
- Bouchon-Meunier, B.** (1993). *La logique floue*. Presses universitaires de France, 128 p.
- Bouchon-Meunier, B.** (1995). *La logique floue et ses applications*. Addison-Wesley, 254 p.
- Bouchon-Meunier, B., Marsala, C.** (2003). *Logique floue, principes, aide à la décision*. HERMES SCIENCES PUBLICATIONS, PARIS, 252 p.
- Brans, J. P., Vincke, Ph.** (1985). "A Preference Ranking Organization Method " *Management Science*, volume 31, pp. 647-656.
- Carré, J. C., Agresti, P.** (2005). "Diagnostic et analyse de risque appliqués aux digues du Rhône autour de Lyon" *Ingénierie eau agriculture territoires n° spécial 2005*.
- Carvajal, C.** (2009). "Évaluation probabiliste de la sécurité structurale des barrages-poids". *Rapport de thèse*, Université Blaise Pascal Clermont 2, 191 p.
- Carvajal, C., Peyras, L., Bacconnet, C., Bécue, J.P.** (2009). "Probability modeling of shear strength parameters or RCC gravity dams for reliability analysis of structural safety" *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, volume 13, pp. 91-119.
- Clément, A.Mériaux, P.** (2007). "La détection LIDAR: projet "FliMap-Digues" et derniers développements de l'utilisation de méthodes à haut rendement pour la reconnaissance des digues fluviales française" *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, volume n°186, pp. 87-91.
- Cooke, R.** (1991). *Experts in uncertainty: opinion and subjective probability in science*. Oxford University Press, 336 p.
- Cooke, R. M., El Saadany, S.Huang, X.** (2008). "On the performance of social network and likelihood-based expert weighting schemes" *Reliability Engineering & System Safety*, pp. 745-756.

-
- Cooke, R. M., Goosens, L.** (2000). "Nuclear science and technology. Procedure guide for structured expert judgment". *Report to European commission*. S. P. N. F. S. 1994-98, Luxembourg Euratom. Project report EUR 18820EN.
- Correc, O.** (2005). "Approche possibiliste de prédiction des risques de dégradation des réseaux de distribution d'eau à l'intérieur des bâtiments". *Rapport de thèse*, Université Paris Est Marne La Vallée, 162 p.
- Cremona, C.** (2003). *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. Association Française de Génie Civil, 451 p.
- Dague, P., Travé-Massuyès, L.,** (2004). "Raisonnement causal en physique qualitative". Rapport LAAS 04322: 32 p.
- De Finetti, B.** (1937). *La prévision ses lois logiques, ses sources subjectives*. Annales de L'Institut Henri Poincaré, tome 7, pp. 1-68.
- Debères, P., Ahmadi, M., De Massias, J-C., Le Gauffre, P., Cherqui, F., Werey, C., Nirsimloo, K.** (2011). "Deploying a sewer asset management strategy using the indigau decision support system". *4th Leading-edge conference on Strategic Asset management, LESAM*. Mülheim, Germany: 11 p.
- Delfosse, G.** (2001). "La politique technique de restauration du réseau routier national". *Journées scientifiques et techniques du CETMEF*, 2.
- Dempster, A.** (1967). "Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping" *Annals of Mathematical Statistics* AMS-38, pp. 325-339.
- Diab, Y.** (2001). "Génie urbain et environnement : quelques pistes de recherche". Mémoire de dossier d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Savoie: 120 p.
- Diab, Y.** (2002). "La gestion du patrimoine enterré : approche multi-critère d'analyse des risques". *INFRA 2002*, Montréal, Québec, 7.
- Dion, R.** (1961). "Histoire des Levées de la Loire" *Annales de Bretagne*, 494 p.
- Fauchard, C., Mériaux, P.** (2004). *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues. Guide pour la mise en œuvre et l'interprétation*. Cemagref Editions, 124 p.
- Favre, J-L.** (2004). *Sécurité des ouvrages/Risques : Modélisation de l'incertain, fiabilité, analyse de risques*, 320 p.
- Figueira, J., Roy, B.** (2002). "Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos procedure" *European Journal of Operational Research*, volume 139(n°2), pp. 317-326.
- Fisher, R., O'Leary, R., Low-Choy, S., Mengersen, K., Caley, J.** (2012). "A software tool for elicitation of expert knowledge about species richness or similar counts" *Environmental Modelling & Software* volume 30, april 2012, pp. 1-14.

-
- Galway, L.** (2007). "Subjective probability distribution elicitation in cost risk analysis: A review ". *Technical Report #410*. R. Corporation.
- Garvey, P.R.** (2000). *Probability methods for cost Uncertainty Analysis*. Marcel Dekker, New York, 424 p.
- Gauthier, E.** (1992). "Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviales dans le bassin du Buëch (Alpes du sud)". *Rapport de thèse*, Université Paris X. Nanterre, 439 p.
- George, L. M., Blanchard, J-Y., Dautzats, M.** (2005). "Cofiroute optimise l'entretien des chaussées de l'A11 avec ERASMUS". *Bulletin d'information de la société TWS*.
- GIEC.** (2000). "Guide des bonnes pratiques et gestion de l'incertitude des inventaires nationaux de gaz à effet de serre". Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japon.
- Goossens, L.H.J., Cooke, R.M.D., Hale, A.R., Rodic-Wiersma, L.J.** (2008). "Fifteen years of expert judgement at TUDelft" *Safety Science* , volume n°46, pp. 234-244.
- Gore, S.M.** (1987). "Biostatistics and the Medical Research Council" *Medical Research Concl News*.
- Goutx, D., Mériaux, P., Tourment, R.** (2004). "Conception hydraulique des déversoirs des endiguements de protection contre les inondations". *Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD*, Orléans, France, 531-550.
- Grabisch, M., Perny, P.** (2002). "L'aide multicritère à la décision". *Logique floue, principe, aide à la décision*, Hermès: pp. 81-120.
- Guyonnet, D., Blanchard, F., Harpet, C., Ménard, T., Côme, B., Baudrit, C.** (2005). "Traitement des incertitudes en évaluation des risques d'exposition -Projet IREA- ". *Rapport BRGM/ RP 54099 - FR*, BRGM, ADEME: 192 p.
- Hammami, A.** (2003). "Modélisation techno-économique d'une chaîne de logistique dans une entreprise réseau ". *Rapport de thèse*, Faculté des Sciences et de Génie, Université de Laval, Quebec, Canada, 263 p.
- Hartford, D., Beacher, G.** (2004). *Risk and uncertainty in dam safety*, London, UK.
- House-Peters, L.A., Chang, H.** (2011). "Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles" *Water Resources Research*, volume 47, 15 p.
- Ibrahim, M.** (2008). "Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains : évaluation et agrégation d'indicateurs précis ou flous". *Rapport de thèse*, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon 139 p.
- ICOLD** (1983). *Deterioration of Dams and Reservoirs - examples and their analysis*. Louis Jean, Gap, 367.

-
- ICOLD** (1993). *Bulletin 93: Ageing of dams and appurtenant works - Review and recommendations*. ICOLD, Paris, 235.
- ICOLD** (1995). *Bulletin 99: Dam failures - Statistical analysis*. ICOLD, Paris, 73.
- ISDF** (1990). "AMDEC- Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité - guide pédagogique", Ed. ISDF - Institut de la Sécurité de Fonctionnement: 36.
- Kahneman, D., Slovic, P., Tversky, A.** (1982). *Judgement under Uncertainty, Heuristics and Biases*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kanso, A.** (2004). "Evaluation des Modèles de Calcul des Flux Polluants des Rejets Urbains par Temps de Pluie, Apport de l'Approche Bayésienne". *Rapport de thèse*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 245 p.
- Kaplan, S.** (1997). "The words of risk analysis" *Risk Analysis* vol 17(n°24).
- Keeney, R. L.** (1982). "Decision analysis : An Overview" *INFORMS : Institute for Operations Research*, volume n°30, 803 p.
- Keeney, R.L., Raiffa, H.** (1976). *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. John Wiley & Sons, New York, 592 p.
- Klir, G.J.** (2004). "Generalized information theory: Aims, results, and open problems" *Reliability Engineering and System Safety*, volume 85(n°1-3), pp. 21-38.
- Kurtz, J.P.** (1997). *Dictionnaire de génie civil*. Editions du conseil International de la Langue Française, Paris, pp. 398-399.
- Labbouz, S.** (2008). "Le choix d'un tracé d'une ligne de transport en commun en site propre et de la position de sa plateforme en milieu urbain". *Rapport de thèse*, Université Paris Est Marne-La-Vallée, 300 p.
- Lair, J.** (2000). "Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment". *Rapport de thèse*, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 213 p.
- Le Gauffre, P., Closet, J.-F., Joannis, Wery, RozanMorand.** (2008). "Indicateurs de performance pour la gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains". Rapport intermédiaire 18 mois INDIGAU
- Le Gauffre, P., Joannis, C., Breyse, D., Gibello, C., Desmulliez, J.J.** (2004). *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbain - Guide méthodologique - (RERAU)*. Editions : Tec & Doc Lavoisier, 416 p.
- Lemaire, M., Chateaufneuf, A., Mitteau, J.-C.** (2005). *Fiabilité des structures. Couplage mécano-fiabiliste statique*, 501 p.
- Lemaître, M.** (2007). "Décision multisource". N. d. cours, ONERA, Centre de Toulouse.

-
- Lepert, P., Joubert, P.** (1998). "The recent developments in the pavement management system in France". *4th International Conference on Managing Pavement*.
- Lepetit, L.** (2002). "Etude d'une méthode de diagnostic des digues avec prise en compte du risque de liquéfaction". *Rapport de thèse*, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 207 p.
- Lino, M., Mériaux, P., Royet, P.** (2000). *Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne*. Cemagref Editions, 208 p.
- Low Choy, S., James, M., Mengersen, K.** (2009). "Expert elicitation and its interface with technology: a review with a view to designing Elicitorator". *18th World IMACS/MODSIM Congress*. Cairns Australia
- Malandain, J., Le Gauffre, P., Miramond, M.** (1999). "Organizing a decision support system for infrastructure maintenance: application to water supply systems " *Journal of Decision Systems* volume 8, n°2, pp. 203-222.
- Mallet, T.** (2011). "Présentation du SYMADREM ". *Journée technique "des infrastructures et des digues"*. Aix-en-Provence.
- Martel, J.M., Zaras, K.** (1995). "Stochastic Dominance in Multicriterion Analysis under Risk" *Theory and Decision*, volume 39, pp. 31-49.
- Masson, M.H.** (2005). "Apport de la théorie des possibilités et des fonctions de croyances à l'analyse des données imprécises", Université de Technologie Compiègne, UPJV: 124 p.
- Maurel, P., Serre, D., Tourment, R.** (2004). "Towards a generic GIS for dike management in flood plain areas: from conceptual design to real applications". *AGILE 2004 conference on Geographic Information Science*,. Heraklion, Greece, 14 p.
- Maystre, L.Y., Pictet, J., Simos, J.** (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, CHE, 323 p.
- Mejean, A.** (2007). "Etude historique des aménagements réalisés pour lutter contre le risque inondation dans le grand delta du Rhône", SYMADREM.
- Mendas, A., Hamadouche, M.A., Nechniche, H., Djilal, A.** (2007). "Elaboration d'un système d'aide à la décision spatiale. Application à la dangerosité routière" *Journal of Decision Systems*, volume 16, n°3, pp. 369-391.
- Mériaux, P., Royet, P., Folton, C.** (2001). *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations*. Cemagref Editions, 191 p.
- Mériaux, P., Royet, P., Folton, C.** (2001). *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations*. Cemagref Editions, 191.

-
- Mériaux, P., Tourment, R., Wolff, M.** (2004). "Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France". *Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD*, Orléans, France, pp. 9-20.
- Moins, I., Maurel, P.** (2006). "A GIS application for levees management enhancement". *7th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2006)*. Nice.
- Morgan, M.G., Henrion, M.** (1990). *Uncertainty, a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*, Cambridge University Press.
- O'Hagan, A.** (1998). "Eliciting expert beliefs in substantial practical applications" *Journal of the Royal Statistical Society Series D: The Statistician*, volume 47(n°1), pp. 21-35.
- O'Hagan, A., Buck, C. E., Daneshkhan, A., Eiser, J. R., Garthwaite, P. H., Jenkinson, D. J., Oakley, J.E., Rakow, T.** (2006). *Uncertain Judgments : Eliciting Experts' Probabilities*, West Sussex, UK, 338 p.
- Oakley, J.E.** (2010). "Eliciting univariate probability distributions". *Rethinking Risk Measurement and Reporting* B. K. London, Risk Book. I.
- OCDE** (1993). "Corps central d'indicateurs de l'OCDE pour les examens des performances environnementales". Paris, Rapport de synthèse du Groupe sur l'Etat de l'Environnement: 41.
- Ortiz, N.R., Wheeler, T. A., Breeding, R. J., Hora, S., Meyer, M.A., Keeney, R. L.** (1991). "Use of Expert Judgment in NUREG-1150" *Nuclear Engineering and Design*, volume 126, pp. 313-331.
- Osman, H., Bainbridge, K.** (2010). "Comparison of Statistical Deterioration Models for Water Distribution Networks" *Journal of Performance of Constructed Facilities*, volume 25(n°3), pp. 259-266.
- Pangburn, T.** (2006). "Overview of the levee GIS data model". *Geospatial technologies 2006 Symposium*. Denver, Colorado, USA.
- Peyras, L.** (2003). "Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise". *Rapport de thèse*, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 199 p.
- Peyras, L., Boissier, D., Royet, P.** (2004). "Approches de l'analyse de risques en génie civil" *Revue Française de Génie Civil* vol 8, 931-952.
- Peyras, L., Royet, P., Kovarik, J.-B.** (2006). "Vers l'adaptation aux Eurocodes de la justification des barrages-poids" *Revue Européenne de génie civil*, volume 10, pp. 83-109.
- Pigeon, M.** (2008). "Utilisation d'avis d'experts en actuariat". *Rapport de thèse*, Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences, Université de Laval, 108 p.

-
- Pomerol, J.C., Barba-Romero, S.** (1993). *Choix multicritères dans l'entreprise*. Hermès, Paris.
- Preyssl, C., Cooke, R.M.** (1989). "Expert Judgment; Subjective and Objective Data for Risk Analysis of Spaceflight Systems". *Proceedings PSA '89, International Topical Meeting on Probability, Reliability and Safety Assessment*, Pittsburgh, pp. 603-612.
- Procaccia, H., Suhner, M.-C.** (2003). *Démarche bayésienne et applications à la sûreté de fonctionnement*, 412 p.
- Quidu, I., Malkasse, J.P., Vilbé, P., Burel, G.** (2001). "Fusion multi-attributs d'images sonar". *GRETSI*. Toulouse, France.
- Raiffa, H.** (1968). *Decision Analysis: Introductory Lectures on Choice Under Uncertainty*, Reading, Mass.
- Rostum, J.** (2000). "Statistical Modelling of Pipe Failure in Water Networks". *Faculty of Civil Engineering, University of Science and Technology*: 97 p.
- Roy, B.** (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica, Paris, 423 p.
- Roy, B.** (2009). "À propos de la signification des dépendances entre critères : quelle place et quels modes de prise en compte pour l'aide à la décision ?", (3), *RAIRO-Oper. Res.* 43, pages 255-275
- Roy, B., Bouyssou, D.** (1993). *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Editions Economica, Paris, 695 p.
- Royet, P., Lino, M.** (2004). "Méthodologie de diagnostic pluridisciplinaire des digues fluviales". *Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD*, Orléans, France, pp. 213-226.
- Saaty, T. L.** (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, 287 p.
- Saegrov, S.** (2005). *Care-w: Computer Aided Rehabilitation for Water Networks*. Iwa Publishing, ISBN-10: 1843390914.
- Saegrov, S.** (2006). *Care-s: Computer Aided Rehabilitation of Sewer and Storm Water Networks*. Iwa Publishing, ISBN : 1843391155,
- .
- Scharling, A.** (1985). *Décider sur plusieurs critères : panorama de l'aide à la décision multicritère*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, CH, 300 p.
- 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". *Rapport de thèse*, Université de Marne la Vallée, 225 p.

-
- Serre, D., Maurel, P., Mériaux, P., Diab, Y.** (2003). "Pour une meilleure gestion des digues de protection contre les inondations : la conception d'un outil d'aide à la décision à références spatiales". *21ème rencontres de l'Association Universitaire de Génie Civil*, La Rochelle: 9 p.
- Serre, D., Peyras, L., Maurel, P., Tourment, R., Diab, Y.** (2009). "A spatial decision support system aiding levee managers in their repair and maintenance planning" *Journal of Decision Systems* volume 18, n°3, pp. 347-373
- Shafer, G.** (1976). *A mathematical theory of evidence*, Chichester, West Sussex, 297 p.
- Simon, H. A.** (1991). *Sciences des systèmes Sciences de l'artificiel*. Dunod, Paris, 229.
- Simos, J.** (1991). *Évaluer l'impact sur l'environnement : une approche originale par l'approche multicritère et la négociation*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 261 p.
- Smith, M.** (2005). "Réduction du risque barrage par l'utilisation des réseaux bayésien". *Rapport de thèse*, École Polytechnique de Montréal, 282 p.
- Spetzler, C. S., Staël Von Holstein, A.S.** (1975). "Probability encoding in decision analysis" *Management Science*, volume 119 n° 2, pp. 340-358.
- Tacnet, J. M.** (2009). "Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritère et fusion d'information ". *Rapport de thèse*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 400 p.
- Tacnet, J.M., Batton-Hubert, M., Dezert, J.** (2010). "Analyse multicritère et fusion d'information pour l'expertise et la gestion intégrée des risques naturels en montagne". *Colloque Lambda Mu*. La Rochelle, France: 10 p.
- Talon, A.** (2006). "Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction ". *Rapport de thèse*, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont II, 223 p.
- Talon, A., Curt, C., Boissier, D.** (2008). "Méthodologie d'évaluation possibiliste de la performance d'ouvrages de génie civil". *Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures*: 10 p.
- Torti, L., Willemin, P.-H.** (2009). "Modélisation de réseaux bayésiens de très grandes tailles ". *Article de Conférence MajecSTIC*. . Avignon.
- Toubin, M., Lhomme, S., Diab, Y., Serre, D., Laganier, R.** (2012). "La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ?" *Développement durable et territoires*, volume 3,(n°1,), 15 p.
- Tourment, R.** (2007). "Digues : comment éviter une rupture : présentation des modalités de surveillance, d'entretien et de diagnostic des digues de protection contre les inondations". *Journée d'information sur la gestion des digues de protection contre les inondations dans le cadre du réseau régional des gestionnaires des milieux aquatiques de Provence-Alpes-Côtes d'Azur*. A. r. p. I. E. PACA.

-
- Travé-Massuyès, L., Dague, P., Guerrin, F.,** (1997). *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*, Paris, , 505 p.
- Tversky, A., Kahneman, D.** (1982). "Availability: A Heuristic for Judging Frequency and Probability". *Judgment under Uncertainty* C. U. Press. Cambridge.
- Tversky, A., Kahneman, D.** (1982). "Causal Schemas in Judgement Under Uncertainty". *Judgment under Uncertainty* C. U. Press. Cambridge.
- Vennetier, M., Mériaux, P., Busset, F., Félix, H., Lacombe, S.** (2010). "Apport de la télédétection LIDAR aéroporté haute définition pour la caractérisation de la végétation des digues" *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* n°191, pp. 36-41.
- Vick, S. G.** (1997). "Dam Safety Risk Analysis: New directions". *International Water Power and Dam Construction*.
- Villemeur, A.** (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité - Facteurs humains - Informatisation*. Editions Eyrolles, pp. 121-141.
- Vincke, P.** (1989). *L'aide multicritère à la décision*. Editions Ellipses, Bruxelles, 179 p.
- Von Neumann, J., Morgenstern, O.** (1944). *Theory of games and economic behavior* Princeton University Press, Princeton,, 776 p.
- Von Thun, L.** (1998). "Risk assesment for dam safety -a framework for understanding". *Managing the Risks of Dam Project Development, Safety and Operation*. Buffalo : United States Committee on Large Dam: pp. 95-113.
- Vuillet, M., Peyras, L., Serre, D., Diab, Y.** (2012). "Decision making method for assessing performance of large levee alignment" *Journal of Decision Systems* , volume 21, n°2, pp. 137-160.
- Weaver, W., Shannon, C. E., Moles, A.A., Cosnier, J.** (1975). *Théorie mathématique de la communication*, Paris, 188 p.
- Zadeh, L.A.** (1965). "Fuzzy sets" *Information and Control*, volume 8(n°3), pp. 338-353.
- Zadeh, L.A.** (1978). "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility" *Fuzzy Sets and Systems*, volume 1(n°1), pp. 3-28.
- Zwingelstein, G.** (1995). *Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Hermès Editions, Paris, 601 p.
- Zwingelstein, G.** (1996). *La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM*. Hermès Editions, Paris, 666 p.

Liste des tableaux

<i>Tableau 2-1 : Réglementation à charge des maîtres d'ouvrages, selon la classification des ouvrages (décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007)</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 5-1: AMDE appliquée aux digues zonées (Serre, 2005)</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 5-2 : Composants des digues en remblai homogène.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 5-3 : Tableau d'analyse fonctionnelle du corps de digue (extrait).....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 5-4 : Structure de l'AMDE adaptée aux digues.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 5-5 : L'AMDE adaptée aux digues (extrait du composant corps de digue).....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 6-1 : Exemple de matrice des performances.....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 6-2 : Indicateurs d'état, informations nécessaires et sources des données utiles au renseignement du critère « singularités dans le corps de digue ».....</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 6-3 : Critères relatifs au mécanisme de rupture par érosion interne.....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 6-4 : Évaluation des critères après application de l'affectation à base de règle sur les 4 cas d'études (Vuillet et al., 2012)</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 6-5 : Profils de référence et poids des critères(Vuillet et al., 2012)</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 6-6 : Relation de surclassement profils/actions (Vuillet et al., 2012)</i>	<i>89</i>
<i>Tableau 6-7 : Catégories d'affectation des actions selon les deux procédures (Vuillet et al., 2012).....</i>	<i>89</i>
<i>Tableau 6-8 : Résultats de la méthode du critère unique de synthèse appliquée au mécanisme de rupture par érosion interne, cas d'étude n°1 (Vuillet et al., 2012).....</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 6-9 : Résultats de la méthode du critère unique de synthèse appliquée au mécanisme de rupture par érosion interne, cas d'étude n°2 (Vuillet et al., 2012).....</i>	<i>93</i>
<i>Tableau 6-10 : Résultats de la méthode du critère unique de synthèse appliquée au mécanisme de rupture par érosion interne, cas d'étude n°3 (Vuillet et al., 2012).....</i>	<i>93</i>
<i>Tableau 6-11 : Résultats de la méthode du critère unique de synthèse appliquée au mécanisme de rupture par érosion interne, cas d'étude n°4 (Vuillet et al., 2012).....</i>	<i>93</i>
<i>Tableau 6-12 : Correspondance et comparaison des résultats</i>	<i>94</i>
<i>Tableau 7-1 : Exemple des formes d'imperfection dans le critère « perméabilité du corps de digue »</i>	<i>109</i>
<i>Tableau 9-1 : Grille d'analyse des dires experts proposée pour les ouvrages hydrauliques (Vick, 1997; Hartford, 2004).....</i>	<i>136</i>
<i>Tableau 9-2 : Application étude de sensibilité.....</i>	<i>136</i>
<i>Tableau 10-1 : Correspondance entre l'échelle proposée dans notre étude et l'échelle utilisée dans l'étude diagnostic de l'ingénierie.....</i>	<i>163</i>
<i>Tableau 10-2 : Comparaison des résultats du modèle et de l'étude pour le mécanisme de rupture par érosion interne</i>	<i>163</i>

Liste des figures

Figure 1-1 : Eléments et fonctions d'un système de génie civil particulier : une digue en remblai homogène	6
Figure 1-2 : Dégradation et défaillance (Zwingelstein, 1996)	7
Figure 1-3 : Diagnostic, évaluation de l'état/performance et analyse de risque (Peyras, 2003).....	8
Figure 1-4 : Développement de l'orniérage dans la chaussée en milieu urbain en fonction du nombre de passages	13
Figure 1-5 : Arbre de défaillance pour le phénomène « corrosion sous dépôts » (Correc, 2005)	14
Figure 1-6 : Statistiques des modes de rupture de réseaux d'eau (Asnaashari, 2007).....	15
Figure 1-7 : Application ERASMUS, évolution des dommages intégrant l'entretien déjà réalisé et celui projeté jusqu'à la fin de la concession du tronçon (George et al., 2005)	16
Figure 2-1 : Illustration d'une digue fluviale et zone protégée lors d'une crue	17
Figure 2-2 : A gauche, digue sur le canal de Provence, en charge permanente, à droite digue du Rhône, à sec en situation normale d'exploitation	18
Figure 2-3 : Exemple de Digue en remblai homogène sur le Rhône (Mériaux et al., 2001).....	18
Figure 2-4 : Exemple de digue en remblai homogène sur le Cher (Fauchard et Mériaux, 2004) et étape de construction d'une digue de la Loire (Dion, 1961)	19
Figure 2-5 : Exemple de digue en remblai zoné (Mériaux et al., 2001)	19
Figure 2-6 : Exemple de digue mixte : mur poids et remblai (Mériaux et al., 2001).....	19
Figure 2-7 : Digue du bas Rhône lors d'une crue importante (crue d'occurrence centennale) et rupture de digue sur le Vidourle (30) en septembre 2002.....	22
Figure 2-8 : Principe de rupture par surverse (Fauchard, 2004).....	23
Figure 2-9 : Principe de rupture par érosion interne (Mériaux et al., 2001).....	24
Figure 2-10 : Principe de l'érosion externe (Fauchard et Mériaux, 2004)	25
Figure 2-11 : Le mécanisme de glissement côté val en situation de crue (Mériaux et al., 2001)	25
Figure 2-12 : Dignes gérées par le SYMADREM (Mallet, 2011).....	27
Figure 2-13 : Illustration du SIRS digue.....	29
Figure 3-1 : Exemples de reconnaissances géophysiques : profil RMT et panneaux électriques.....	32
Figure 3-2 : Exemple de sondages et caractérisation locale des matériaux d'une digue du petit Rhône.....	33
Figure 3-3 : Identification des tronçons de digue homogènes et évaluation qualitative (Carré, 2005)	34
Figure 3-4 : Construction d'indicateurs de performance (IP) pour les digues (Serre, 2005)	35
Figure 3-5 : Evaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche » (Serre, 2005).....	36
Figure 3-6 : Illustration de la technologie FliMap-Digues.....	38
Figure 4-1 : Démarche générale de la thèse.....	41
Figure 5-1 : Organisation de la démarche de modélisation fonctionnelle des digues.....	45
Figure 5-2 : Processus de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)	46
Figure 5-3 : BdF appliqué à un système de quatre composants (Zwingelstein, 1996)	47
Figure 5-4 : Boucle de recyclage (à gauche) et son modèle sous forme de graphe orienté (à droite) (Travé-Massuyès, 1997)	49

Figure 5-5 : Décomposition du système digue en éléments	51
Figure 5-6 : Bloc diagramme Fonctionnel d'une digue fluviale relatif aux sollicitations hydromécaniques.....	52
Figure 5-7 : Séquence de défaillance pour l'écriture des scénarios de défaillance.....	55
Figure 5-8 : Scénario de rupture par érosion interne d'une digue en remblai homogène.....	56
Figure 6-1: Matrice de performance des critères de comparaisons des voitures (extrait) et courbe de valeur partielle de U1 (prix)(Pomerol et Barba-Romero, 1993).....	67
Figure 6-2 : Structure hiérarchique d'un problème selon la méthode AHP (Hammami, 2003).....	68
Figure 6-3 : A droite, principe de l'AHP, à gauche, une forme adaptée pour agrégation dans un modèle critère-estimateur-solution (Tacnet et al., 2010)	69
Figure 6-4 : Illustration d'indice de concordance	73
Figure 6-5 : ELECTRE TRI, catégories et vecteurs de performance (Le Gauffre et al., 2008)	73
Figure 6-6 : Exemple d'application ELECTRE TRI(Le Gauffre et al., 2008).....	75
Figure 6-7 : Fonctionnement des méthodes interactives (Roy et Bouyssou, 1993)	76
Figure 6-8 : Evaluation de l'indicateur d'état « Racines dans la recharge amont étanche », adapté de (Serre, 2005).....	79
Figure 6-9 : Démarche de construction du modèle d'évaluation de la performance (Vuillet et al., 2012).....	81
Figure 6-10 : Echelle de préférence proposée (Vuillet et al., 2012)	84
Figure 6-11 : Profils de référence et catégories d'affectation proposées pour l'application d'ELECTRE TRI(Vuillet et al., 2012).....	88
Figure 6-12 : Vecteurs de performance des cas d'études (1), (2), (3) et (4) : profils de références et catégories d'affectation (Vuillet et al., 2012).....	89
Figure 6-13 : Principe de construction du critère unique de synthèse pour l'évaluation de la performance des digues (Vuillet et al., 2012).....	91
Figure 6-14 : Construction d'un critère unique de synthèse pour le tri des tronçons vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne (Vuillet et al., 2012).....	91
Figure 6-15 : Échelle de décision proposée pour l'évaluation de la performance globale (Vuillet et al., 2012) ...	96
Figure 6-16 : Illustration de segmentation du linéaire pour un critère donné (Vuillet et al., 2012)	97
Figure 6-17 : Renseignement linéaire et score de performance (Vuillet et al., 2012)	99
Figure 8-1 : Données de résistance à la compression disponibles et ajustement d'une loi normale pour ce paramètre à l'échelle du barrage (Carvajal, 2009).....	112
Figure 8-2 : Représentation graphique du principe des simulations de Monte-Carlo (Lair, 2000).....	113
Figure 8-3 : Mise en œuvre de simulations de Monte-Carlo pour l'évaluation probabiliste des barrages-poids	114
Figure 8-4 : Modélisation de l'opinion experte sous format probabiliste (GIEC., 2000).....	118
Figure 8-5 : Exemple de réseau bayésien simple (Torti et Wuillemin, 2009).....	119
Figure 8-6 : Exemple d'un sous-ensemble flou	121
Figure 8-7 : Réponse floue sur quatre modalités d'évaluation d'un tronçon selon un indicateur flou (Le Gauffre et al., 2008).....	122
Figure 8-8 : Dualité entre certitude et possibilité (Guyonnet et al., 2005)	123
Figure 8-9 : Distribution fusionnée définie par les α -coupes base, médiane et noyau (Correc, 2005)	124
Figure 8-10 : Plausibilité et crédibilité associées au calcul d'un risque à partir d'informations imparfaites, et comparaison au seuil 10-5 (Guyonnet et al., 2005).....	126

<i>Figure 8-11 : Exemple de fusion de trois données de durées de vie d'un ouvrage génie civil (Talon et al., 2008)</i>	127
<i>Figure 9-1 : Intervalles élicités par le panel d'experts (Cooke et Goosens, 2000)</i>	132
<i>Figure 9-2 : Construction d'une distribution triangulaire élargie à partir des quantiles 5% et 95% associés à la valeur modale (Galway, 2007)</i>	132
<i>Figure 9-3 : Elicitation par méthode de la roulette d'essai et distribution associée (Oakley, 2010)</i>	133
<i>Figure 9-4 : Utilisation de la méthode de (O'Hagan, 1998) pour l'estimation de la distance entre deux villes.</i>	134
<i>Figure 9-5 : Paramètres de la tendance centrale d'une distribution asymétrique : mode, médiane et moyenne</i>	135
<i>Figure 9-6 : Mise en œuvre de lois normale et log-normale pour représenter le critère C3, EI -singularités dans le corps de digue.</i>	136
<i>Figure 9-7 : Loi log-normale $f(x)$ et log-normale miroir $f(u)$ associée</i>	138
<i>Figure 9-8 : Formes variées de fonction de densité de probabilités suivant une loi bêta (O'Hagan et al., 2006)</i>	139
<i>Figure 9-9 : Loi log-normale miroir tronquée sur l'intervalle $[0, 10]$</i>	140
<i>Figure 9-10 : Procédure d'ajustement d'une loi log-normale tronquée aux paramètres élicités par l'ingénieur quantiles 5% = 5, 95% = 8 et mode = 6.</i>	142
<i>Figure 9-11 : Calibration de l'ingénieur lors des exercices, en rouge les distributions données par le manuel et en bleu celle de l'ingénieur. De gauche à droite : manifestations possibles des biais de surconfiance, mauvaise calibration résultant d'ancrage et/ou de disponibilité et/ou de représentation, enfin une calibration « idéale »</i>	145
<i>Figure 9-12 : Schéma d'agrégation de l'indicateur de performance pour le mode de rupture par érosion interne</i>	146
<i>Figure 9-13 : Séquences d'agrégation de l'indicateur de performance érosion interne relatives au corps de digue</i>	147
<i>Figure 9-14 : Loi log-normale miroir tronquée correspondant au critère C1, EI, -perméabilité du corps de digue</i>	147
<i>Figure 9-15 : Loi normale tronquée correspondant au critère C2, EI, -résistance du corps de digue à l'érosion interne</i>	148
<i>Figure 9-16 : Loi uniforme correspondant au critère C3, EI, -singularités dans le corps de digue</i>	148
<i>Figure 9-17 : Exemple de simulation de Monte Carlo pour obtenir la performance du corps de digue vis-à-vis du mécanisme érosion interne.</i>	149
<i>Figure 9-18 : Distribution empirique de l'indicateur de performance pour le mécanisme d'érosion interne</i>	149
<i>Figure 9-19 : Mode et fractiles 5%-95% de l'indicateur de performance, tout au long du linéaire de digue</i>	150
<i>Figure 10-1 : Coupe type d'une digue du Rhône ancienne construite sur un bourrelet alluvial</i>	154
<i>Figure 10-2 : Profils de digues sélectionnés pour la validation du modèle (plan orienté est-ouest)</i>	155
<i>Figure 10-3 : Localisation du profil de digue n°1</i>	156
<i>Figure 10-4 : Vue du profil de digue n°1</i>	157
<i>Figure 10-5 : Coupe topographique du profil</i>	157
<i>Figure 10-6 : Reconnaissances géophysique de la digue 200 mètres en aval du profil 1</i>	158
<i>Figure 10-7 : Essais CPT au point kilométrique 272,400</i>	159
<i>Figure 10-8 : Ajustement de lois normales et log normale miroir tronquées aux critères du mécanisme d'érosion interne relatifs au corps de digue</i>	161

<i>Figure 10-9 : Propagation des incertitudes des critères par simulations de Monte Carlo pour l'indicateur de performance érosion interne</i>	<i>161</i>
<i>Figure 10-10 : Distribution empirique de l'indicateur de performance pour le mécanisme d'érosion interne... 162</i>	<i>162</i>
<i>Figure 10-11 : Comparaison des résultats du modèle et de l'étude pour le mécanisme de rupture par glissement aval</i>	<i>164</i>
<i>Figure 10-12 : Comparaison des résultats du modèle et de l'étude pour le mécanisme de rupture par surverse</i>	<i>164</i>
<i>Figure 10-13 : Comparaison des résultats du modèle et de l'étude pour le mécanisme de rupture par affouillement</i>	<i>165</i>
<i>Figure 11-1 : Localisation de la digue cas d'étude.....</i>	<i>166</i>
<i>Figure 11-2: Profil type des digues de rivière torrentielle construites dans le secteur (Gauthier, 1992).....</i>	<i>167</i>
<i>Figure 11-3 : Section courante de la digue, route départementale en crête et végétation importante sur le talus côté rivière (gauche de la photo).....</i>	<i>167</i>
<i>Figure 11-4 : Tronçons homogènes identifiés pour le linéaire de digue cas d'étude.....</i>	<i>170</i>
<i>Figure 11-5 : Profil du tronçon n°4 (en vert), tranché effectuée lors de sondage et perré mis à jour (en rose) .</i>	<i>171</i>
<i>Figure 11-6 : Vue générale du tronçon n°4.....</i>	<i>171</i>
<i>Figure 11-7 : Lois modalisant les critères du tronçon n°4 pour le mécanisme de rupture par affouillement.....</i>	<i>174</i>
<i>Figure 11-8 : Résultats des indicateurs de performance du tronçon n°4.....</i>	<i>175</i>
<i>Figure 11-9 : Etude de sensibilité pour les critères de l'indicateur de performance du mécanisme affouillement</i>	<i>176</i>
<i>Figure 11-10 : Etude de sensibilité pour les critères de l'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne</i>	<i>176</i>
<i>Figure 11-11 : Représentation graphique des résultats pour les indicateurs de performance des mécanismes d'érosion interne, affouillement, surverse, glissement aval et glissement amont</i>	<i>177</i>

Annexes

Annexe A - Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement

Dans cette annexe, nous dressons un panorama rapide des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement en examinant leur intérêt pour notre étude. Ce panorama est issu de la thèse de (Peyras, 2003).

1. Les méthodes qualitatives

Certaines méthodes sont **qualitatives** et visent à identifier les risques ou les modes de défaillance. On trouve l'Analyse Préliminaire des Dangers, l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) et la Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées

1.1. L'Analyse Préliminaire des Dangers (APD)

L'APD est utilisée dans les premières phases de conception d'un système et constitue un premier outil d'identification des risques potentiels. Elle est mise en œuvre en préliminaire d'une étude de sûreté de fonctionnement plus fine, telle une analyse AMDE.

L'identification des dangers est effectuée à partir de la connaissance et de l'expérience des experts. L'approche peut être déductive (recherche des causes d'une défaillance) ou inductive (recherche des effets d'une défaillance), selon que l'analyse est réalisée avec l'accident potentiel ou avec l'élément dangereux. [VILLEMEUR, 88]

L'APD consiste à rechercher les entités dangereuses, les situations dangereuses et les accidents potentiels en découlant. Les résultats obtenus sont présentés dans un tableau (Tableau A-1.1).

système	phase	entités dangereuses	événement causant une situation dangereuse	situation dangereuse	accident potentiel	effet	gravité	mesure préventive

Tableau A-1.1 : Analyse Préliminaire des Dangers

Cette méthode ne présente pas d'intérêt pour les barrages car les modes de défaillance ou de rupture sont généralement bien identifiés. Ainsi, l'analyse du fonctionnement de ces ouvrages relève d'études de sûreté plus fines, telle que l'AMDE.

i) 1.2. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

AMDE dans le contexte général de l'industrie :

La méthode **AMDE** (*Failure Modes and Effects Analysis*) est apparue dans les années 1960 dans l'aéronautique et est actuellement une des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement la plus universellement utilisée dans l'industrie (spatiale, nucléaire, automobile...). Cette méthode fait l'objet de nombreux guides et normes, généralement mis au point pour chaque contexte industriel particulier : NF X 60-510, CEI 812-1985, MIL-STD-1269 A.

L'AMDE est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère, systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système et analyse ses modes de défaillance (*un mode de défaillance est la non réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues* : pas, perte ou dégradation d'une fonction, fonction intempestive [ISDF]) et leurs effets.

Les résultats des analyses AMDE sont présentés sous forme de tableaux, spécialement conçus pour le type de système étudié. Le déroulement d'une AMDE comprend [VILLEMEUR, 88] :

- ❶ une *analyse fonctionnelle* du système ;
- ❷ la recherche systématique des *modes de défaillance* et de leurs *causes* ;
- ❸ la recherche des *effets* des modes de défaillance.
- ❹ dans la méthode **AMDEC** (AMDE avec analyse de la Criticité), on recherche en plus la *probabilité* et la *gravité* de chaque mode de défaillance qui permettront de caractériser sa Criticité. Le plus souvent, la criticité est renseignée de façon qualitative à l'aide du jugement de l'expert [LEROY, 92].

La chronologie des études AMDE répond à une logique de production industrielle, dans laquelle on essaie d'éliminer les défaillances liées aux phases de fabrication : les défauts de conception et de réalisation et les écarts par rapport aux normes et règles d'hygiène et sécurité. Elle comprend généralement trois analyses (Figure A-1.1) : [ISDF]

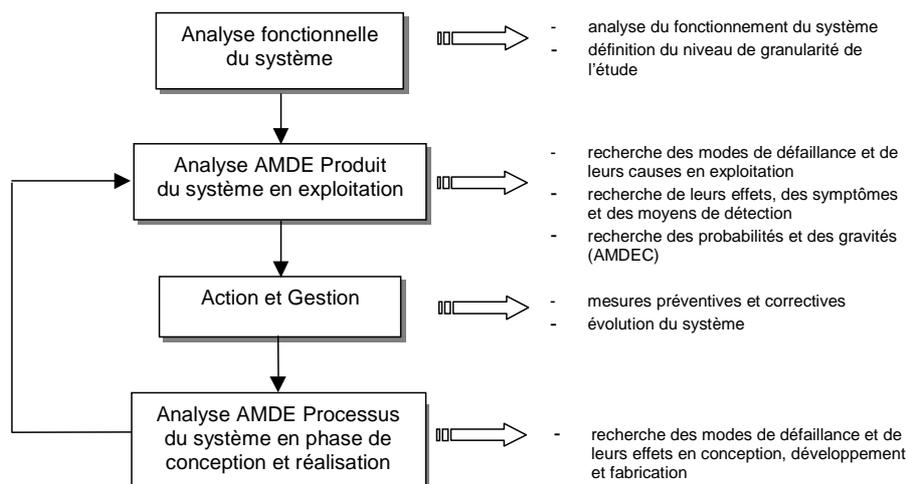


Figure A-1.1. : Processus général de l'AMDE

- ❶ l'AMDE **Produit** est en principe réalisée en première phase : elle vérifie que le système assure en phase d'exploitation de façon satisfaisante les fonctions pour lesquelles il est conçu ;
- ❷ l'AMDE **Processus** examine si le produit obtenu est bien conforme à ce qui est prévu. Elle identifie les modes de défaillance liés à la conception et à la réalisation du système ;
- ❸ l'AMDE **Moyen** est parfois réalisée pour rechercher les moyens à mettre en œuvre.

L'AMDE est une méthode puissante pour améliorer la sûreté de fonctionnement d'un système. Elle permet de générer une base d'informations qui sert de support pour définir, améliorer, corriger et valider un produit tout le long de sa vie, depuis sa conception jusqu'à l'exploitation.

AMDE dans les études de sûreté de fonctionnement des barrages :

Dans les références citant l'AMDEC ([CEA, 00] et [ICOLD, 01]), les analyses sont proposées à partir d'un tableau simplifié équivalent à une AMDEC Produit sans recherche des causes des défaillances (Figure A-1.2). Il s'en suit des difficultés dans l'enchaînement des séquences de défaillance, que l'on retrouve dans l'étude [VATTENFAL, 00]. Par ailleurs, la réalisation partielle de l'analyse fonctionnelle (I.1.3) n'a pas permis dans cette étude de déterminer l'ensemble des fonctions de conception, ce qui ne garantit pas l'exhaustivité des défaillances et pose des difficultés lors de la construction des scénarios.

System__ Date_____

Indenture Level_____ Sheet_____ of_____

Reference Drawing_____ Complied by_____

Mission_____ Approved by_____

Identification number	Item.functional Identification (nomenclature)	Function	Failure modes and causes	Failure effects			Failure detection method	Compensating provisions	Severity class	Remarks
				Local effects	Next higher level	End effects				

Figure A-1.2 : Tableau d'AMDEC proposé dans [ICOLD, 01] et [CEA, 00]

1.3. La Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR)

Les analyses AMDE mettent en évidence les défaillances simples du système. Pour prendre en compte la combinaison des modes de défaillance, la méthode MCPR intervient après une étude AMDE en la complétant. Elle recherche de façon inductive les combinaisons de défaillances élémentaires aboutissant à des effets indésirables.

La méthode MCPR pourrait présenter un intérêt pour le génie civil, en complément de la réalisation d'une AMDE. En effet, les événements indésirables (les modes de rupture) sont complexes et liés à des combinaisons de plusieurs modes de défaillance des composants.

Toutefois, nous verrons d'autres méthodes plus intéressantes pour combiner les modes de défaillance, qui permettront en outre de prendre en compte les dégradations progressives et non chronologiques.

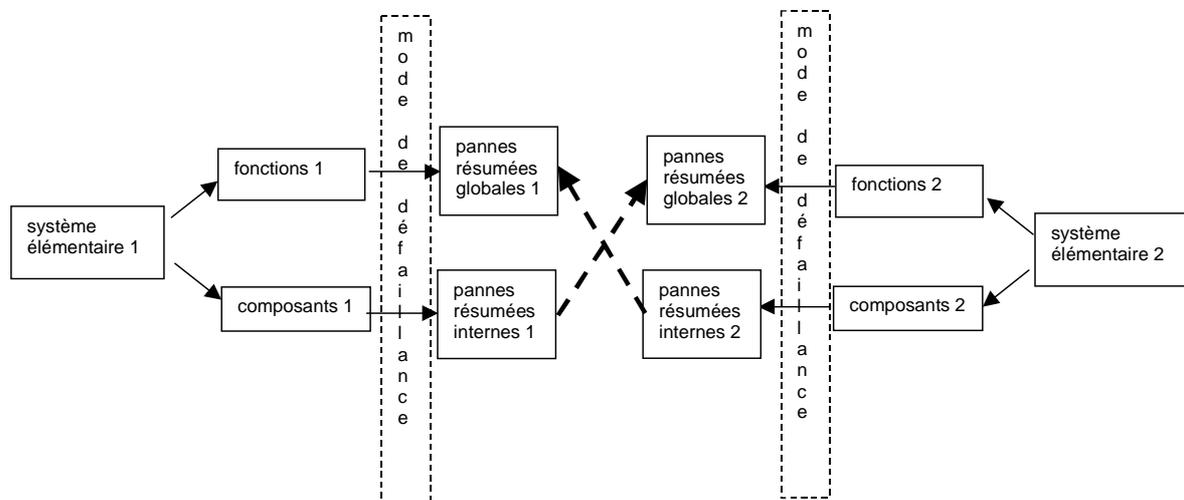


Figure A-1.3 : Démarche de la MCPR

2. Les méthodes quantitatives

Certaines méthodes sont **quantitatives** et visent, outre l'identification des risques, à produire des mesures de la sûreté de fonctionnement. Les principales sont la Méthode des Arbres d'Événements (MAE) et la Méthode de l'Arbre des Causes (MAC). D'autres méthodes sont destinées à reproduire le fonctionnement dynamique d'un système : la Méthode de l'Espace des États, les réseaux de Petri stochastiques et les simulations de Monte Carlo.

2.1. La Méthode des Arbres d'Événements (MAE)

La MAE dans le contexte général de l'industrie :

La MAE (appelée parfois la *Méthode de l'Arbre des Conséquences*) est issue de l'industrie nucléaire. Elle trouve ses applications dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes à fonctionnement binaire (marche ou défaillant) et à évolution chronologique (mécanisme non bouclé). La séquence des événements de l'arbre se déroule de façon inductive (Figure 2.1), à partir de l'événement initiateur jusqu'aux événements finaux, chaque nœud faisant l'objet d'une recherche de probabilité d'occurrence. [VILLEMEUR,88]

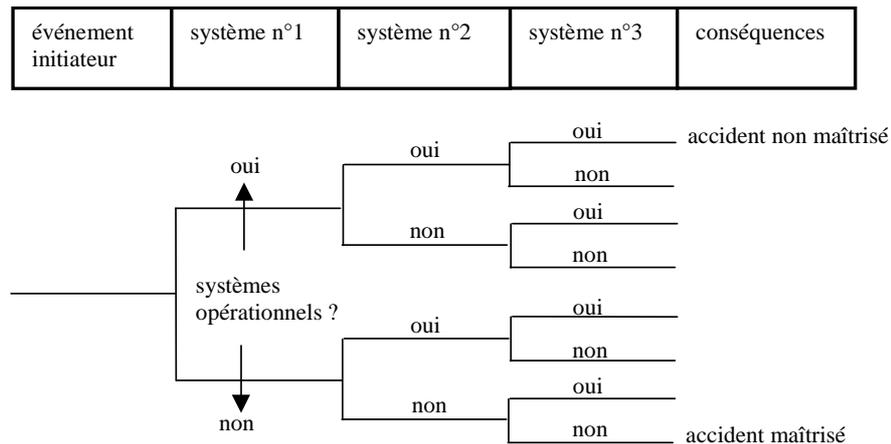


Figure A-2.1 : Structure d'un arbre d'événements [ZWINGELSTEIN, 96]

Pour construire les arbres d'événements, il convient tout d'abord de définir les fonctions de sûreté du système et les événements initiateurs. Deux approches sont alors possibles :

- une approche *déductive* basée sur la construction d'un arbre d'événements à partir de la fonction de sûreté considérée. Cette approche fait appel à la méthode MAC ;
- une approche *inductive* basée sur une analyse MCPR (ou AMDE), qui permet de déterminer les événements initiateurs et les événements de chaque séquence.

La MAE dans les études de sûreté de fonctionnement des barrages :

Dans les références analysées (partie 1 – III.2.2), nous constatons un manque de formalisme dans la description ou la mise en œuvre de la MAE :

- pas d'analyse MCPR ou AMDE préalable à la construction des arbres d'événements ;
- les arbres d'événements ne font pas apparaître des séquences de pannes résumés globales ou de modes de défaillance, mais des séquences d'événements chronologiques déterminées à dire d'experts (voir Figure 1.24) ;
- [ICOLD, 01] en conclut que la construction des arbres d'événements relève du domaine de l'art et qu'il n'existe pas de règles de construction sur les barrages.

Ce manque de méthodologie dans l'élaboration des arbres d'événements peut conduire à des difficultés lors de l'analyse quantitative : est-on bien sûr de ne pas avoir oublié d'événements ? qu'ils sont tous bien consécutifs ? que les événements sont indépendants les uns des autres ?

La MAE n'est pas particulièrement bien adaptée au contexte du génie civil : les défaillances des ouvrages et de leurs composants sont rarement binaires ni chronologiques, mais plutôt progressives, bouclées et redondantes.

La MAE peut toutefois présenter un intérêt dans les études de sûreté de fonctionnement pour l'analyse quantitative de scénarios de défaillance pouvant conduire à la rupture. Dans ce contexte, l'approche inductive doit être privilégiée et précédée obligatoirement d'une AMDE.

2.2. La Méthode des Arbres des Causes (MAC)

La MAC (parfois appelée la *méthode de l'Arbre de Défaillances*) est une méthode déductive : on part de l'événement indésirable situé au sommet de l'arbre (*Top Event*) et on déduit les événements intermédiaires et de base. Chaque niveau d'événements est relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à des opérateurs logiques (et, ou, si...).

L'élaboration des arbres des causes a souvent été considérée comme un art pratiqué par l'analyste. [VILLEMEUR, 88] propose des éléments méthodologiques pour conduire une analyse MAC mais souligne les difficultés à s'assurer de l'exhaustivité des modes de défaillance. A ce titre, il propose l'application préalable d'une AMDE pour éviter les oublis lors de la construction des arbres.

Dans les études de sûreté de fonctionnement des barrages, les arbres des causes sont utilisés pour l'analyse quantitative des défaillances des équipements électromécaniques : vannes de vidange, évacuateur de crues vanné et motorisé, dispositif d'auscultation ou de surveillance... Les études sont alors similaires à celles rencontrées dans l'industrie. La figure A-2.2 issue de [CEA,00] représente un arbre des causes appliqué à la défaillance d'un générateur de secours commandant un évacuateur de crues vanné, en situation de coupure électrique.

En synthèse, la méthode MAC présente les mêmes inconvénients que la MAE dans le contexte du génie civil : logique binaire, défaillances chronologiques.

En outre, sa méthodologie de mise en œuvre apporte un formalisme insuffisant pour nos objectifs de structuration et de classement des phénomènes.

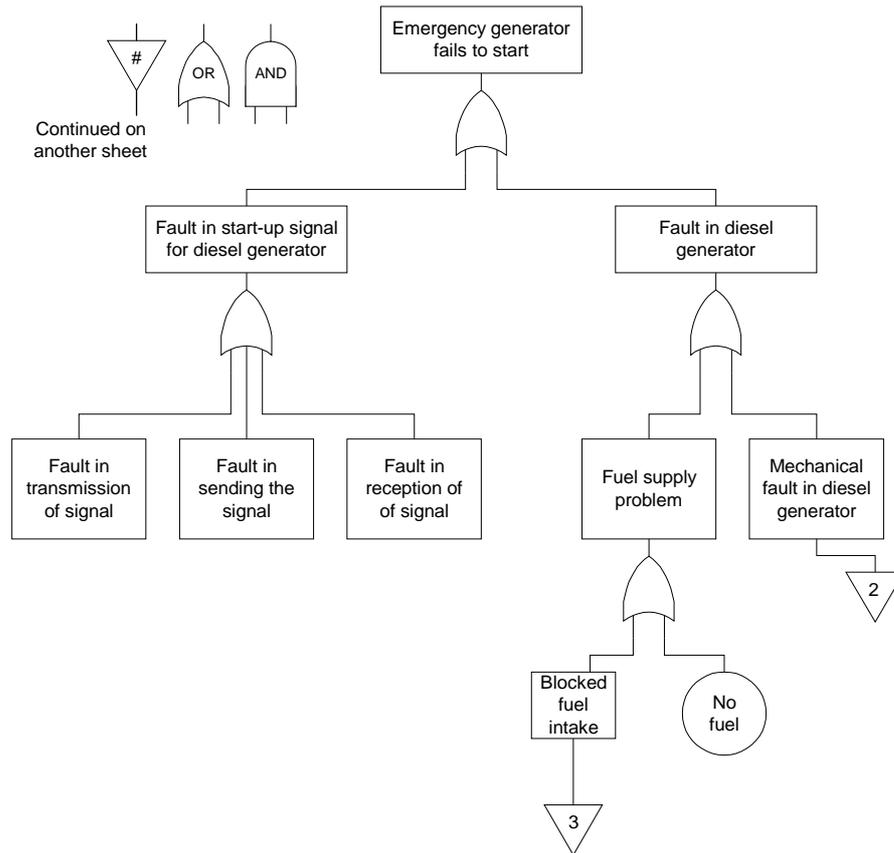


Figure A-2.2 : Arbre des causes appliqué à un générateur de secours [CEA, 00]

2.3. La Méthode de l'Espace des Etats (MEE)

La MEE ou la méthode *des processus de Markov* consiste à représenter le comportement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement. La combinaison de l'ensemble des états de fonctionnement des composants donne l'état du système à un instant donné (Figure 2.3).

On recherche ensuite toutes les transitions possibles et leurs origines entre les différents états que le système peut occuper au cours de son exploitation. L'analyse est effectuée à partir de *graphes d'états* permettant de représenter ces différents états et les transitions entre chacun d'eux.

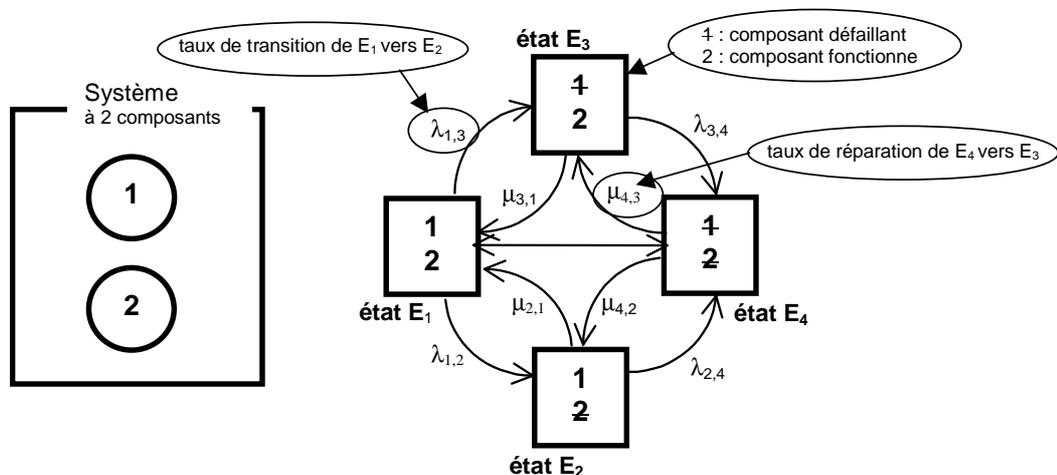


Figure A-2.3 : Graphe d'état d'un système à deux composants et deux états possibles (marche ou défaillant) [LEROY, 92]

Pour un ouvrage de génie civil constitué de nombreux composants (i) susceptibles de connaître plusieurs états de dégradation progressifs (n), **les transitions à étudier deviennent rapidement très importantes (n^i), rendant la méthode inutilisable** (données disponibles insuffisantes, complexité des mécanismes en jeu).

2.4. Les réseaux de Petri stochastiques

Ils utilisent une représentation sous forme de graphes orientés marqués, indiquant les états (ou les *places*) des composants du système et les *transitions* entre chaque place, associées à un délai régi par une loi (déterministe ou probabiliste).

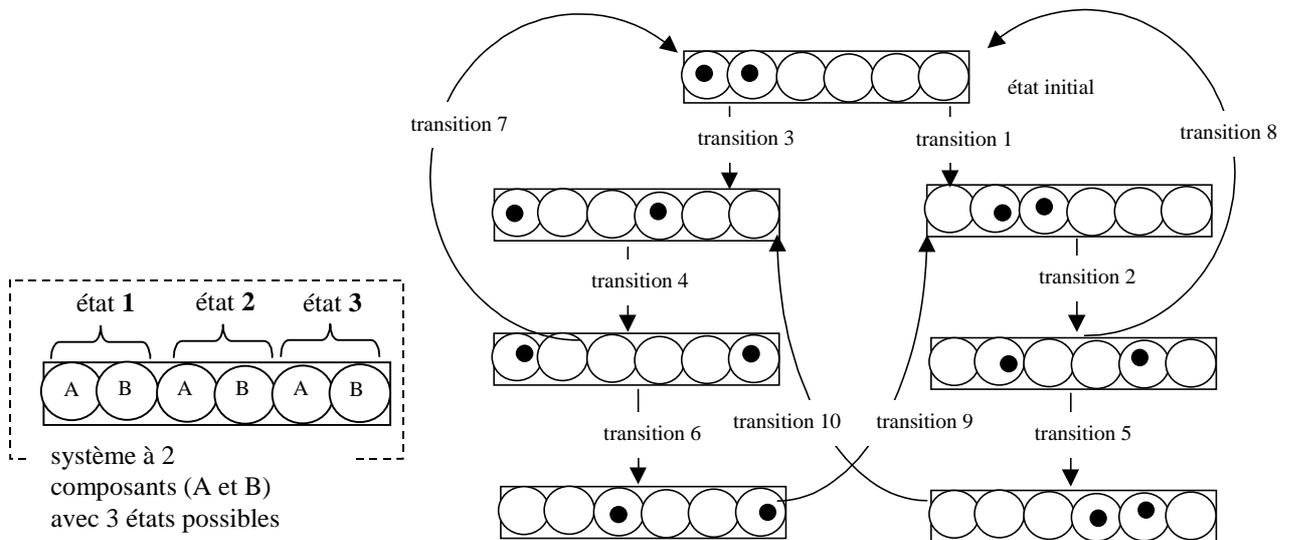


Figure A-2.4: Exemple de réseau de Petri pour un système à deux composants et trois états possibles [LEROY, 92]

Même s'il est possible d'imaginer la conception d'un réseau de Petri stochastique pour un ouvrage du génie civil particulier, **les limites de la méthode apparaissent dès lors que le système à étudier est complexe et qu'on envisage plusieurs états de dégradation** : nombres de places et de transitions très importantes, lourdeur du graphe, etc.

2.5. La simulation de Monte Carlo

Lorsque le système à étudier est trop complexe, les méthodes du processus de Markov ou des réseaux de Petri stochastiques ne permettent pas un traitement correct sans approximations grossières ou mal maîtrisées. On préfère alors la *simulation de Monte Carlo*.

Deux conditions sont nécessaires :

- un modèle de comportement du système étudié capable de reproduire de manière correcte son fonctionnement et son évolution au cours du temps lorsqu'il est soumis à différents aléas (défaillance, réparations, événements extérieurs...). La MEE ou les réseaux de Petri stochastiques peuvent constituer des supports intéressants ;

- un logiciel de simulation de Monte-Carlo pour effectuer des tirages aléatoires des variables d'entrée (état du système), pour réaliser des histoires du système à partir de son modèle de comportement et pour analyser statistiquement les variables de sortie.

Dans le contexte du génie civil, cette méthode nécessite des informations particulièrement difficiles à obtenir, voire impossible (lois de variables, modèle de comportement).

3. Synthèse

Les méthodes que nous venons d'examiner permettent l'identification des risques et l'analyse du comportement des systèmes complexes. Elles sont qualitatives (APD, AMDE, MCPR), quantitatives (AMDEC, MAC et MAE), basées sur la construction de graphes d'états (MEE, réseaux de Petri stochastiques) ou basées sur la simulation (simulation de Monte-Carlo).

La méthode AMDE semble la mieux adaptée à notre contexte. Elle permet, d'une part, de recenser de façon exhaustive les modes de défaillance et leurs effets dans les différentes phases de la vie du système (conception, réalisation et exploitation), d'autre part, de structurer les informations relatives au vieillissement.

Annexe B - Les Blocs diagrammes Fonctionnels des digues en remblai homogène

1. Principe

Les Blocs diagrammes Fonctionnels (BdF) matérialisent les relations entre les composants et les relations entre les composants et les milieux extérieurs. Ils permettent de dégager les interactions et les flux suivants :

- les interactions et les flux entre les composants et les milieux extérieurs ;
- les interactions et les flux entre les composants eux-mêmes ;
- les interactions et les flux entre deux éléments extérieurs, via des composants du système.

L'analyse de ces relations permet d'identifier les fonctions principales du système.

Les BdF sont constitués par les différents milieux extérieurs et par les composants du système découlant de l'analyse structurelle.

Chaque flux est symbolisé par un arc, le sens d'un flux étant indiqué par une flèche. Nous avons distingué les flux appliqués directement sur un composant et les flux transmis depuis un composant vers un autre, au travers d'un composant tiers.

2. Présentation des Blocs diagrammes Fonctionnels

Les quatre BdF construits concernent les catégories de relations suivantes :

- les relations de contact (contacts entre les éléments et l'environnement) ;
- les relations de flux hydrauliques (circulation de l'eau) ;
- les relations de flux de charges (forces agissantes) ;
- les relations de flux liés aux sollicitations hydromécaniques (érosion et colmatage).

BdF définissant les relations de contact

Ce BdF indique l'ensemble des contacts entre les composants entre eux et entre les composants et les milieux extérieurs. Il permet par la suite d'examiner les fonctions de contact (préparation de surface et d'appui), mais aussi les transferts possibles de flux entre les composants.

BdF définissant les relations de flux liés aux sollicitations hydromécaniques

Nous distinguons ici les relations mettant en jeu les mécanismes *d'érosion* des matériaux et des composants et les mécanismes de *colmatage* dus au transport des matériaux par l'eau.

BdF définissant les relations de flux de charges

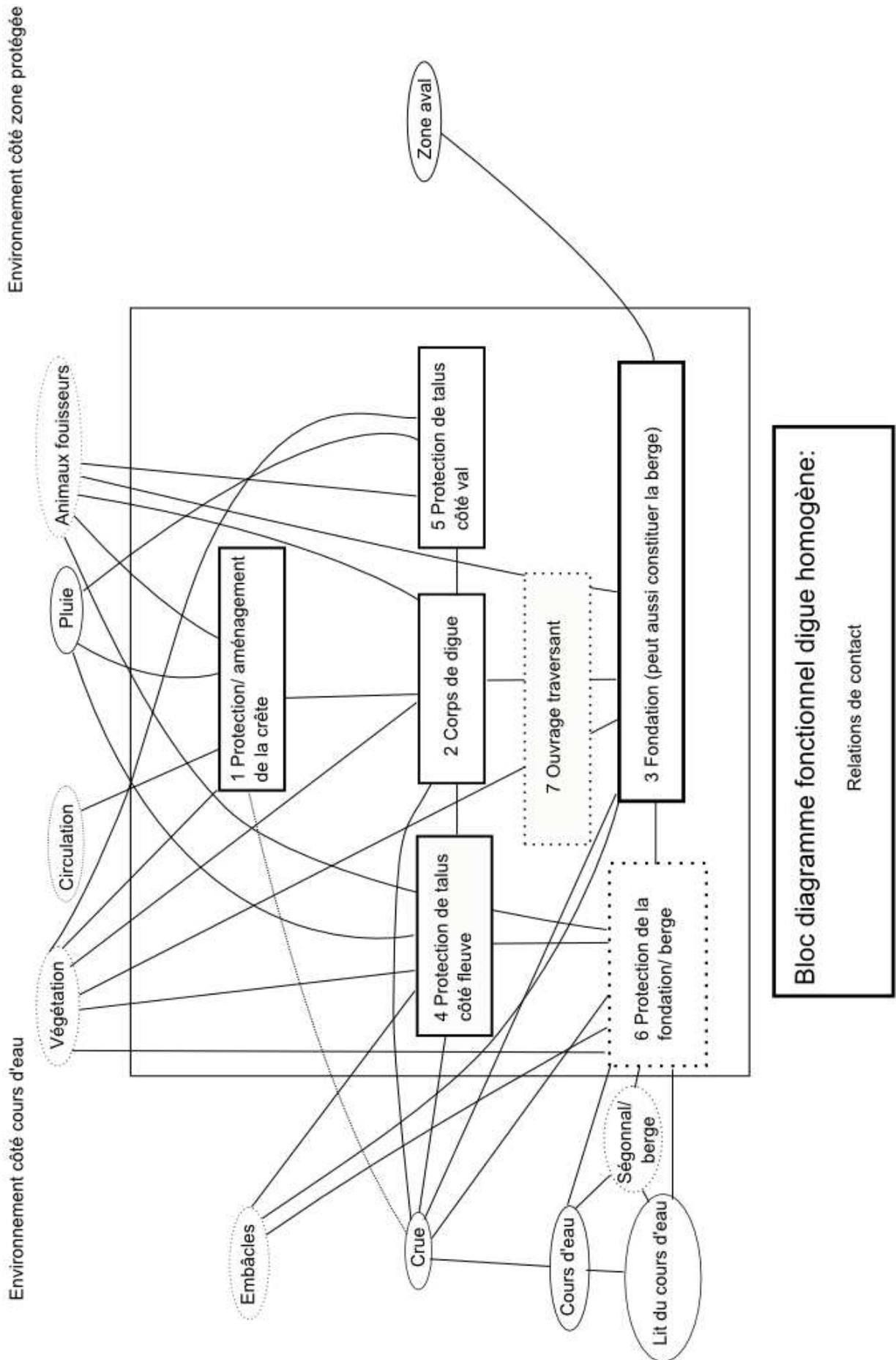
Ce Bloc diagramme Fonctionnel met en évidence les différentes actions extérieures agissant sur chaque composant de la digue. Nous distinguons les forces de pesanteur, les poussées

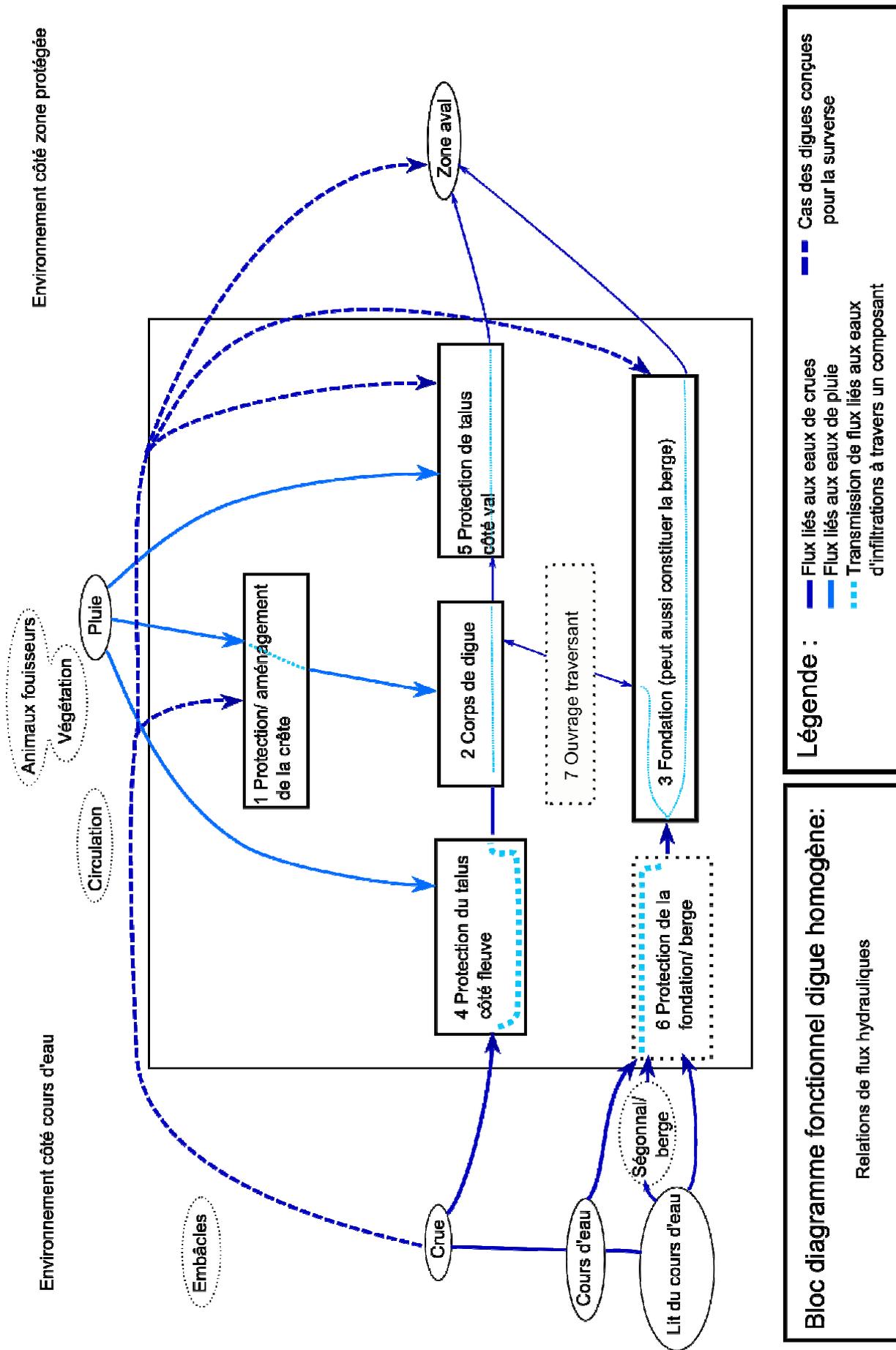
hydrostatiques amont et aval, la poussée des sédiments et des glaces, les chocs des embâcles, les sous-pressions agissant aux interfaces digue-fondations...

BdF définissant les relations de flux hydrauliques

Les flux hydrauliques reflètent les circulations d'eau dans l'état non dégradé de la digue. Nous séparons les flux associés à la fonction de vidange du système, à l'évacuation des eaux de crues, au drainage du système, aux infiltrations d'eau et aux eaux de ruissellement.

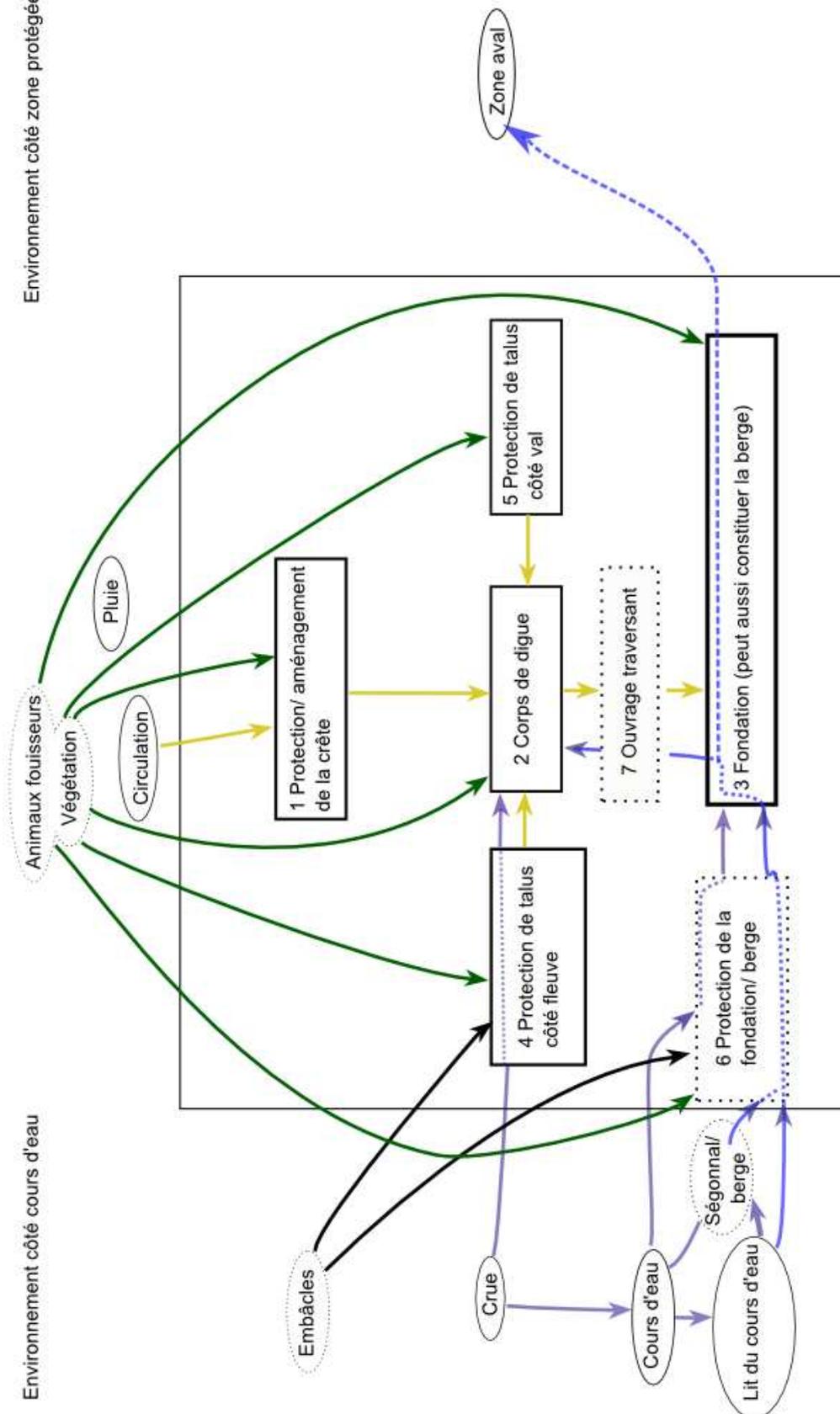
Nous indiquons également les flux qui seraient susceptibles d'apparaître entre les composants en cas de défaillance d'un d'entre eux.





Environnement côté zone protégée

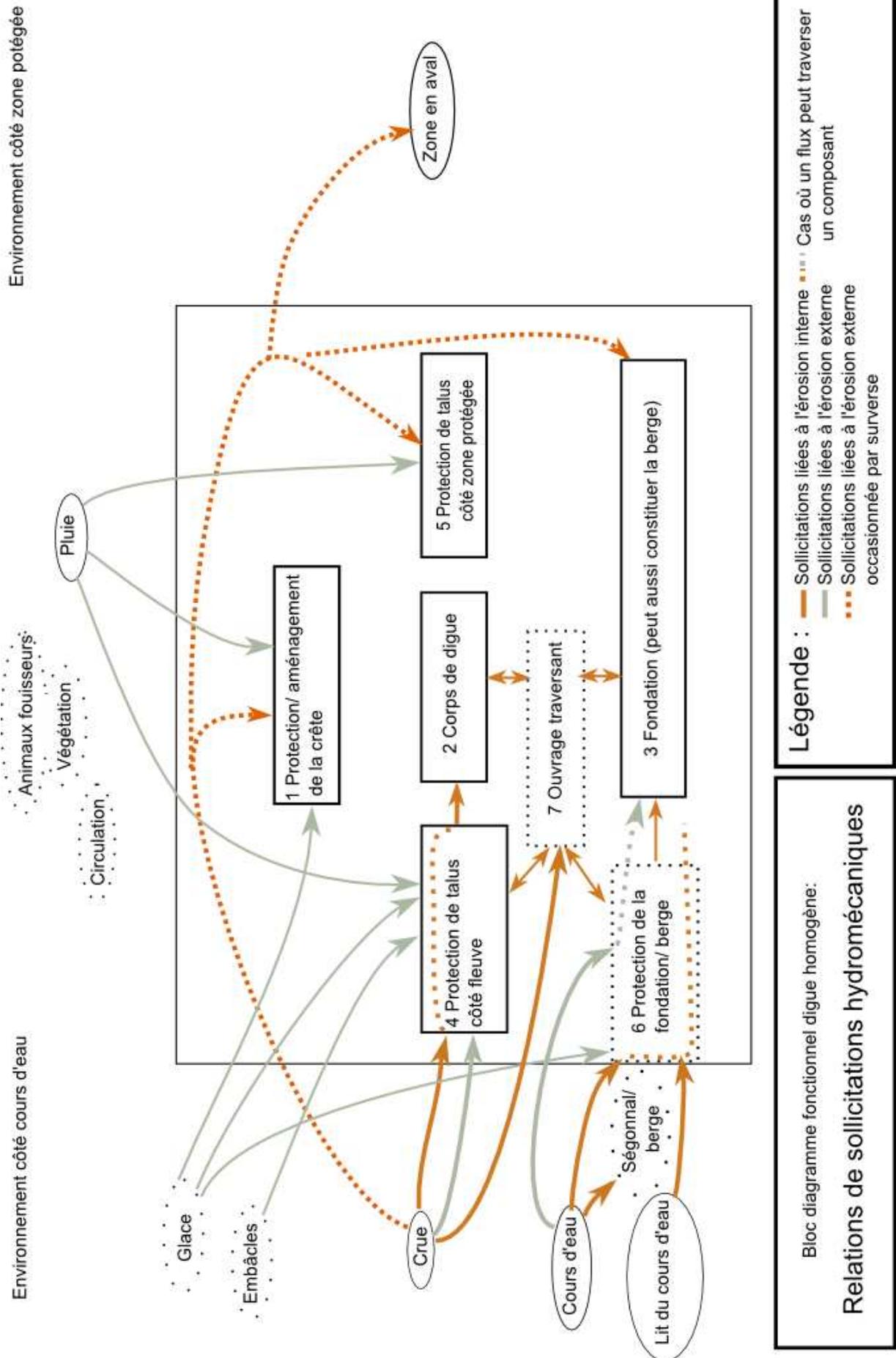
Environnement côté cours d'eau



Légende :

- Flux liés aux sous pressions
- Flux liés aux forces de pesanteurs
- Flux liés à la poussée hydrostatique
- Cas où un flux traverse un composant
- Interactions mécaniques
- Autres flux de forces

Bloc diagramme fonctionnel digue homogène:
Sollicitations mécaniques



Annexe C - Les tableaux d'analyse fonctionnelle

Les blocs diagrammes fonctionnels nous ont permis d'étudier et de formaliser les interactions des composants des digues, entre eux et avec les éléments du milieu extérieur. S'appuyant sur le travail de Serre (2005), nous avons ainsi pu identifier et lister les fonctions de conception des composants du système : pour les relations de contacts, pour les sollicitations mécaniques, pour les relations de flux hydrauliques et pour les sollicitations hydromécaniques.

1. Fonctions liées à des contacts :

Nous distinguons deux catégories de fonctions liées aux contacts :

- des fonctions de préparation de la surface pour le composant supérieur ;
- des fonctions d'appui pour des composants voisins au composant considéré.

Nous regroupons ces fonctions dans une seule syntaxe :

⇒ *préparer les surfaces de contact*

2. Fonctions liées aux sollicitations hydromécaniques :

Ces sollicitations existent là où il y a possibilité d'infiltration d'eau. Nous en distinguons trois types :

- résister à l'érosion due aux infiltrations de toutes origines ;
- éviter le colmatage dû aux transports de matériaux par les eaux d'infiltration ou de ruissellement ;
- assurer la filtration des matériaux (respecter les règles de filtres...) afin d'éviter l'érosion ou le colmatage.

Nous regroupons ces fonctions dans deux syntaxes :

⇒ *résister à l'érosion interne*

⇒ *résister à l'érosion externe*

3. Fonctions liées aux flux de charges :

Les flux de charges induisent des fonctions de résistance aux sollicitations mécaniques et de transmission de sollicitations mécaniques provenant des différents milieux extérieurs. Ainsi nous considérons :

- le poids propre d'un composant voisin ;
- les charges d'exploitation (circulation) ;
- les sous-pressions ;

- la poussée hydrostatique côté cours d'eau ;
- la poussée hydrostatique côté zone protégée ;
- les chocs des embâcles.

Nous regroupons ces fonctions dans deux syntaxes :

- ⇒ *résister aux sollicitations mécaniques*
- ⇒ *transmettre les sollicitations mécaniques*

4. Fonctions liées à des flux hydrauliques :

Elles sont induites par la circulation de l'eau dans le système. Nous distinguons les fonctions suivantes :

- limiter les infiltrations provenant d'un composant ou d'un milieu extérieur et allant vers un autre composant ou milieu extérieur ;
- étancher un composant (interdire le passage d'eaux d'infiltration) ou assurer l'étanchéité d'un composant ;
- drainer les eaux d'infiltration provenant d'un composant ou d'un milieu extérieur ;
- restituer les eaux de drainage, de fuite ou pluviales vers un composant ou un milieu extérieur ;

Nous regroupons ces fonctions dans trois syntaxes :

- ⇒ *limiter les flux hydrauliques*
- ⇒ *transmettre les flux hydrauliques*
- ⇒ *évacuer les flux hydrauliques*

Sur la base de cette classification, nous regroupons dans les Tableaux d'Analyse Fonctionnelle l'ensemble des fonctions de conception accomplies par les composants, en considérant l'ensemble des interactions.

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
1	Crête	1 - limiter les flux hydrauliques .1 limiter l'infiltration d'eau de pluie 2 - évacuer les flux hydrauliques .1 évacuer l'eau de ruissellement 3 - résister aux sollicitations mécaniques .1 résister aux charges de circulation .2 résister au développement des racines 4 - résister à l'érosion externe .1 résister à l'érosion externe provenant des eaux de ruissellement .2 résister à l'érosion externe au cours d'une crue .3 résister (autant que possible) à l'érosion externe lors d'une surverse

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
2	Corps de digue	<p>1 - résister aux sollicitations mécaniques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister au poids de la crête .2 résister aux charges d'exploitation transmises par la crête .3 résister à la poussée des glaces .4 résister aux chocs des embâcles transmis par la recharge amont étanche .5 résister aux sous-pressions provenant de la fondation .6 résister au glissement .7 résister aux développements des racines .8 résister aux actions des animaux fouisseurs <p>2 - préparer les surfaces de contact</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 préparer la surface de contact de la crête .2 préparer la surface de contact de la protection de talus côté cours d'eau .3 préparer la surface de contact de la protection de talus côté zone protégée .4 préparer la surface de contact de l'ouvrage traversant <p>3 - résister à l'érosion interne</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister au phénomène d'érosion interne due aux eaux d'infiltration en provenance de la protection de talus côté cours d'eau <p>4 - résister à l'érosion externe</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister au phénomène d'érosion externe due aux eaux de ruissellement provenant des éléments de protection <p>5 - limiter les flux hydrauliques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 limiter les eaux d'infiltration dans le remblai (assurer l'étanchéité de l'ouvrage)

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
3	Fondation	<p>1 - résister aux sollicitations mécaniques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister aux poids du corps de digue .2 résister au poids propre de l'ouvrage traversant .3 résister aux poids propre de la crête transmis par le corps de digue .4 résister au poids propre de la protection de talus côté cours d'eau .5 résister au glissement .6 résister au poids propre de la protection de talus côté zone protégée .7 résister aux développement des racines <p>2 - préparer les surfaces de contact</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 préparer la surface de contact de la protection des fondations .2 préparer la surface de contact de l'ouvrage traversant .3 préparer la surface de contact du corps de digue <p>3 - résister à l'érosion interne</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister à l'érosion interne des eaux d'infiltration provenant de la protection de la fondation et/ou du ségonnal .2 résister à l'érosion interne des eaux d'infiltration provenant du tapis drainant <p>4 - limiter les flux hydrauliques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 limiter les flux hydrauliques provenant de la zone protégée .2 limiter les flux hydrauliques provenant de la protection de la fondation et/ou du ségonnal <p>5 - évacuer les flux hydrauliques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 évacuer les eaux de fuites vers l'environnement aval

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
4	Protection de talus côté cours d'eau	<p>1 - résister aux sollicitations mécaniques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister aux chocs des embâcles .2 résister à l'action des glaces .3 résister à l'action du batillage .4 résister aux développement des racines .5 résister aux actions des animaux fouisseurs <p>2 - résister à l'érosion externe</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister à l'affouillement .2 résister au ruissellement <p>3 - résister aux sollicitations thermiques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister au gel-dégel .2 résister aux gradients thermiques élevés <p>4- évacuer les flux hydrauliques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 évacuer l'eau de pluie vers le fleuve

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
5	Protection de talus côté zone protégée	<p>1 - résister à l'érosion externe</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister aux actions des animaux fouisseurs .2 résister au ruissellement <p>2 - résister aux sollicitations thermiques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister au gel-dégel .2 résister aux gradients thermiques élevés <p>3- évacuer les flux hydrauliques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 évacuer l'eau de pluie vers l'aval <p>4 - résister aux sollicitations mécaniques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister au glissement .2 résister aux développement des racines .3 résister aux actions des animaux fouisseurs

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
6	Protection de la fondation	<p>1 - limiter les flux hydrauliques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 limiter les flux d'infiltration provenant de la crue (si palplanches) .2 limiter les flux d'infiltration provenant de la zone amont des fondations (si palplanches) .3 empêcher les écoulements au contact de la fondation <p>2 - résister aux sollicitations mécaniques</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister aux sous-pressions provenant de la fondation et/ou du ségonnal .2 résister au poids propre de la crue .3 résister au poids propre de la protection de talus côté cours d'eau .4 assurer la stabilité de la protection de talus côté cours d'eau .5 résister aux chocs des embâcles <p>3 - résister à l'érosion externe</p> <ul style="list-style-type: none"> .1 résister à l'affouillement

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
7	Ouvrage traversant	<p>1 - résister aux sollicitations mécaniques</p> <ul style="list-style-type: none">.1 résister au poids du corps de digue.2 résister au poids propre de la protection de talus côté cours d'eau.3 résister au poids propre de la crête transmis par le corps de digue.4 résister aux sous pressions en provenance de la fondation.5 résister au cisaillement.6 résister au développement des racines <p>2 - préparer les surfaces de contact</p> <ul style="list-style-type: none">.1 préparer la surface de contact avec de le corps de digue.2 préparer la surface de contact avec la fondation.3 préparer la surface de contact avec de la protection de talus côté cours d'eau

Annexe D – L'AMDE des digues en remblai homogène

Nous présentons dans cette annexe les résultats de l'AMDE produit mise en œuvre pour les quatre mécanismes de rupture des digues en remblai homogène. L'AMDE est réalisée à la granularité intermédiaire : les modes de défaillance, leurs effets et leurs causes possibles sont examinés au niveau du composant.

Par ailleurs, afin d'obtenir des tableaux les plus synthétiques possibles, nous avons :

- classer les *causes* et *effets* dans les différentes familles mises en évidence lors de l'analyse fonctionnelle : les différents *flux*, les *contacts*, *l'état intrinsèque du composant*, le *processus conception-réalisation* ;
- utiliser les classifications et les terminologies proposées pour les fonctions, les phénomènes et les indicateurs.

Nous avons dans un premier temps réalisé une AMDE exhaustive, qui envisageait des *causes* et *effets* des modes de défaillance très nombreux et divers. Il s'est avéré que le résultat obtenu n'était pas satisfaisant : tableaux très lourds, informations importantes non mises en évidence, phénomènes ne pouvant pas se produire en réalité... Nous avons donc trié les informations obtenues pour ne retenir au final que les *causes* et les *effets* pertinents, ceux qui sont susceptibles d'apparaître dans les mécanismes de rupture.

Annexe D - L'AMDE des digues en remblai homogène

COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION			
1 Protection/aménagement de la crête	1 - limiter les flux hydrauliques - limiter l'infiltration d'eau de pluie	la fonction "limiter les infiltrations d'eau de pluie" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation : - composition			- Flux hydrauliques - eaux d'infiltration dans le corps de dique - traces de fuites sur le talus amont - traces de fuites sur le talus aval		- observation visuelle			
									- Etat intrinsèque de composant Déformation Fissuration	- déformations fissures	- observation visuelle - levés de fissures
	2 - évacuer les flux hydrauliques 1 évacuer les eaux de ruissellement vers l'environnement amont ou aval	la fonction "évacuer les eaux de ruissellement" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque de composant déformation	- déformations	- observation visuelle						
						- Processus conception-réalisation : - composition	- types d'aménagement	- observation visuelle - documentation technique			
									- Etat intrinsèque de composant déformation	- déformations	- observation visuelle
	3 - résister aux sollicitations mécaniques 1 résister aux charges de circulation	la fonction "résister aux charges de circulation" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation : - composition - Flux de charges - charges d'exploitation	- types d'aménagement	- observation visuelle - documentation technique						
						- Processus conception-réalisation : - composition	- types d'aménagement	- observation visuelle - documentation technique			
									- Flux de charges - action des racines	- type de végétation - déformation	- observation visuelle
	4 - résister à l'érosion externe 1 résister à l'érosion externe provenant des eaux de ruissellement	la fonction "résister à l'érosion externe provenant des eaux de ruissellement" est dégradée ou est défaillante	- Flux hydrauliques - érosion des revêtements de protection								
						- Processus conception-réalisation : - composition	- types d'aménagement	- observation visuelle - documentation technique			
									- Flux hydrauliques - érosion des revêtements de protection	- état des revêtements - types d'aménagement	- observation visuelle - documentation technique
2 résister à l'érosion externe au cours d'une crue	la fonction "résister à l'érosion externe au cours d'une crue" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation : - composition									
					- Flux hydrauliques - érosion des revêtements de protection	- état des revêtements - types d'aménagement	- observation visuelle - documentation technique				
								- Processus conception-réalisation : - composition	- types d'aménagement	- observation visuelle - documentation technique	
3 résister (autant que possible) à l'érosion externe lors d'une surverse	la fonction "résister (autant que possible) à l'érosion externe lors d'une surverse" est dégradée ou est défaillante	- Processus conception-réalisation : - composition	- types d'aménagement	- observation visuelle - documentation technique							
					- Flux hydrauliques - érosion des revêtements de protection	- état des revêtements - types d'aménagement	- observation visuelle - documentation technique				
								- Processus conception-réalisation : - composition	- types d'aménagement	- observation visuelle - documentation technique	

Annexe D - L'AMDE des digues en remblai homogène

COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION																
2 Corps de digue	1 - résister aux sollicitations mécaniques .1 résister à la poussée hydrostatique transmise par la protection de talus .2 résister au poids de la crête .3 résister aux charges d'exploitation transmises par la crête .4 résister au développement des racines .5 résister aux animaux fouisseurs .6 résister à la poussée des glaces transmises par la protection de talus .7 résister aux chocs des embâcles transmis par la protection de talus .8 résister aux sous-pressions provenant de la fondation .9 résister au glissement	la fonction "résistance aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou est défaillante	- Flex de charges . sous-pressions dans le remblai - Processus conception-réalisation . composition . géométrie - Etat intrinsèque de composant . déformation . érosion	piédomètres . Matériaux . disposition . points de talus . déformation . traces d'érosion	"piédomètres" "reconnaisances géotechniques" "éléments sur la construction des ouvrages" "reconnaisances géotechniques" "levés topographiques" "levés altimètre" "observation visuelle"	- Etat intrinsèque de composant . fissuration . glissement . déformation . présence de racines . présence de tertiers	- fissures . Lentilles de glissement - mesures topographiques - pluinétrie . Nivellement . mesures d'alignement - présence d'arbres - présence de tertiers	- observation visuelle - observation visuelle - mesures topographiques - pluinétrie . Nivellement . mesures d'alignement - observation visuelle - observation visuelle																
									2 - préparer les surfaces de contact .1 préparer la surface de contact de la crête .2 préparer la surface de contact de la protection de talus côté cours d'eau .3 préparer la surface de contact de la protection de talus côté zone protégée	la fonction "préparer les surfaces de contact" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque de composant . déformation	. déformations	"observation visuelle"	- Contacts . Déformation de la crête - Contacts . Déformation des talus	- mesures du basement - traces d'humidité/fuites	- mesures topographiques - pluinétrie - nivellement - mesures d'alignement								
																	3 - résister à l'érosion interne .1 résister au phénomène d'érosion interne due aux eaux d'infiltration provenant de la protection de talus côté cours d'eau	la fonction "résister au phénomène d'érosion interne" est dégradée ou est défaillante	- Etat intrinsèque de composant . érosion	. durées de la crue . sensibilité du matériau à l'érosion interne . discontinuités . géométrie étroite	"hydrogramme de crue"	- Etat intrinsèque de composant . érosion	- observation de particules dans les eaux de fuite	- observation visuelle

Annexe D - L'AMDE des digues en remblai homogène

COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION																				
3 <i>Fondation</i>	<p>1 - résister aux sollicitations mécaniques</p> <p>1. résister à la poussée hydrostatique transmise par la protection de la fondation</p> <p>2. résister au poids propre du corps de digue</p> <p>3. résister aux poids propres de la crête et des charges de circulation transmises par le corps de digue</p> <p>4. résister au développement des racines</p> <p>5. résister aux animaux fouisseurs</p> <p>6. résister à la poussée des glaces transmises par la protection de la fondation</p> <p>7. résister aux chocs des embâcles transmis par la protection de la fondation</p> <p>8. résister aux sous-pressions</p> <p>9. résister au glissement</p>	<p>la fonction</p> <p>"résistance aux sollicitations mécaniques"</p> <p>est dégradée ou est défaillante</p>	<p>- Flux de charges</p> <p>- sous-pressions dans la fondation</p> <p>- Processus conception-réalisation</p> <p>- composition</p> <p>- géométrie</p> <p>- Etat intrinsèque du composant</p> <p>- déformation</p> <p>- érosion</p> <p>- entretien</p>	<p>- piézométrie</p> <p>- Matériaux</p> <p>- disposition</p> <p>- pente du terrain</p> <p>- déformation</p> <p>- traces d'érosion</p>	<p>"reconnaisances géotechniques"</p> <p>"éléments sur la construction des ouvrages"</p> <p>"reconnaisances géophysiques"</p> <p>"levés topographiques"</p> <p>"levés altimétriques"</p> <p>"observation visuelle"</p>	<p>- fissuration</p> <p>- glissement</p> <p>- déformation</p> <p>- présence de racines</p> <p>- présence de terriers</p>	<p>- observation visuelle</p> <p>- observation visuelle</p> <p>- mesures topographiques</p> <p>- planimétrie</p> <p>- nivellement</p> <p>- mesures d'alignement</p> <p>- observation visuelle</p> <p>- observation visuelle</p>																					
								<p>2 - préparer les surfaces de contact</p> <p>1. préparer la surface de contact du corps de digue</p> <p>2. préparer la surface de contact de la protection de la fondation</p>	<p>la fonction</p> <p>"préparer les surfaces de contact"</p> <p>est dégradée ou est défaillante</p>	<p>- Etat intrinsèque du composant</p> <p>- déformation</p>	<p>- déformations</p>	<p>"observation visuelle"</p>	<p>- Contacts</p> <p>- Déformation du corps de digue</p> <p>- Contacts</p> <p>- Déformation</p>	<p>- mesures topographiques</p> <p>- planimétrie</p> <p>- nivellement</p> <p>- mesures d'alignement</p>														
															<p>3 - résister à l'érosion interne</p> <p>1. résister au phénomène d'érosion interne du aux eaux d'infiltration provenant de la protection de la fondation</p>	<p>la fonction</p> <p>"résister au phénomène d'érosion interne"</p> <p>est dégradée ou est défaillante</p>	<p>- Etat intrinsèque du composant</p> <p>- érosion</p> <p>- Flux hydrauliques</p> <p>- durée de la crue</p> <p>- Processus conception-réalisation</p> <p>- composition</p>	<p>- durée de la crue</p> <p>- stabilité de matériau à l'érosion interne</p> <p>- discontinuités</p> <p>- largeur de la fondation</p>	<p>"hydrogramme de crue"</p> <p>"reconnaisances géotechniques"</p> <p>"reconnaisances géophysiques"</p> <p>"levés topographiques"</p>	<p>- observation de particules dans les eaux de fuite</p> <p>- Dépôts post-crue</p> <p>- Fontis</p>	<p>- observation visuelle</p>							
																						<p>4 - limiter les flux hydrauliques</p> <p>1. limiter les eaux d'infiltration dans le remblai (assurer l'étanchéité de l'ouvrage)</p>	<p>la fonction</p> <p>"limiter les eaux d'infiltration dans le remblai"</p> <p>est dégradée ou est défaillante</p>	<p>- Etat intrinsèque du composant</p> <p>- érosion</p> <p>- Flux hydrauliques</p> <p>- durée de la crue</p> <p>- Processus conception-réalisation</p> <p>- composition</p> <p>- géométrie</p>	<p>- durée de la crue</p> <p>- matériau perméable</p> <p>- géométrie étroite</p>	<p>"hydrogramme de crue"</p> <p>"reconnaisances géotechniques"</p> <p>"levés topographiques"</p>	<p>- traces d'humidité/fuites</p>	<p>- observation visuelle</p>

COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION							
4	Protection de talus côté Herse	la fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou est défaillante	<ul style="list-style-type: none"> - Processus conception-réalisation <ul style="list-style-type: none"> . composition - Etat intrinsèque du composant <ul style="list-style-type: none"> . entretien 	<ul style="list-style-type: none"> - type de protection - état de la protection 	<ul style="list-style-type: none"> "observation visuelle" "observation visuelle" 	<ul style="list-style-type: none"> - Etat intrinsèque de composant <ul style="list-style-type: none"> . présence de racines . présence de tertres . dégradation de la protection 	<ul style="list-style-type: none"> - présence d'arbre - présence de tertres - protection dégradée - protection déformée 	<ul style="list-style-type: none"> - observation visuelle - observation visuelle - observation visuelle - mesures 							
									la fonction "résister à l'érosion externe" est dégradée ou est défaillante	<ul style="list-style-type: none"> - Processus conception-réalisation <ul style="list-style-type: none"> . composition 	<ul style="list-style-type: none"> - type de protection - état de la protection 	<ul style="list-style-type: none"> "observation visuelle" "observation visuelle" 	<ul style="list-style-type: none"> - Etat intrinsèque de composant <ul style="list-style-type: none"> . érosion . glissement 	<ul style="list-style-type: none"> - ancoche d'érosion fissure - lanille de glissement 	<ul style="list-style-type: none"> - observation visuelle - observation visuelle - observation visuelle

COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION							
5	Protection de talus côté zone protégée	la fonction "résister aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou est défaillante	<ul style="list-style-type: none"> - Processus conception-réalisation <ul style="list-style-type: none"> . composition - Processus conception-réalisation <ul style="list-style-type: none"> . entretien 	<ul style="list-style-type: none"> - type de protection - état de la protection 	<ul style="list-style-type: none"> "observation visuelle" "observation visuelle" 	<ul style="list-style-type: none"> - Etat intrinsèque de composant <ul style="list-style-type: none"> . présence de racines . présence de tertres 	<ul style="list-style-type: none"> - présence d'arbre - présence de tertres 	<ul style="list-style-type: none"> - observation visuelle - observation visuelle 							
									la fonction "résister à l'érosion externe" est dégradée ou est défaillante	<ul style="list-style-type: none"> - Processus conception-réalisation <ul style="list-style-type: none"> . composition 	<ul style="list-style-type: none"> - type de protection - état de la protection 	<ul style="list-style-type: none"> "observation visuelle" "observation visuelle" 	<ul style="list-style-type: none"> - Etat intrinsèque de composant <ul style="list-style-type: none"> . érosion 	<ul style="list-style-type: none"> - ancoche d'érosion fissure 	<ul style="list-style-type: none"> - observation visuelle - observation visuelle

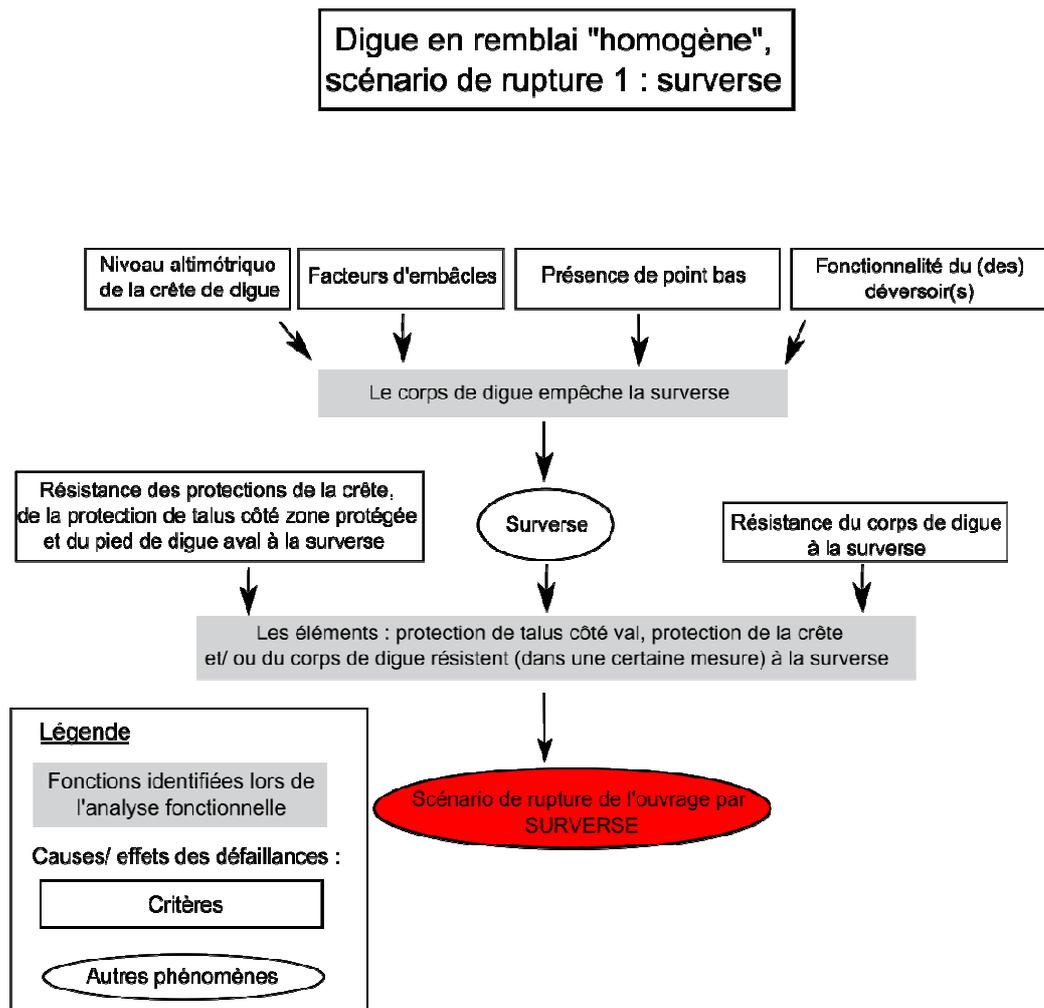
COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION
6 Protection de la fondation								
	1 - résister aux sollicitations mécaniques 1. résister au développement des racines 2. résister aux animaux fouisseurs 3. résister aux chocs des ambloles	la fonction "résistance aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou est défaillante	Processus conception-réalisation - composition Etat intrinsèque de composant - entretien	type de protection état de la protection	observation visuelle observation visuelle	Etat intrinsèque de composant - présence de racines - présence de terriers - dégradation de la protection - protection dégradée - protection déformée	présence d'arbre présence de terriers protection dégradée protection déformée	observation visuelle observation visuelle mesures
	2 - résister à l'érosion externe 1. résister à l'hyffoulement 2. résister aux sauts de ruissellement	la fonction "résister à l'érosion externe" est dégradée ou est défaillante	Processus conception-réalisation - composition	type de protection contexte morpho-dynamique	observation visuelle observation visuelle	Etat intrinsèque de composant - érosion glissement	encoche d'érosion fissures taillite de glissement	observation visuelle observation visuelle observation visuelle
	3 - évacuer les flux hydrauliques 1. évacuer les infiltrations dans la digue lors de la décrue	la fonction "évacuer les flux hydrauliques" est dégradée ou est défaillante	Etat intrinsèque de composant - colmatage Processus conception-réalisation - composition	type de protection état de la protection	observation visuelle élement de conception observation visuelle	Flux hydrauliques - eaux retenues dans le corps de digue	piézométrie	piézomètres

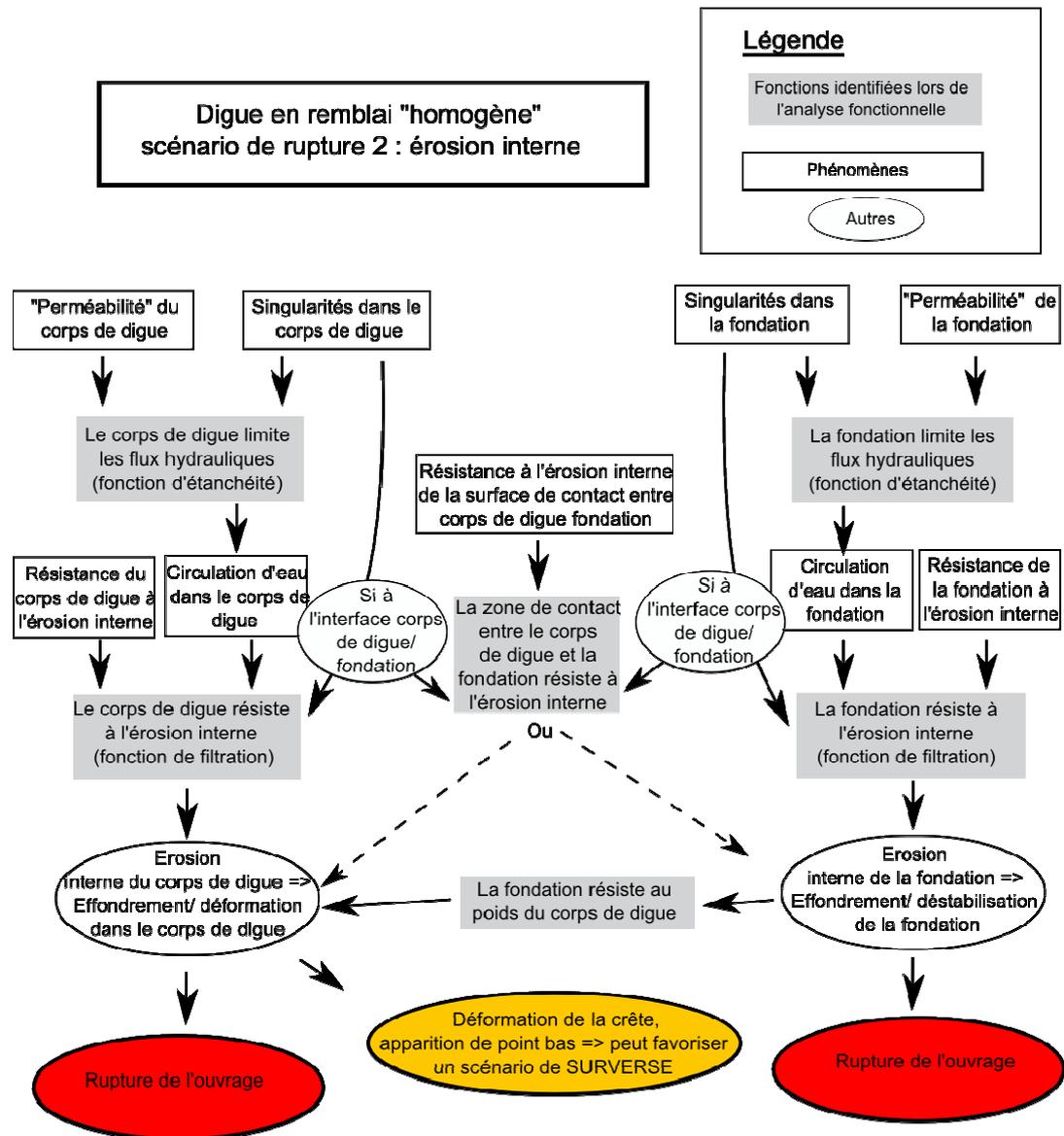
COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	INDICATEUR	MOYEN DE DETECTION
7 Lawage transversant								
	1 - résister aux sollicitations mécaniques 1. résister au poids du corps de digue 2. résister au poids propre de la protection de talus côté cours d'eau 3. résister au poids propre de la crête transmis par le corps de digue 4. résister aux sous pressions en provenance de la fondation 5. résister au cisaillement 6. résister au développement des racines	la fonction "résistance aux sollicitations mécaniques" est dégradée ou est défaillante	Etat intrinsèque de composant - Entretien Processus conception-réalisation - composition Etat intrinsèque de composant - état	état de l'ouvrage type d'ouvrage entretien	observation visuelle élement de suivi TV observation visuelle élement de conception observation visuelle documents de suivi	Flux hydrauliques - eaux d'infiltration dans le corps de digue Etat intrinsèque de composant - érosion	traces d'humidités/fuites observation de particules dans les eaux de fuite dépôts post-crue fontis	observation visuelle observation visuelle
	2 - préparer les surfaces de contact 1. préparer la surface de contact avec le corps de digue 2. préparer la surface de contact avec la fondation 3. préparer la surface de contact avec la protection de talus côté cours d'eau	la fonction "préparer les surfaces de contact" est dégradée ou est défaillante	Processus conception-réalisation - composition	type de protection contexte morpho-dynamique	observation visuelle observation visuelle	Flux hydrauliques - eaux d'infiltration dans le corps de digue Etat intrinsèque de composant - érosion	traces d'humidités/fuites observation de particules dans les eaux de fuite dépôts post-crue fontis	observation visuelle observation visuelle

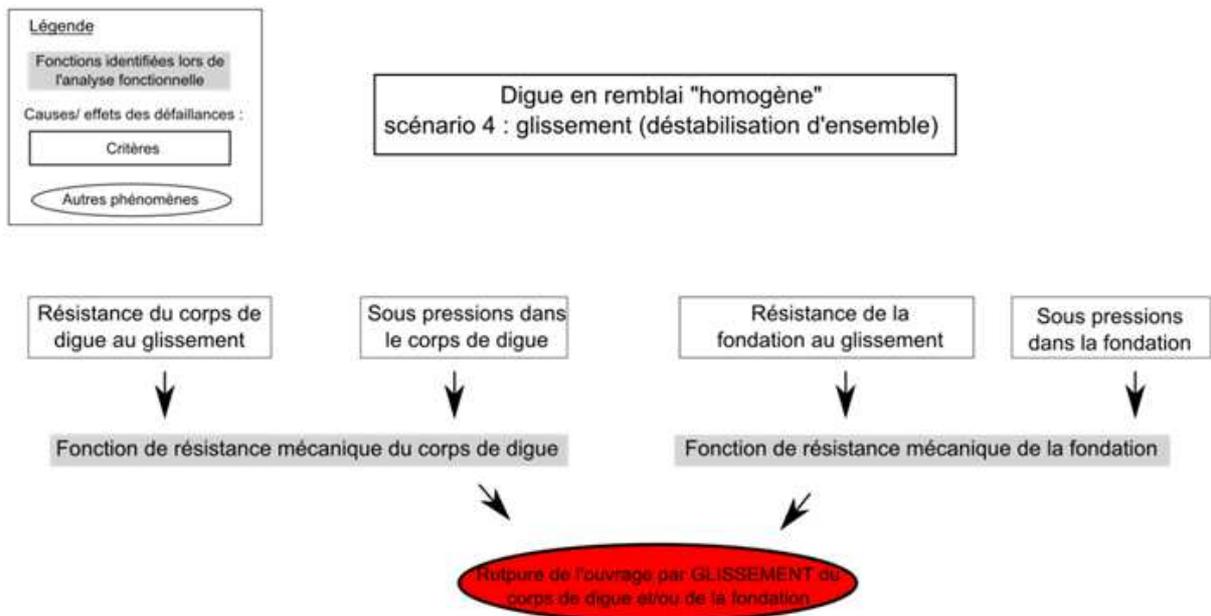
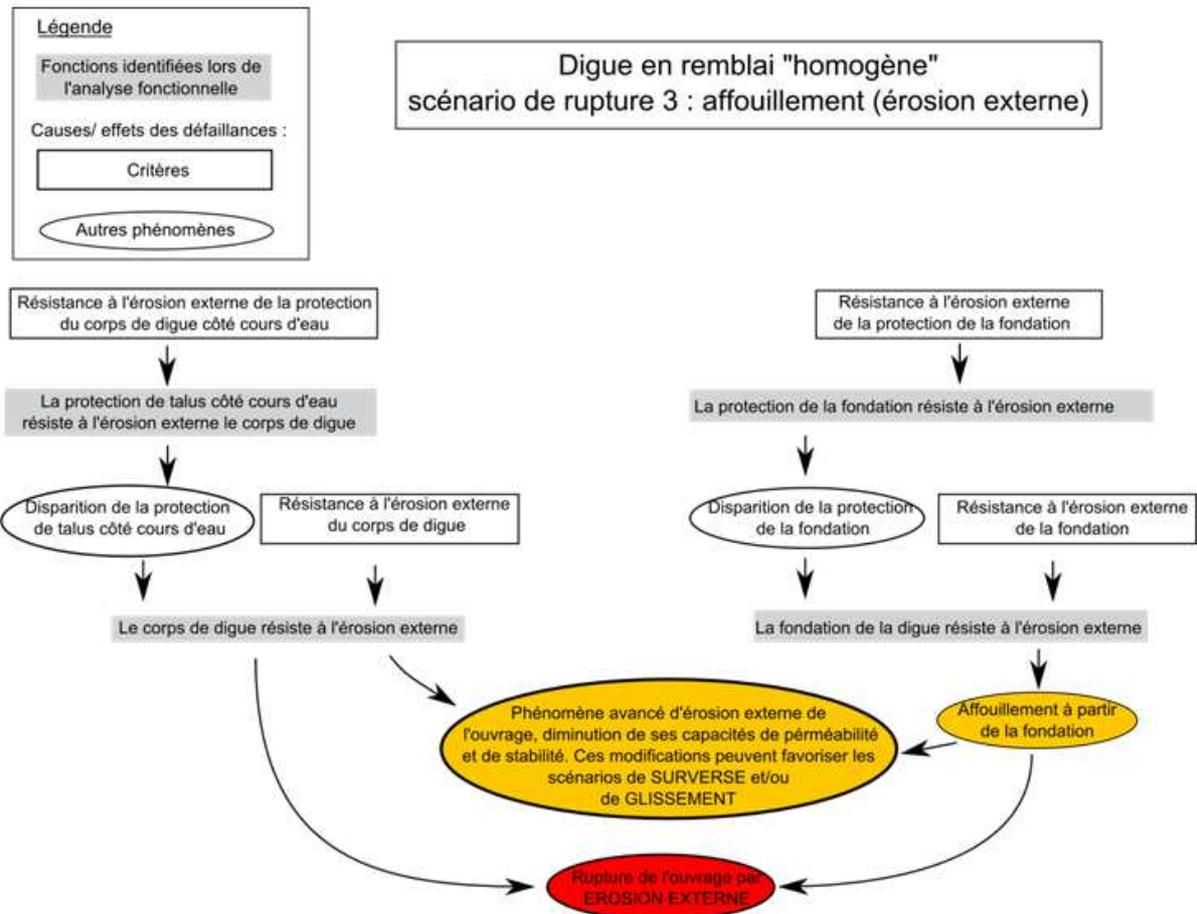
Annexe E – Scénarios de rupture des digues en remblai homogène

Cette annexe contient les scénarios de rupture des digues fluviales en remblai homogènes sous la forme de graphes causaux. Nous présentons les scénarios relatifs à chaque mécanisme de rupture des digues :

- surverse ;
- érosion interne ;
- affouillement ;
- glissement.







Annexe F – Critères et indicateurs d'état pour les digues en remblai homogène

Nous présentons dans cette annexe les résultats du travail de recueil de l'expertise réalisé pour identifier les informations nécessaires au renseignement des indicateurs d'état et des critères.

S'appuyant sur les résultats de l'AMDE nous avons systématiquement identifié et listé :

- les critères d'évaluation des digues ;
- les indicateurs d'état des digues ;
- les informations nécessaires au renseignement des indicateurs d'état et des critères ;
- les sources possibles de ces informations.

Ce travail s'inscrit comme un préalable à l'intégration future du modèle probabiliste d'évaluation de la performance des digues dans un outil d'aide au diagnostic SIG (Système d'Information Géographique).

Nous présentons les résultats pour l'ensemble des mécanismes de rupture des digues présentés dans la partie 1 du mémoire (cf. § 2.2).

Annexe F - Critère et indicateurs d'état pour les digues en remblai homogène

<i>Critères (Ci)</i>	<i>Indicateur d'états (IE)</i>	<i>Informations nécessaires</i>	<i>Sources</i>
C _{1, EI} - Perméabilité du corps de digue	Perméabilité du matériau	Mesure de perméabilité	Sondages tarière, pelle mécanique, tube
		Perméabilité verticale	Zonage géophysique
		Perméabilité horizontale	Essai/caractérisation laboratoire
		Estimation de la granulométrie	Essai de perméabilité in situ
		Estimation du compactage	Pénétromètre
		Disposition des matériaux Variabilité des matériaux Durée de la crue	Etude hydraulique/ hydrologique
C _{1, EI} - Perméabilité du corps de digue	Géométrie	Géométrie : hauteur/ largeur base et crête, prise en compte singularités type maison/cave	Levé topographique
	Fuites (eau claire)	Crue d'observation	Inspection en crue
		Modalité d'observation	Inspection post-crue
		Débit (grosse fuite, filet d'eau...) Position (bas de talus, mi-hauteur...)	Témoignage
Etanchéité de la protection amont	Type de protection (perré, bitume etc.)	Inspection visuelle	
	Disposition (rôle d'étanchéité prévu) Signes de dégradation (desjointement, pierre manquante; fissure, morceaux emportés)	Dossier d'ouvrage Reconnaitances géophysiques	
C _{2, EI} - Résistance du corps de digue à l'érosion interne	Composition du remblai, sensibilité à l'érosion interne	Continuité granulométrique	Sondages tarière, pelle mécanique, tube
		Respect des règles de filtres	Essai/caractérisation laboratoire
		Mesure résistance à l'érosion Hétérogénéité (intrinsèque)	Essai érosion interne Pénétromètre
C _{2, EI} - Résistance du corps de digue à l'érosion interne	Discontinuités du remblai	Etales de construction de l'ouvrage	Données historiques
		Brèches rebouchées	Inspection visuelle Zonage géophysique
C _{2, EI} - Résistance du corps de digue à l'érosion interne	Gradients critiques versus gradient de la crue	Géométrie	Levé topographique
	Durée de la crue	Durée de la crue	Etude hydraulique/ hydrologique
	Fontis	Evolutions remarquées	Inspection visuelle
		Taille (diamètre)	
	Fuites chargées/ indications de fuites (eaux chargées, évolution eau claire)	Crue d'observation	Inspection post-crue
		Débit (grosse fuite, filet d'eau...) Position (bas de talus, mi-hauteur...)	Inspection en crue
Evolution Dépôts Turbidités		Témoignage	
C _{3, EI} - Singularités dans le corps de digue	Terriers	Position	Inspection visuelle
		Espèce	Etude spécialiste
		Géométrie du corps de digue	
C _{3, EI} - Singularités dans le corps de digue	Arbres/ Racines	Position sur la digue (pied, talus...)	Inspection visuelle
		Substrat (granulaire/ cohésif)	Etude spécialiste
		Etat sanitaire (dépérissant...)	Levé topographique
		Espèce (Robinier, saule...) Géométrie (épaisseur corps de digue)	
C _{3, EI} - Singularités dans le corps de digue	Ouvrage traversant	Nature (PVC, béton, fonte, etc...)	Inspection visuelle
		Fonction (gaz, eau sous-pression)	Recensements
		Etat (de 0 à 10) Position (pied de talus, en cavalier)	Reconnaitances géophysiques ITV
C _{3, EI} - Singularités dans le corps de digue	Contacts entre le corps de digue et les ouvrages traversant (conditions de pose)	Règles de l'art	Inspection visuelle
			Plan, dossier d'ouvrage Sondages tarière, pelle mécanique, tube

Critères, indicateurs d'état, informations et sources pour le mécanisme de rupture par érosion interne (1/2)

Annexe F - Critère et indicateurs d'état pour les digues en remblai homogène

Critères (Ci)	Indicateur d'états (IE)	Informations nécessaires	Sources
C _{4, EI} - Perméabilité de la fondation de la digue	Perméabilité du matériau	Test de perméabilité	Sondages tarière, pelle mécanique, tube
		Perméabilité verticale	Zonage géophysique
		Perméabilité horizontale	Essai/caractérisation laboratoire
		Estimation de la granulométrie	Essai de perméabilité in situ
Géométrie	Géométrie : hauteur/ largeur, prise en compte singularités	Estimation du compactage	Pénétromètre
		Disposition des matériaux	Carte géologique
		Variabilité des matériaux	
		Durée de la crue	Etude hydraulique/ hydrologique
Fuites/ résurgences/ venues d'eau (claire)	Débit Position		Levé topographique Clisimètre
			Inspection post-crue Inspection en crue Témoignages
			Inspection visuelle Dossier d'ouvrage Reconnaisances géophysiques
Etanchéité de la protection amont	Type de protection (perré, bitume etc.) Disposition (rôle d'étanchéité prévu) Signes de dégradation (desjointement, pierre manquante; fissure, morceaux emportés)		Inspection visuelle Dossier d'ouvrage Reconnaisances géophysiques
Composition de la fondation, sensibilité à l'érosion interne	Continuité granulométrique (O/N) Respect des règles de filtres (O/N) Essai d'érosion Hétérogénéité (intrinsèque)		Sondages tarière, pelle mécanique, tube Essai/caractérisation laboratoire Essai érosion interne Pénétromètre
Hétérogénéités/ discontinuités dans la fondation	Paléochenal Brèches rebouchées		Données historique Inspection visuelle Reconnaisances géophysiques Dossier d'ouvrage
C _{5, EI} - Résistance de la fondation à l'érosion interne	Gradients critiques versus gradient de la crue	Géométrie	Levé topo, clisimètre
		Paramètres géotechniques idem perméabilité, à préciser	Idem perméabilité, à préciser
		Durée de la crue et de la décrue	Etude hydraulique/ hydrologique
		Fontis	Inspection visuelle
Fuites/ résurgences/ venues d'eau (eaux chargées)	Débit (grosse fuite, filet d'eau...) Position (bas de talus, mi-hauteur...) Evolution Dépôts Turbidités		Inspection post-crue Inspection en crue
Karst	Sensibilité du substratum aux phénomènes karstiques		Carte géologique Reconnaisances géophysiques
Terriers	Position Espèce Géométrie de la fondation		Inspection visuelle Etude spécialiste
C _{6, EI} - Singularités dans la fondation de la digue	Arbres/ Racines	Position sur la digue	Inspection visuelle
		Substrat	Etude spécialiste
		Etat sanitaire	
		Espèce Géométrie	
Ouvrages traversant	Nature (PVC, béton, fonte, etc...) Fonction (gaz, eau sous-pression) Etat (de 0 à 10) Position		Inspection visuelle Recensements Reconnaisances géophysiques ITV
Contacts entre le corps de digue et les ouvrages traversant (conditions de pose)	Règles de l'art		Inspection visuelle Plan Dossier d'ouvrage Géotechnique compactage tranchée
C _{7, EI} - Résistance de la digue à la suffusion de contact corps de digue/ fondation	Différence de granulométrie entre le corps de digue et la fondation	Discontinuité	Sondages tarière, pelle mécanique, tube
		Granulométrie corps de digue	Zonage géophysique
		Granulométrie fondation	Essai/caractérisation laboratoire Pénétromètre
Gradients critiques versus gradient de la crue	Géométrie		Levé topographique
Durée de la crue et de la décrue	Durée de la crue		Etude hydraulique/ hydrologique
Fuites chargées/ indications de fuites (eaux chargées)	Débit Position Evolution Dépôts Turbidités		Inspection visuelle Inspection en crue
Terriers	Espèce/ profondeur de la galerie Largeur de la digue		Inspection visuelle
Arbres/ Racines	Position sur la digue Substrat Etat sanitaire Espèce Géométrie		Inspection visuelle Etude spécialiste
C _{8, EI} - Singularités à l'interface corps de digue/ fondation	Ouvrages traversant	Nature (PVC, béton, fonte, etc...)	Inspection visuelle
		Fonction (gaz, eau sous-pression)	Recensements
		Etat (par plage de valeur)	Reconnaisances géophysiques ITV
Contacts entre le corps de digue et les ouvrages traversant (conditions de pose)	Règles de l'art tranchée Règles de l'art rebouchage au dessus de la tranchée		Inspection visuelle Plan Dossier d'ouvrage

Critères, indicateurs d'état, informations et sources pour le mécanisme de rupture par érosion interne (1/2)

Annexe F - Critère et indicateurs d'état pour les digues en remblai homogène

<i>Critères (Ci)</i>	<i>Indicateur d'états (IE)</i>	<i>Informations nécessaires</i>	<i>Sources</i>
	Profil en long de la crête de digue	Profil longitudinal de la crête de digue	Levé topographique
C _{1, s} - Niveau altimétrique de la crête de digue	Ligne d'eau de la crue	Hauteur d'eau de la crue modélisée	Limnimètres et limnigraphes Données historiques Modèles hydrauliques Relevés post-crués
C _{2, s} - Facteurs d'embâcles	Ponts, seuils	Limitation locale du débit Effet embâcle	Carte Inspection visuelle
	Présence d'embâcles	Type de corps flottant	Caractéristiques du bassin versant Bois flottants observés lors de crués
C _{3, s} - Présence de points bas, (non pris en compte lors du levé topographique)	Points bas localisé	Différentiel de hauteur Concentration des écoulements	Inspection visuelle Données historiques
C _{4, s} - Fonctionnement du (des) déversoir(s)	Absence d'obstruction/ fonctionnalité du déversoir	Banquette fusible C _{1, s} - Niveau altimétrique de la crête de digue	Inspection visuelle Inspection visuelle en crue Documentation technique Expertise
	Durée de la crue	Durée de la crue/ surverse	Hydrologie
C _{5, s} - Résistance à la surverse des protections de la crête de digue, du talus et pied de talus côté zone protégée	Hauteur du talus aval	Géométrie : hauteur et pente	Inspection visuelle Levé topographique
	Erodabilité de la crête	Nature revêtement et/ ou de la surface Etat	Inspection visuelle
	Erodabilité des matériaux du talus côté zone protégée	Nature revêtement et/ ou de la surface Etat	Inspection visuelle
	Erodabilité des matériaux du pied de talus aval	Nature revêtement et/ ou de la surface Etat	Inspection visuelle
	Irrégularités géométriques	Situation de chute en pied ou tête de digue	Inspection visuelle Levé topographique
C _{6, s} - Résistance du corps de digue à la surverse	Durée de la crue et de la décrue	Durée de la crue/ surverse	Hydrologie
	Hauteur du talus aval	Géométrie : hauteur et pente	Inspection visuelle Levé topographique
	Erodabilité du corps de digue	Nature des matériaux Granulométrie Hétérogénéité Résistance à l'érosion	Idem que perméabilité/ résistance à l'érosion interne
	Irrégularités géométriques	Situation de chute en pied ou tête de digue	Inspection visuelle Levés topographiques

Critères, indicateurs d'état, informations et sources pour le mécanisme de rupture par surverse

Annexe F - Critère et indicateurs d'état pour les digues en remblai homogène

Critères (Ci)	Indicateur d'états (IE)	Informations	Sources
C _{1,gr} -Résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau	Type de protection	Type de protection Disposition	Inspection visuelle Dossier d'ouvrage Sondage
	Vitesse locale d'écoulement	Vitesse en m/s Turbulence (souche, etc.)	Etude hydraulique Inspection visuelle
	Embâcles érosifs	Type d'embâcle Taille	Historique Observation en crue
	Etat de la protection	Signes de dégradation Avancement de la dégradation	Inspection visuelle Observation post crue
C _{2,gr} -Résistance à l'érosion externe du corps de digue	Résistance mécanique du remblai	granulométrie Compactage	Reconnaisances géotechniques
	Vitesse locale d'écoulement	Vitesse en m/s	Etude hydraulique Etude hydrologique
	Embâcles érosifs	Type d'embâcle	Historique Observation en crue
	Avancement de l'érosion du corps de digue	Constat d'affouillement Evolution du phénomène	Inspection visuelle Observation post crue
C _{3,gr} -Résistance à l'érosion externe de la protection de la fondation	Type de protection	Type de protection Disposition	Inspection visuelle Dossier d'ouvrage Reconnaisances géotechniques/Géophysiques
	Vitesse locale d'écoulement	Vitesse en m/s Turbulence (souche, etc.)	Etude hydraulique Inspection visuelle
	Embâcles érosifs	Type d'embâcle	Historique Observation en crue
	Etat de la protection	Signes de dégradation Avancement de la dégradation	Inspection visuelle Observation post crue
	Contexte morpho-dynamique, tendances du cours d'eau	Contexte Evolution	Bathymétrie Rapport expert Analyse photos aériennes diachroniques Carte géologique
C _{4,gr} -Résistance à l'érosion de la fondation	Résistance mécanique du remblai	Granulométrie Compactage	Géotechnique (idem perméabilité)
	Vitesse locale d'écoulement	Vitesse en m/s	Etude hydraulique Etude hydrologique
	Embâcles érosifs	Type d'embâcle	Historique Observation en crue
	Avancement de l'érosion du corps de digue	Constat d'affouillement Evolution du phénomène	Inspection visuelle Observation post crue
	Contexte morpho-dynamique, tendances du cours d'eau	Contexte Evolution	Bathymétrie Rapport expert Analyse photos aériennes diachroniques Carte géologique

Critères, indicateurs d'état, informations et sources pour le mécanisme de rupture par affouillement

Annexe F - Critère et indicateurs d'état pour les digues en remblai homogène

Critères (Ci)	Indicateur d'états (IE)	Informations	Sources
C _{1, GM} -Résistance du corps de digue au glissement à la décrue	Géométrie de la digue	Pente talus amont	Levé topographique Levé clisimètre Indicateur de performance affouillement
	Caractéristique mécanique des sols	Nature des sols Identification des sols Poids volumique des sols Caractéristiques de cisaillement	Sondages Essais laboratoire Essais in situ Zonage géophysique Essais de cisaillement
C _{2, GM} -Sous pressions dans le corps de digue	Perméabilité du remblai	Nature des sols Granulométrie Hétérogénéité	test de perméabilité Sondages Essai laboratoire Essais in situ
C _{3, GM} -Résistance de la fondation au glissement à la décrue	Géométrie de la digue	Pente talus amont	Levé topographique Levés clisimètre Indicateur de performance affouillement
	Caractéristique mécanique des sols	Nature des sols Identification des sols Poids volumique des sols Caractéristiques de cisaillement	Sondages Essais laboratoire Essais in situ Zonage géophysique Essais de cisaillement
C _{4, GM} -Sous pressions dans la fondation	Perméabilité du remblai	Nature des sols Granulométrie Hétérogénéité	Test de perméabilité Sondages Essai laboratoire Essais in situ

Critères, indicateurs d'état, informations et sources pour le mécanisme de rupture par glissement amont

Annexe F - Critère et indicateurs d'état pour les digues en remblai homogène

Critères (Ci)	Indicateur d'états (IE)	Informations nécessaires	Sources
C _{1, GV} -Résistance du corps de digue au glissement	Géométrie de la digue	Largeur, hauteur Pente talus aval	Levé topographique Levé clisimètre Indicateur de performance affouillement
	Caractéristique mécanique des sols	Nature des sols Identification des sols (<i>argile</i>) Poids volumique des sols Caractéristiques de cisaillement	Sondages Essais laboratoire Essais in situ Zonage géophysique Essais de cisaillement
C _{2, GV} -Sous pressions dans le corps de digue	Fuites	Crue d'observation Modalité d'observation Débit (grosse fuite, filet d'eau..) Position (bas de talus, mi-hauteur..)	Inspection en crue Inspection post-crue Témoignage
	Piézomètre	Piézométrie	Piézomètre pour une crue donnée
	Géométrie	Géométrie : hauteur/ largeur, prise en compte singularités	Levé topo, clisimètre
C _{3, GV} -Résistance de la fondation au glissement	Perméabilité du remblai	Nature des sols Granulométrie Hétérogénéité	Test de perméabilité Sondages Essai laboratoire Essais in situ
	Géométrie de la digue	Largeur, hauteur Pente talus aval	Levé topographique Levé clisimètre Indicateur de performance affouillement
C _{4, GV} -Sous pressions dans la fondation	Caractéristique mécanique des sols	Nature des sols Identification des sols (<i>argile</i>) Poids volumique des sols Caractéristiques de cisaillement	Sondages Essais laboratoire Essais in situ Zonage géophysique Essais de cisaillement
	Fuites	Crue d'observation Modalité d'observation Débit (grosse fuite, filet d'eau..) Position (bas de talus, mi-hauteur..)	Inspection en crue Inspection post-crue Témoignage
C _{4, GV} -Sous pressions dans la fondation	Piézomètre	Piézométrie	Piézomètre pour une crue donnée
	Géométrie	Géométrie : hauteur/ largeur, prise en compte singularités	Levé topo, clisimètre
	Perméabilité du remblai	Nature des sols Granulométrie Hétérogénéité	Test de perméabilité Sondages Essai laboratoire Essais in situ

Critères, indicateurs d'état, informations et sources pour le mécanisme de rupture par glissement aval

Annexe G – Construction d'indicateurs de performance pour les digues en remblai homogène

Dans cette annexe, nous proposons des indicateurs de performance pour chaque mécanisme de rupture des digues. Nous formulons une méthode de construction de critère unique de synthèse en combinant des opérateurs d'agrégation selon des fonctions analytiques.

Chaque indicateur de performance construit permet d'évaluer la performance d'un profil transversal de digue représentatif d'un tronçon de constitution et de sollicitation homogène.

Nous présentons les principes de formulation des indicateurs de performance, les indicateurs de performance développés pour chaque mécanisme de rupture. Des cas test fictifs sont présentés pour chaque indicateur de performance afin d'illustrer les procédures d'agrégations proposées.

1. Proposition de méthodologie et formalisation pour la construction d'indicateurs de performance

1.1 Notation

$C_{i, M}$ est un $i^{\text{ème}}$ critère ($i = 1, 2, \dots, n$) du mécanisme M (M parmi surverse, érosion interne, affouillement, glissement amont ou glissement aval).

$C_{j, M}$ est un $j^{\text{ème}}$ critère ($j = 1, 2, \dots, n$) du mécanisme M (M parmi les mécanismes de surverse, érosion interne, affouillement, glissement). Soit un profil ponctuel repéré par son abscisse x du linéaire de digue, nous notons :

- $C_{j, M}(x)$ l'évaluation du critère j du mécanisme M au point x du linéaire de digue ;
- $A_{k, M}(x)$ le score de l'agrégation k constitutive du mécanisme M ;
- H un opérateur d'agrégation parmi Min, Max, Moy ou Moy-P ;
- $IP_M(x)$ le score de performance pour le mécanisme M au point métrique x du linéaire de digue.

1.2 Principes de construction des indicateurs de performance

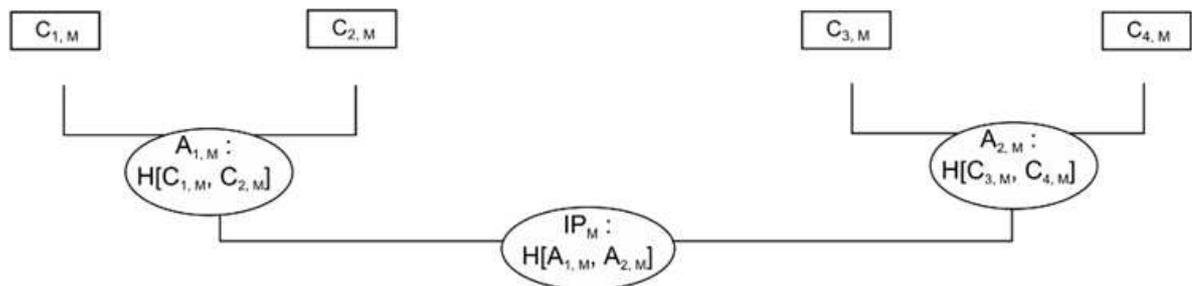
L'évaluation du critère unique de synthèse est réalisée par des étapes d'agrégations intermédiaires notées $A_{k, M}$ où A est la $k^{\text{ième}}$ agrégation ($k=1, 2, \dots, n$) de critères associée à une séquence fonctionnelle du mécanisme M.

Dans le cas d'un mécanisme M comprenant k agrégations ($k = 1, \dots, n$) de critères, nous écrivons une agrégation quelconque de critères au sein de M de la façon suivante :

$$A_{k, M}(x) = H [C_{1, M}(x), \dots, C_{j, M}(x)]$$

Nous écrivons la formulation du calcul du critère unique de synthèse, noté IP (indicateur de performance), de la manière suivante :

$$IP_M(x) = H [A_{1, M}(x), \dots, A_{k, M}(x)]$$



Principe de construction du critère unique de synthèse pour l'évaluation de la performance des digues

2. Proposition d'agrégation des critères pour la construction de l'indicateur de performance « rupture par érosion interne »

2.1 Liste des critères relatifs au scénario de rupture par érosion interne

Critères relatifs au corps de digue :

- C_{1, EI} - Perméabilité du corps de digue
- C_{2, EI} - Résistance du corps de digue à l'érosion interne
- C_{3, EI} - Singularités dans le corps de digue

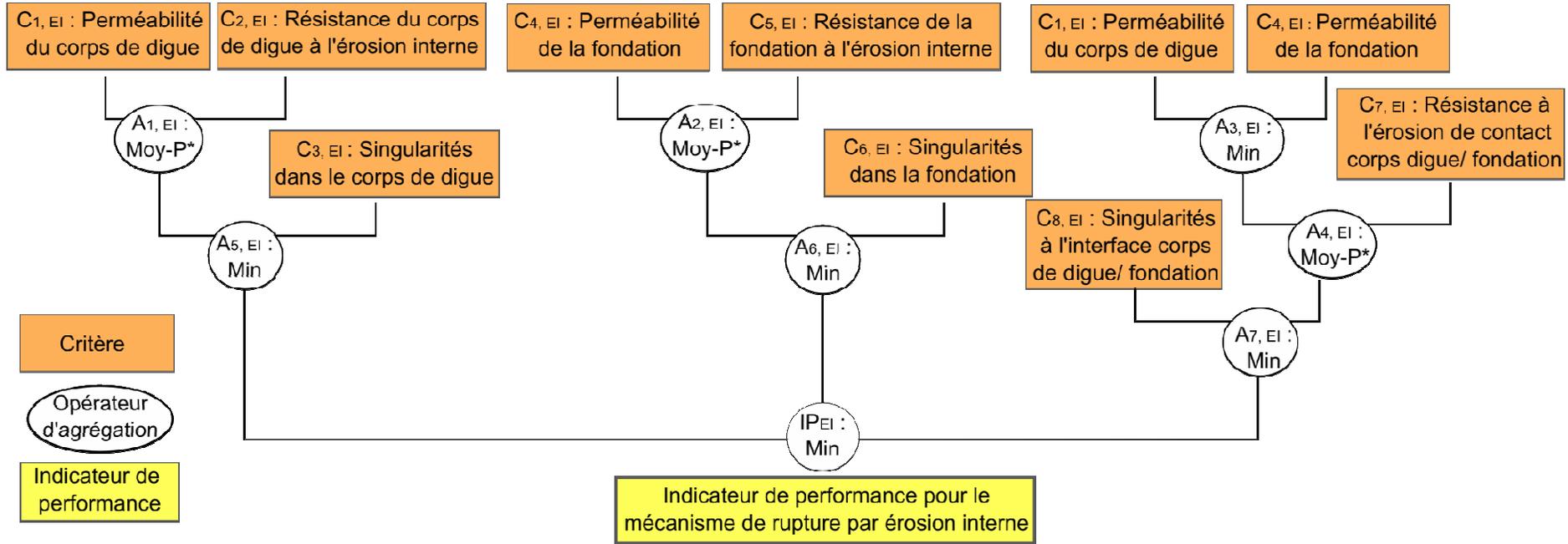
Critères relatifs à la fondation :

- C_{4, EI} - Perméabilité de la fondation
- C_{5, EI} - Résistance de la fondation à l'érosion interne
- C_{6, EI} - Singularités dans la fondation

Critères relatifs à l'interface corps de digue/fondation :

- C_{7, EI} - Résistance de la digue à l'érosion de contact corps de digue/ fondation
- C_{8, EI} - Singularités à l'interface corps de digue/ fondation

2.2 Proposition d'agrégation des critères pour la construction de l'indicateur de performance « rupture par érosion interne »



Structure d'agrégation proposée pour l'indicateur de performance du mécanisme de rupture par érosion interne

*Moy-P correspond à une moyenne pondérée 1/3 pour C_{1, EI}, C_{4, EI} et A₃, et 2/3 pour C_{2, EI}, C_{5, EI} et C_{7, EI}.

Où

$$A_{1, EI}(x) = \text{Moy-P} [C_{1, EI}(x), C_{2, EI}(x)] = \text{Moy} [(1/3) C_{1, EI}(x), (2/3) C_{2, EI}(x)]$$

$$A_{2, EI}(x) = \text{Moy-P} [C_{4, EI}(x), C_{5, EI}(x)] = \text{Moy} [(1/3) C_{4, EI}(x), (2/3) C_{5, EI}(x)]$$

On considère que lors de l'initiation et du développement d'un phénomène d'érosion interne, les caractéristiques de perméabilité des ouvrages sont compensables par la capacité de l'ouvrage à résister à l'érosion interne.

Exemple : un remblai totalement imperméable ne craint pas de phénomène d'érosion interne puisqu'il faut que l'eau infiltre le remblai pour initier un phénomène de circulation. Inversement une digue faite d'enrochements non liés est totalement perméable, mais présente une résistance à l'érosion interne qui dans le cas d'une digue exclu toute rupture.

Lors des réunions du comité d'expertise il a été admis que pour l'évaluation du phénomène d'érosion interne la résistance à l'érosion interne était plus importante que la perméabilité du remblai.

Nous proposons donc une moyenne pondérée avec les coefficients suivant : 1/3 pour les critères renseignant la perméabilité du remblai, et 2/3 pour les critères renseignant la résistance à l'érosion interne. Cette pondération pourra être amenée à être affinée ultérieurement.

$$A_{3, EI}(x) = \text{Min} [C_{1, EI}(x), C_{4, EI}(x)]$$

Pour le phénomène d'érosion de contact à l'interface corps de digue/fondation, on détermine d'abord quelles sont les conditions d'infiltration d'eau dans le corps de digue et dans la fondation. On utilise un Min entre les critères « perméabilité du corps de digue et perméabilité de la fondations », retenant ainsi l'évaluation la plus défavorable.

$$A_{5, EI}(x) = \text{Min} [A_{1, EI}(x), C_{3, EI}(x)]$$

$$A_{6, EI}(x) = \text{Min} [A_{2, EI}(x), C_{6, EI}(x)]$$

$$A_{7, EI}(x) = \text{Min} [A_{4, EI}(x), C_{8, EI}(x)]$$

Les évaluations $A_{1, EI}$, $A_{2, EI}$ et $A_{4, EI}$ modélisent l'estimation du remblai à résister à un phénomène d'érosion interne respectivement pour les composant d'ouvrages suivant : corps de digue, fondation et interface corps de digue/ fondation. Pour chaque élément on agrège ces évaluations avec les critères évaluant la présence de singularité dans l'ouvrage.

On propose pour cette séquence d'agrégation un Min. Pour l'occurrence et le développement d'un phénomène d'érosion interne on ne retiendra donc que le plus mauvais score entre l'évaluation des caractéristiques propres d'un élément et l'évaluation d'une singularité qui y serait présente.

$$IP_{EI}(x) = \text{Min} [A_{5, EI}(x), A_{6, EI}(x), A_{7, EI}(x)]$$

L'agrégation finale de l'indicateur de performance retient la note la plus défavorable entre le risque d'érosion interne à partir du corps de digue : $A_{5, EI}(x)$, de la fondation $A_{6, EI}(x)$, ou de l'interface corps de digue / fondation $A_{7, EI}(x)$.

2.3 Exemples tests (cas fictifs)

Indicateur de performance pour le scénario d'érosion interne									
Critères scénario de rupture par érosion interne									
Cas (1) : Digue de la CNR. Constituée de graviers, elle est très perméable, mais résiste bien au phénomène d'érosion interne	Scores des critères	Formulations des agrégations intermédiaires (1)	Scores des agrégations intermédiaires (1)	Formulations des agrégations intermédiaires (2)	Scores des agrégations intermédiaires (2)	Formulation de l'agrégation intermédiaire (3)	Score de l'agrégation intermédiaire (3)	Formulation de l'agrégation finale de l'indicateur de performance	Score de l'indicateur de performance
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	3	$A1, EI(x) = \text{Moy-P} [C1, EI(x), C2, EI(x)]$	6,3	$A5, EI(x) = \text{Min} [A1, EI(x), C3, EI(x)]$	6,3		6,3	$IP_{EI}(x) = \text{Min} [A5, EI(x), A6, EI(x), A7, EI(x)]$	6,3
C2, EI : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	8		6,3						
C3, EI : Singularités dans le corps de digue	9		9						
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	3	$A2, EI(x) = \text{Moy-P} [C4, EI(x), C5, EI(x)]$	6,3	$A6, EI(x) = \text{Min} [A2, EI(x), C6, EI(x)]$	6,3	6,3			
C5, EI : Résistance de la fondation à l'érosion interne	8		6,3						
C6, EI : Singularités dans la fondation de la digue	9		9						
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	3	$A3, EI(x) = \text{Min} [C1, EI(x), C4, EI(x)]$	3	$A4, EI(x) = \text{Moy-P} [A3, EI(x), C7, EI(x)]$	6,3	$A7, EI(x) = \text{Min} [A4, EI(x), C8, EI(x)]$	6,3		
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	3		3						
C7, EI : Résistance de la digue à la suffusion de contact corps de digue/ fondation	8		8						
C8, EI : Singularités interface corps de digue/ fondation	9				9				
Cas (2) : digue constituée de matériaux fins peu perméables, bonne géométrie ; présence de grandes discontinuités dans le remblai causée par de nombreux travaux au cours du temps									
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	8	$A1, EI(x) = \text{Moy-P} [C1, EI(x), C2, EI(x)]$	5,3	$A5, EI(x) = \text{Min} [A1, EI(x), C3, EI(x)]$	5,3		5,3	$IP_{EI}(x) = \text{Min} [A5, EI(x), A6, EI(x), A7, EI(x)]$	5,3
C2, EI : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	4		5,3						
C3, EI : Singularités dans le corps de digue	9		9						
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	8	$A2, EI(x) = \text{Moy-P} [C4, EI(x), C5, EI(x)]$	5,3	$A6, EI(x) = \text{Min} [A2, EI(x), C6, EI(x)]$	5,3	5,3			
C5, EI : Résistance de la fondation à l'érosion interne	4		5,3						
C6, EI : Singularités dans la fondation de la digue	9		9						
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	8	$A3, EI(x) = \text{Min} [C1, EI(x), C4, EI(x)]$	8	$A4, EI(x) = \text{Moy-P} [A3, EI(x), C7, EI(x)]$	5,3	$A7, EI(x) = \text{Min} [A4, EI(x), C8, EI(x)]$	5,3		
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	8		8						
C7, EI : Résistance de la digue à la suffusion de contact corps de digue/ fondation	4		4						
C8, EI : Singularités interface corps de digue/ fondation	9				9				

Annexe G - Construction d'indicateurs de performance pour les digues en remblai homogène

Cas (3) : corps de digue peu perméable, faible résistance à l'érosion interne, fondation mauvaise perméabilité bonne résistance à l'érosion interne => granulométries différentes à l'interface	Scores des critères	Formulations des agrégations intermédiaires (1)	Scores des agrégations intermédiaires(1)	Formulations des agrégations intermédiaires (2)	Scores des agrégations intermédiaires (2)	Formulation de l'agrégation intermédiaire (3)	Score de l'agrégation intermédiaire (3)	Formulation de l'agrégation finale de l'indicateur de performance	Score de l'indicateur de performance
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	7	A1, EI (x) = Moy-P [C1, EI(x), C2, EI (x)]	5	A5, EI (x) = Min [A1, EI (x), C3, EI (x)]	5		5	IPEI (x) = Min [A5, EI (x), A6, EI (x)A7, EI (x)]	2,3
C2, EI : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	4								
C3, EI : Singularités dans le corps de digue	8								
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	3	A2, EI (x) = Moy-P [C4, EI (x), C5, EI (x)]	6,3	A6, EI (x) = Min [A2, EI (x), C6, EI (x)]	6,3	6,3			
C5, EI : Résistance de la fondation à l'érosion interne	8								
C6, EI : Singularités dans la fondation de la digue	8		8						
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	7	A3, EI (x) = Min [C1, EI (x), C4, EI (x)]	3	A4, EI (x) = Moy-P [A3, EI (x), C7, EI (x)]	2,3	A7, EI (x) = Min [A4, EI (x), C8, EI (x)]	2,3		
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	3								
C7, EI : Résistance de la digue à la suffusion de contact corps de digue/ fondation	2		2						
C8, EI : Singularités interface corps de digue/ fondation	8				8				
Cas (4) : corps de digue de "qualité très moyenne", fondation satisfaisante, présence de singularités de type terriers dans le corps de digue et en fondation	Scores des critères	Formulations des agrégations intermédiaires (1)	Scores des agrégations intermédiaires(1)	Formulations des agrégations intermédiaires (2)	Scores des agrégations intermédiaires (2)	Formulation de l'agrégation intermédiaire (3)	Score de l'agrégation intermédiaire (3)	Formulation de l'agrégation finale de l'indicateur de performance	Score de l'indicateur de performance
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	5	A1, EI (x) = Moy-P [C1, EI(x), C2, EI (x)]	5,7	A5, EI (x) = Min [A1, EI (x), C3, EI (x)]	3		3	IPEI (x) = Min [A5, EI (x), A6, EI (x)A7, EI (x)]	3
C2, EI : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	6								
C3, EI : Singularités dans le corps de digue	3								
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	6	A2, EI (x) = Moy-P [C4, EI (x), C5, EI (x)]	6,7	A6, EI (x) = Min [A2, EI (x), C6, EI (x)]	5	5			
C5, EI : Résistance de la fondation à l'érosion interne	7								
C6, EI : Singularités dans la fondation de la digue	5		5						
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	5	A3, EI (x) = Min [C1, EI (x), C4, EI (x)]	5	A4, EI (x) = Moy-P [A3, EI (x), C7, EI (x)]	5,7	A7, EI (x) = Min [A4, EI (x), C8, EI (x)]	3		
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	6								
C7, EI : Résistance de la digue à la suffusion de contact corps de digue/ fondation	6		6						
C8, EI : Singularités interface corps de digue/ fondation	3				3				

3 Proposition d'agrégation des critères pour la construction de l'indicateur de performance « rupture par affouillement »

3.1 Liste des critères relatifs au scénario de rupture par affouillement (érosion externe)

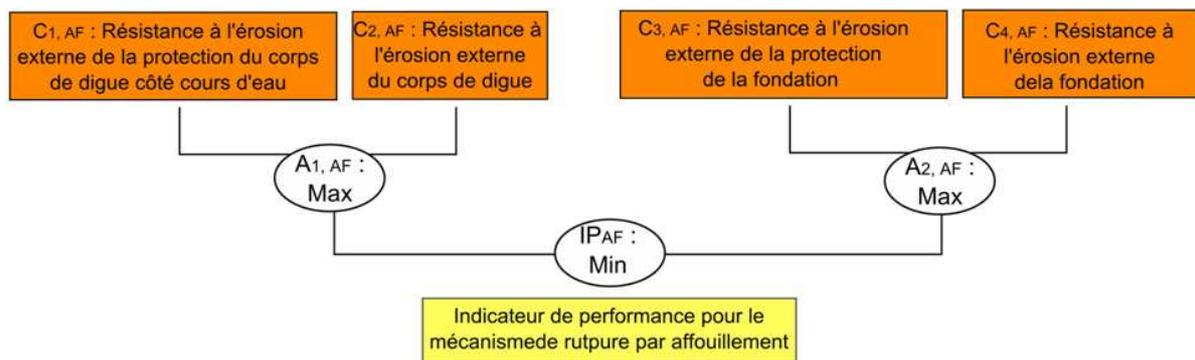
$C_{1, AF}$ - Résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau

$C_{2, AF}$ - Résistance à l'érosion externe du corps de digue

$C_{3, AF}$ - Résistance à l'érosion externe de la protection de la fondation

$C_{4, AF}$ - Résistance à l'érosion de la fondation

3.2 Proposition d'agrégation des critères pour la construction de l'indicateur de performance « rupture par affouillement »



Structure d'agrégation proposée pour l'indicateur de performance du mécanisme de rupture par affouillement

Où :

$$A_{1, AF}(x) = \text{Max} [C_{1, AF}(x), C_{2, AF}(x)]$$

$$A_{2, AF}(x) = \text{Max} [C_{3, AF}(x), C_{4, AF}(x)]$$

On suppose qu'il faut que deux conditions soient réunies pour qu'un élément de la digue (corps de digue ou fondation) puisse provoquer une rupture par affouillement :

- Que la protection de l'élément ne résiste pas au contexte d'affouillement ;
- Que l'élément lui-même ne résiste pas au contexte d'affouillement.

On propose donc de retenir la note la plus favorable des deux, par l'intermédiaire de l'opérateur Max.

$$IP(x) = \text{Min} [A_{1, AF}(x), A_{2, AF}(x)]$$

On suppose qu'un phénomène d'affouillement peut provoquer la rupture de la digue au niveau du corps de digue ou de la fondation. On propose donc de retenir l'opérateur Min et de garder ainsi la note la plus défavorable des deux.

3.3 Exemples tests (cas fictifs)

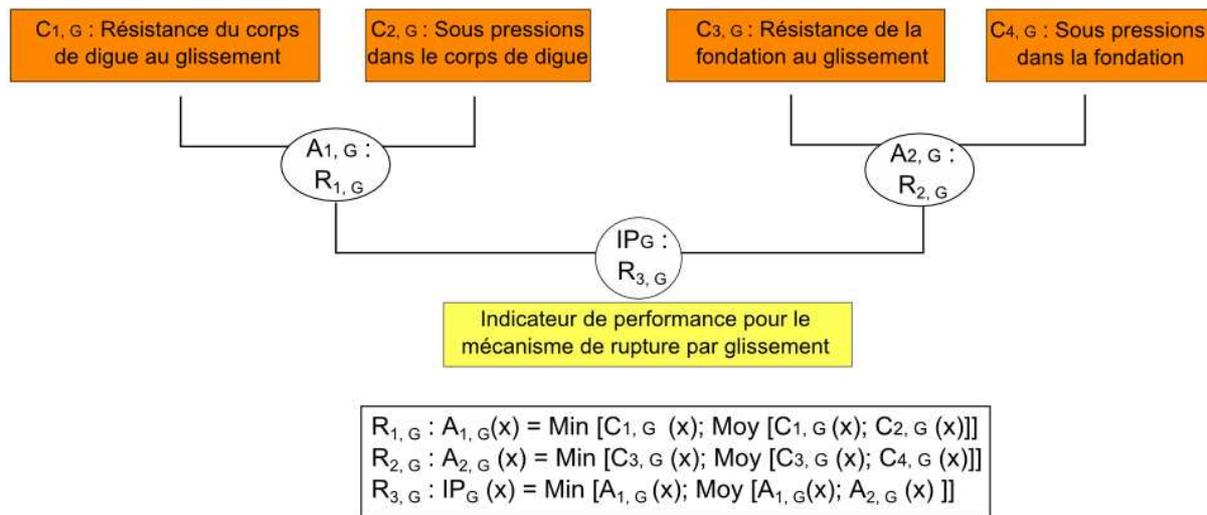
Indicateur de performance pour le scénario de rupture par affouillement					
Critères scénario d'affouillement					
Cas (1) : une digue en remblai homogène protégée par un perré non encreé en fondation, dans un contexte d'évolution morphodynamique très défavorable	Scores des critères	Formulations des agrégations intermédiaires	Scores des agrégations intermédiaires	Formulation de l'agrégation finale de l'indicateur de performance	Score de l'indicateur de performance
C1, AF : Résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau	7	$A1, AF(x) = \text{Max}[C1, AF(x), C2, AF(x)]$	7	$IPAF(x) = \text{Min}[A1, AF(x), A2, AF(x)]$	1
C2, AF : Résistance à l'érosion externe du corps de digue	5		1		
C3, AF : Résistance à l'érosion externe de la protection de la fondation	0	$A2, AF(x) = \text{Max}[C3, AF(x), C4, AF(x)]$			
C4, AF : Résistance à l'érosion de la fondation	1				
Cas (2) : une digue avec ségonnal montre des signes d'affouillements en pied de talus consécutifs à une crue récente	Scores des critères	Formulations des agrégations intermédiaires	Scores des agrégations intermédiaires	Formulation de l'agrégation finale de l'indicateur de performance	Score de l'indicateur de performance
C1, AF : Résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau	0	$A1, AF(x) = \text{Max}[C1, AF(x), C2, AF(x)]$	4	$IPAF(x) = \text{Min}[A1, AF(x), A2, AF(x)]$	4
C2, AF : Résistance à l'érosion externe du corps de digue	4		9		
C3, AF : Résistance à l'érosion externe de la protection de la fondation	0	$A2, AF(x) = \text{Max}[C3, AF(x), C4, AF(x)]$			
C4, AF : Résistance à l'érosion de la fondation	9				
Cas (3) : contexte hydro géomorphologique défavorable, digue bien protégée avec parafouille et perré	Scores des critères	Formulations des agrégations intermédiaires	Scores des agrégations intermédiaires	Formulation de l'agrégation finale de l'indicateur de performance	Score de l'indicateur de performance
C1, AF : Résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau	8	$A1, AF(x) = \text{Max}[C1, AF(x), C2, AF(x)]$	8	$IPAF(x) = \text{Min}[A1, AF(x), A2, AF(x)]$	8
C2, AF : Résistance à l'érosion externe du corps de digue	4		10		
C3, AF : Résistance à l'érosion externe de la protection de la fondation	10	$A2, AF(x) = \text{Max}[C3, AF(x), C4, AF(x)]$			
C4, AF : Résistance à l'érosion de la fondation	3				

4 Proposition d'agrégation des critères pour la construction de l'indicateur de performance « rupture par glissement amont » et de l'indicateur de performance « rupture par glissement aval ».

4.1 Liste des critères relatifs au scénario de rupture par glissement

- C_{1,G} - Résistance du corps de digue au glissement
- C_{2,G} - Sous-pressions dans le corps de digue
- C_{3,G} - Résistance de la fondation au glissement
- C_{4,G} - Sous-pressions dans la fondation

4.2 Proposition d'agrégation des critères pour la construction de l'indicateur de performance « rupture par glissement »



Structure d'agrégation proposée pour l'indicateur de performance du mécanisme de rupture par glissement

Où :

$$A_{1,G}(x) = \text{Min} [C_{1,G}(x); \text{Moy} [C_{1,G}(x), C_{2,G}(x)]]$$

$$A_{2,G}(x) = \text{Min} [C_{3,G}(x); \text{Moy} [C_{3,G}(x), C_{4,G}(x)]]$$

On propose de faire la moyenne entre les critères de résistance au glissement et de présence de sous-pression, et de ne retenir que le score le plus défavorable entre cette moyenne et le

score de résistance au glissement. La procédure est la même pour le corps de digue et pour la fondation.

$$IP_G(x) = \text{Min} [A_{1,G}(x), \text{Moy} (A_{1,G}(x), A_{2,G}(x))]$$

On suppose qu'un phénomène de glissement peut faire rompre la digue, qu'il se développe au niveau du corps de digue ou de la fondation. Le corps de digue étant plus susceptible de faire l'objet d'un glissement que la fondation, nous proposons cependant de faire une moyenne entre les agrégations A1 et A2 et de retenir pour l'indicateur de performance le score le plus défavorable entre A1 et cette moyenne.

Indicateur de performance pour le scénario de rupture par glissement Aval

Critères scénario de glissement

Cas (1 Aval) : Corps de digues ne satisfaisant pas les règles de l'art, sous pression dans le corps de digue et en fondation	Scores des critères	Scores des agrégations intermédiaires	Score de l'indicateur de performance
C1, G : Résistance du corps de digue au glissement	3		
C2, G : Sous pressions dans le corps de digue	2	2,5	
C3, G : Résistance de la fondation au glissement	5		2,5
C4, G : Sous pressions dans la fondation	2	3,5	

Indicateur de performance pour le scénario de rupture par glissement Amont

Critères scénario de glissement

Cas Amont : corps de digue ne satisfaisant pas les règles de l'art, absence supposée de sous pressions ; fondation plutôt satisfaisante	Scores des critères	Scores des agrégations intermédiaires	Score de l'indicateur de performance
C1, G : Résistance du corps de digue au glissement	3		
C2, G : Sous pressions dans le corps de digue	7	3	
C3, G : Résistance de la fondation au glissement	7		3
C4, G : Sous pressions dans la fondation	7	7	

5 Proposition d'agrégation des critères pour la construction de l'indicateur de performance « rupture par surverse ».

5.1 Liste des critères relatifs au scénario de rupture par surverse

$C_{1,s}$ -niveau altimétrique de la crête de digue

$C_{2,s}$ -facteurs d'embâcles

$C_{3,s}$ -fonctionnement du (des) déversoir (s)

$C_{4,s}$ -présence de points bas

$C_{5,s}$ -résistance à la surverse des protections de la crête, du talus et du pied de talus côté zone protégée

$C_{6,s}$ -résistance du corps de digue à la surverse

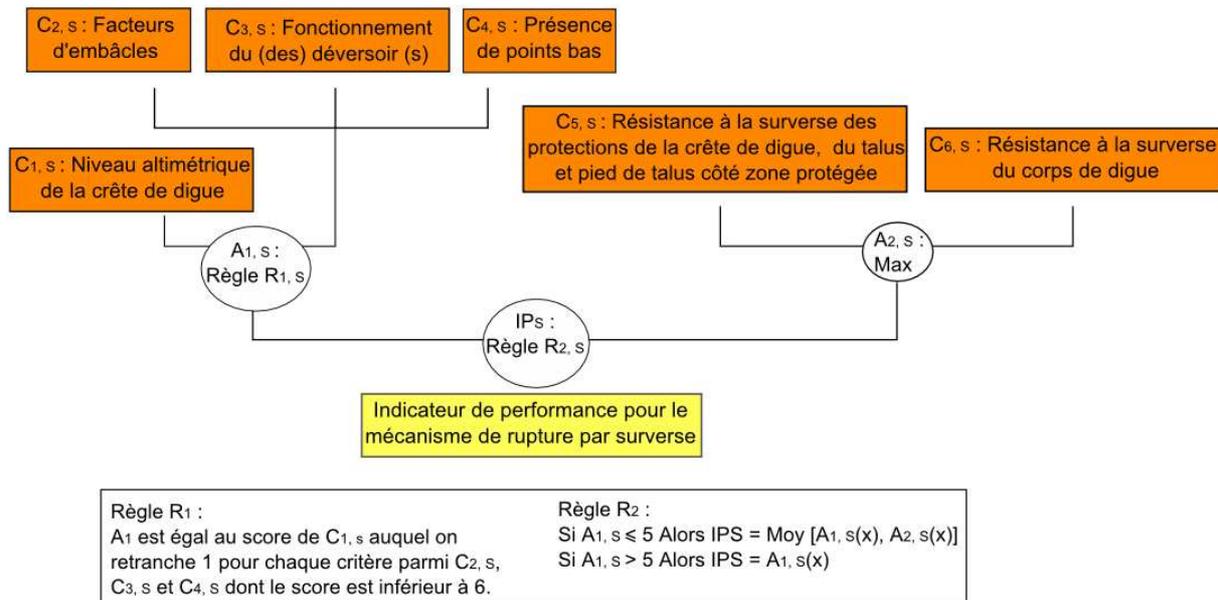
5.2 Particularité, interaction entre les critères $C_{1,s}$, $C_{2,s}$, $C_{3,s}$ et $C_{4,s}$

Le critère $C_{1,s}$ -niveau altimétrique de la crête de digue modélise l'apparition ou non du phénomène de surverse. On propose que la note du critère $C_{1,s}$ -niveau altimétrique de la crête de digue soit directement déterminée à partir de ΔZ , revanche de l'ouvrage par rapport à une crue de protection souhaitée.

Notation critère $C_{1,s}$ "niveau altimétrique de la crête de digue"		
Note $C_{1,s}$	ΔZ : différence entre la hauteur de la crête de digue et la ligne d'eau de la crue de référence	Phénomène
0	$\Delta Z \leq - 50 \text{ m}$	Phénomène de surverse
1-2	$- 50 \text{ cm} < \Delta Z \leq - 25 \text{ cm}$	
3-4	$- 25 \text{ cm} < \Delta Z \leq - 0 \text{ cm}$	
5	$0 \text{ cm} > \Delta Z \geq 25 \text{ cm}$	Pas de surverse
6-7	$25 \text{ cm} > \Delta Z \geq 50 \text{ cm}$	
8-9	$50 \text{ cm} > \Delta Z \geq 100 \text{ cm}$	
10	$100 \text{ cm} > \Delta Z$	

Le score de $C_{1,s}$ peut-être aggravé par la présence de facteurs d'embâcles (pont, corps flottants volumineux etc.), le dysfonctionnement de déversoirs et/ ou la présence de points bas, tout trois relevés lors d'inspections visuelles, expertises ou études de documents. On propose la règle R1 (cf. 1.5.3 ci-dessous) pour modéliser les interactions entre les critères $C_{1,s}$, $C_{2,s}$, $C_{3,s}$ et $C_{4,s}$.

5.3 Proposition d'agrégation des critères pour la construction de l'indicateur de performance « rupture par surverse »



Structure d'agrégation proposée pour l'indicateur de performance du mécanisme de rupture par surverse

Où :

$$A_{1,s}(x) = R_1 [C_{1,s}(x), C_{2,s}(x), C_{3,s}(x), C_{4,s}(x)]$$

Avec R₁ telle que :

A_{1,s}(x) est égale au score de C_{1,s}(x) auquel on retranche un point pour chaque critère parmi C_{2,s}(x), C_{3,s}(x), C_{4,s}(x) dont le score est de 5 ou inférieur. Cette règle propose d'évaluer la possible influence des facteurs d'embâcles, dysfonctionnement des déversoirs et/ ou de la présence de points bas, lorsqu'ils ne sont pas pris en compte par la modélisation hydraulique ou le relevé topographique (critère C_{1,s}).

$$A_{2,s}(x) = \text{Max} [C_{5,s}(x), C_{6,s}(x)]$$

On propose de retenir le Max, nous gardons donc la meilleure des évaluations entre la résistance au phénomène de surverse du corps de digue ou de la protection du corps de digue.

$$IP_s(x) = R_2 [A_{1,s}(x), A_{2,s}(x)]$$

Avec R₂ telle que :

$$\text{Si } A_{1,s} \leq 5 \text{ Alors } IP_s(x) = \text{Moy} [A_{1,s}(x), A_{2,s}(x)]$$

$$\text{Si } A_{1,s} > 5 \text{ Alors } IP_s(x) = A_{1,s}(x)$$

L'objectif des règles est de conditionner les agrégations et la valeur de l'indicateur de performance selon l'estimation qu'il y ait surverse ou pas. Dans le cas où il n'y a pas de surverse il est inutile de faire intervenir la résistance au phénomène de surverse de la digue. Dans le cas où il y a surverse, la prise en compte de la résistance à la surverse est relative à l'ampleur de la surverse, c'est pourquoi on propose une compensation entre les deux évaluations.

5.4 Exemples tests (cas fictifs)

Indicateur de performance pour le scénario de rupture par surverse								
Rappel des règles d'agrégations								
Règle R1			Règle R2					
A1 = C1, s(x) - α où α est le nombre de critères inférieurs ou égaux à 5 parmi C2, s(x); C3, s(x) et C4, s(x).			Si A1, s \leq 5 : IPs (x) = Moy [A1, s(x), A2, s(x)] Si A1, s > 5 : IPs (x) = A1, s(x)					
Critères scénario de surverse								
Cas (1) : la digue surverse de 20 cm, elle ne connaît pas de points bas, mais on note la présence d'embâcles et un déversoir hors d'usage susceptibles d'aggraver le phénomène de surverse. La résistance de l'ouvrage à l'érosion par surverse est faible		Scores des critères	Formulation des agrégations intermédiaires	Scores des agrégations intermédiaires	Score de l'indicateur de performance	Score de l'indicateur de performance		
C1, s : Niveau altimétrique de la crête de digue	3	A1, s (x) = R1 [C1, s (x), C2, s(x), C3, s(x), C4, s(x)]	1	IPs (x) = R2 [A1, s (x), A2, s (x)]	2,5			
C2, s : Facteurs d'embâcles	1							
C3, s : Fonctionnement du (des) déversoir (s)	0							
C4, s : Présence de points bas	9							
C5, s : Résistance des protections de la crête, du talus ZP et résistance du pied aval à la surverse	4	A2, s (x) = Max [C5, s(x), C6, s(x)]	4					
C6 s : Résistance du corps de digue à la surverse	2							
Cas (2) : la digue possède une revanche de 20 cm par rapport à la crue de protection souhaitée, un point bas se trouve au droit de l'évaluation, enfin le profil est jugé capable de résister à une surverse limitée		Scores des critères	Formulation des agrégations intermédiaires			Scores des agrégations intermédiaires	Score de l'indicateur de performance	Score de l'indicateur de performance
C1, s : Niveau altimétrique de la crête de digue	5	A1, s (x) = R1 [C1, s (x), C2, s(x), C3, s(x), C4, s(x)]	4			IPs (x) = R2 [A1, s (x), A2, s (x)]	4	
C2, s : Facteurs d'embâcles	6							
C3, s : Fonctionnement du (des) déversoir (s)	8							
C4, s : Présence de points bas	3							
C5, s : Résistance des protections de la crête, du talus ZP et résistance du pied aval à la surverse	4	A2, s (x) = Max [C5, s(x), C6, s(x)]	4					
C6 s : Résistance du corps de digue à la surverse	2							
Cas (3) : le niveau de la crête de digue est 1,3 mètres plus haut que la crue de protection souhaitée, la digue présente un point bas important, enfin la digue est jugée très faiblement résistante au phénomène de surverse		Scores des critères	Formulation des agrégations intermédiaires			Scores des agrégations intermédiaires	Score de l'indicateur de performance	Score de l'indicateur de performance
C1, s : Niveau altimétrique de la crête de digue	10	A1, s (x) = R1 [C1, s (x), C2, s(x), C3, s(x), C4, s(x)]	7			IPs (x) = R2 [A1, s (x), A2, s (x)]	7	
C2, s : Facteurs d'embâcles	4							
C3, s : Fonctionnement du (des) déversoir (s)	4							
C4, s : Présence de points bas	2							
C5, s : Résistance des protections de la crête, du talus ZP et résistance du pied aval à la surverse	4	A2, s (x) = Max [C5, s(x), C6, s(x)]	4					
C6 s : Résistance du corps de digue à la surverse	2							
Cas (4) : la digue surverse de 50 cm, cependant la géométrie et la constitution de l'ouvrage offre une protection relative certaine à l'érosion par surverse.		Scores des critères	Formulation des agrégations intermédiaires			Scores des agrégations intermédiaires	Score de l'indicateur de performance	Score de l'indicateur de performance
C1, s : Niveau altimétrique de la crête de digue	0	A1, s (x) = R1 [C1, s (x), C2, s(x), C3, s(x), C4, s(x)]	0			IPs (x) = R2 [A1, s (x), A2, s (x)]	3	
C2, s : Facteurs d'embâcles	5							
C3, s : Fonctionnement du (des) déversoir (s)	6							
C4, s : Présence de points bas	6							
C5, s : Résistance des protections de la crête, du talus ZP et résistance du pied aval à la surverse	4	A2, s (x) = Max [C5, s(x), C6, s(x)]	6					
C6 s : Résistance du corps de digue à la surverse	6							

Annexe H – Recensement des formes d'imperfections prises en compte dans le modèle

Nous présentons dans cette annexe les résultats du travail de recensement des formes d'imperfections que l'ingénieur devra prendre en compte dans l'évaluation des critères. Nous choisissons de retenir les formes d'imperfection suivantes :

- l'incertitude, aléatoire et épistémique, qui regroupe les phénomènes aléatoires, la variabilité naturelle, les données insuffisantes, les hypothèses de modélisation ou les erreurs de mesures ;
- l'imprécision, liée au langage ou au matériel de mesure.

L'incomplétude est envisagée comme un cas extrême d'incertitude et d'imprécision. Elle ne sera donc pas prise en compte de manière distincte.

Le recensement est réalisé au niveau des indicateurs d'état, jalons intermédiaires entre les données « brutes » et les critères.

Nous proposons d'utiliser une échelle de notation pour quantifier la présence d'imprécision ou d'incertitude pour chaque indicateur d'état et d'affecter ensuite une pondération au score obtenu, en fonction de l'importance de l'indicateur d'état dans l'évaluation du critère.

L'échelle permet d'affecter à chaque forme d'imperfection des indicateurs d'état une note comprise entre 0 et 3 (0 traduisant l'absence de la forme d'imperfection et 3 traduisant une présence potentielle de la forme d'imperfection très importante).

Pour tenir compte de l'importance relative des formes d'imperfection d'un indicateur d'état dans l'évaluation d'un critère, on affecte à chaque indicateur d'état une seconde note relative à son poids dans l'évaluation du critère, selon une échelle comprise entre 1 et 3 (1 traduisant une importance faible et 3 traduisant une importance maximum).

Cette démarche nous permet de connaître un ordre de grandeur de la part relative des formes d'imperfection que doivent prendre en compte les critères d'évaluation des digues intervenant dans le modèle.

Annexe H - Recensement des formes d'imperfections prises en compte dans le modèle

<i>Critères (Ci)</i>	<i>Indicateurs d'états (IE)</i>	Imperfections des indicateurs d'état				Imperfections des critères		
		Incertitude	Imprécision	Poids	Incertitude pondérée	Imprécision pondérée	Incertitude	Imprécision
"Perméabilité" du corps de digue	Perméabilité du matériau	3	1	3	9	3		
	Géométrie : hauteur/largeur	1	1	2	2	2		
	Fuites	3	1	3	9	3	21	9
	Etanchéité de la protection amont	1	1	1	1	1		
Singularités dans le corps de digue	Terriers	3	1	3	9	3		
	Racines	3	2	2	6	4		
	Ouvrages traversants	3	2	3	9	6	33	16
	Contacts entre le corps de digue et les ouvrages	3	1	3	9	3		
Résistance du corps de digue à l'érosion interne	Composition du remblai	3	1	3	9	3		
	Hétérogénéité du remblai	3	1	3	9	3		
	Durée de la crue et de la décrue	2	2	3	6	6	33	15
	Fuites chargées/ indications de fuites chargées	3	1	3	9	3		
"Perméabilité" de la fondation de la digue	Perméabilité du matériau	3	1	3	9	3		
	Géométrie	0	0	3	0	0	10	4
	Etanchéité de la protection amont	1	1	1	1	1		
Singularités dans la fondation de la digue	Karst	2	1	3	6	3		
	Terriers	3	1	3	9	3		
	Racines	3	2	2	6	4		
	Ouvrages traversants	3	2	3	9	6	39	19
	Contact entre le corps de digue et les ouvrages traversants	3	1	3	9	3		
Résistance de la fondation à l'érosion interne	Composition de la fondation	3	1	3	9	3		
	Hétérogénéité des matériaux de la fondation	3	1	3	9	3		
	Durée de la crue et de la décrue	2	2	3	6	6	33	15
	Fuites chargées/ indications de fuites chargées	3	1	3	9	3		
Résistance de la digue à la suffusion de contact corps de digue/ fondation	Différence de granulométrie entre le corps de digue et la fondation	1	1	3	3	3		
	Durée de la crue et de la décrue	2	2	3	6	6	18	12
	Fuites chargées/ indications de fuites chargées	3	1	3	9	3		
Somme							187	90

Recensement des imperfections pour l'indicateur de performance du mécanisme de rupture par érosion interne

Annexe H - Recensement des formes d'imperfections prises en compte dans le modèle

Critères (Ci)	Indicateurs d'états (IE)	Imperfections des indicateurs d'état					Imperfections des critères	
		Incertitude	Imprécision	Poids	Incertitude pondérée	Imprécision pondérée	Incertitude	Imprécision
Niveau altimétrique de la crête de digue	Profil en long de la crête de digue	1	1	3	3	3	9	6
	Ligne d'eau de la crue	2	1	3	6	3		
Facteurs d'embâcles	Ponts, seuils	0	2	1	0	2	3	4
	Présence d'embâcles	3	2	1	3	2		
Présence de points bas (non pris en compte dans le profil en long de la digue)	Points bas	1	2	3	3	6	3	6
Fonctionnement du (des) déversoir(s)	Absence d'obstruction/ fonctionnalité du déversoir	3	1	2	6	2	6	2
Résistance des protections de la crête, du talus ZP et résistance du pied aval à la surverse	Durée de la crue et de la décrue	1	2	2	2	4	18	17
	Erodabilité de la crête	1	1	3	3	3		
	Erodabilité des matériaux du talus ZP	1	1	2	2	2		
	Erodabilité des matériaux du pied aval	3	2	3	9	6		
	Irrégularités géométriques	1	1	2	2	2		
Résistance du corps de digue à la surverse	Erodabilité du corps de digue	3	1	1	3	1	3	1
Somme							42	36

Recensement des imperfections pour l'indicateur de performance du mécanisme de rupture par surverse

Annexe H - Recensement des formes d'imperfections prises en compte dans le modèle

Critères (Ci)	Indicateurs d'états (IE)	Imperfections des indicateurs d'état				Imperfections des critères		
		Incertitude	Imprécision	Poids	Incertitude pondérée	Imprécision pondérée	Incertitude	Imprécision
Résistance à l'érosion externe de la protection du corps de digue côté cours d'eau	Type de protection	1	2	3	3	6		
	Etat de la protection	3	2	3	9	6		
	Vitesse locale d'écoulement	1	3	3	3	9	21	23
	Embâcles érosifs	3	1	2	6	2		
Résistance à l'érosion externe du corps de digue	Résistance mécanique du remblai	3	1	3	9	3		
	Vitesse locale d'écoulement	1	3	3	3	9	21	17
	Embâcles érosifs	3	1	2	6	2		
	Avancement de l'érosion du corps de digue	1	1	3	3	3		
Résistance à l'érosion externe de la protection de la fondation	Type de protection	1	2	3	3	6		
	Etat de la protection	3	2	3	9	6		
	Vitesse locale d'écoulement	1	3	3	3	9		
	Embâcles érosifs	3	1	2	6	2	30	32
	Contexte morphodynamique, tendances du cours d'eau	3	3	3	9	9		
Résistance à l'érosion de la fondation	Résistance mécanique des matériaux constitutifs de la fondation	3	1	3	9	3	15	13
	Vitesse locale d'écoulement	1	3	3	3	9		
	Embâcles érosifs	3	1	1	3	1		
	Avancement de l'érosion de la fondation	1	1	3	3	3		
	Contexte morphodynamique, tendances du cours d'eau	3	3	3	9	9		
Somme						87	85	

Recensement des imperfections pour l'indicateur de performance du mécanisme de rupture par affouillement

Annexe H - Recensement des formes d'imperfections prises en compte dans le modèle

Critères (Ci)	Indicateurs d'états (IE)	Imperfections des indicateurs d'état					Imperfections des critères	
		Incertitude	Imprécision	Poids	Incertitude pondérée	Imprécision pondérée	Incertitude	Imprécision
Résistance du corps de digue au glissement	Géométrie de la digue	1	1	3	3	3	12	9
	Caractéristique mécanique des sols	3	2	3	9	6		
Sous pressions dans le corps de digue	Perméabilité du remblai	3	1	2	6	2	6	2
Résistance de la fondation au glissement	Géométrie de la fondation	1	1	2	2	2	11	8
	Caractéristique mécanique des sols	3	2	3	9	6		
Sous pressions dans la fondation	Perméabilité de la fondation	3	1	2	6	2	6	2
Somme							35	21

Recensement des imperfections pour l'indicateur de performance du mécanisme de rupture par glissement amont

Critères (Ci)	Indicateurs d'états (IE)	Imperfections des indicateurs d'état					Imperfections des critères	
		Incertitude	Imprécision	Poids	Incertitude pondérée	Imprécision pondérée	Incertitude	Imprécision
Résistance du corps de digue au glissement	Géométrie de la digue	1	1	3	3	3	12	9
	Caractéristique mécanique des sols	3	2	3	9	6		
Sous pressions dans le corps de digue	Fuites	3	1	3	9	3	17	7
	Piézomètre	2	2	1	2	2		
	Perméabilité du remblai	3	1	2	6	2		
Résistance de la fondation au glissement	Géométrie de la fondation	1	1	2	2	2	11	8
	Caractéristique mécanique des sols	3	2	3	9	6		
Sous pressions dans la fondation	Fuites	3	1	3	9	3	19	9
	Piézomètre	2	2	2	4	4		
	Perméabilité de la fondation	3	1	2	6	2		
Somme							59	33

Recensement des imperfections pour l'indicateur de performance du mécanisme de rupture par glissement aval

Annexe I – Manuel d’emploi des probabilités subjectives dans le modèle

Nous avons disposé dans cette annexe le manuel d’emploi des probabilités subjectives à destination des ingénieurs utilisateurs du modèle. L’objectif du manuel est de familiariser l’ingénieur à l’évaluation des critères sous la forme de densité de probabilité et limiter les biais susceptibles d’altérer l’éllicitation des paramètres d’évaluation du critère. Le manuel contient :

- Une présentation des variables à évaluer :
 - o présentation du modèle, des indicateurs d’état et des critères,
 - o présentation des formes d’imperfections des données des digues
- Une introduction à la théorie des probabilités subjectives :
 - o à quoi correspondent une probabilité et une fonction de densité de probabilité ?
 - o présentation de l’interprétation subjectiviste des probabilités.
- Une sensibilisation aux concepts des biais :
 - o présentation et définitions des principaux biais décrits dans la littérature ;
 - o exemple de manifestation de chacun des biais.
- Une explication détaillée du modèle d’évaluation de la performance et des variables à évaluer :
 - o liste et définition des critères d’évaluation des digues ;
 - o détails des indicateurs d’état, informations nécessaires et sources à considérer pour l’évaluation de chaque critère ;
 - o les formes d’imperfections modélisées par chaque critère (représentativité linéaire des données, imperfections du langage, phénomène aléatoire).

1. Description du modèle

1.1. Présentation des variables du modèle

Le modèle repose sur plusieurs variables : des indicateurs d’état, des critères et des indicateurs de performance (IP), toutes identifiées à partir de la modélisation fonctionnelle des mécanismes de rupture des digues

Les **indicateurs d’état** ont pour rôle de rassembler et de formaliser qualitativement les informations, ou données brutes, permettant de caractériser les ouvrages. (*Exemple : géométrie, constitution, désordres, etc.*). En outre, ils permettent de décomposer un linéaire de digue en tronçons de constitution et de sollicitations homogènes.

Les **critères** sont les éléments décisionnels considérés par l’ingénierie pour évaluer la performance des digues. Ils correspondent aux éléments permettant de déterminer le degré de réalisation des fonctions assignées aux composant des ouvrages, relativement à leurs caractéristiques intrinsèques, aux sollicitations lors de crues et aux phénomènes pouvant occasionner des dégradations, voire des défaillances. (*Exemple : le critère « perméabilité du corps de digue » mesure la fonction d’étanchéité du corps de digues*).

Les critères sont les variables d’entré du modèle d’évaluation de la performance des digues. Evalué par l’ingénieur sous format probabiliste, les critères permettent la prise en compte des incertitudes au sein du modèle.

Les **indicateurs de performance** renseignent de l’aptitude au service d’un tronçon de digue homogène (linéairement) pour chaque mécanisme de rupture : surverse, érosion interne, affouillement, glissement amont et glissement aval. L’évaluation probabiliste des critères permet d’attribuer des marges d’incertitudes aux résultats de performance du modèle.

1.2. Structure du modèle et rôle de l’ingénieur

Les indicateurs d’état permettent de formaliser et de rassembler les informations nécessaires à l’évaluation de chaque critère. Une fois évalués, les critères sont agrégés selon des formules analytiques propres à chaque indicateur de performance. Le modèle suit une structuration hiérarchique (Figure I-1.2).

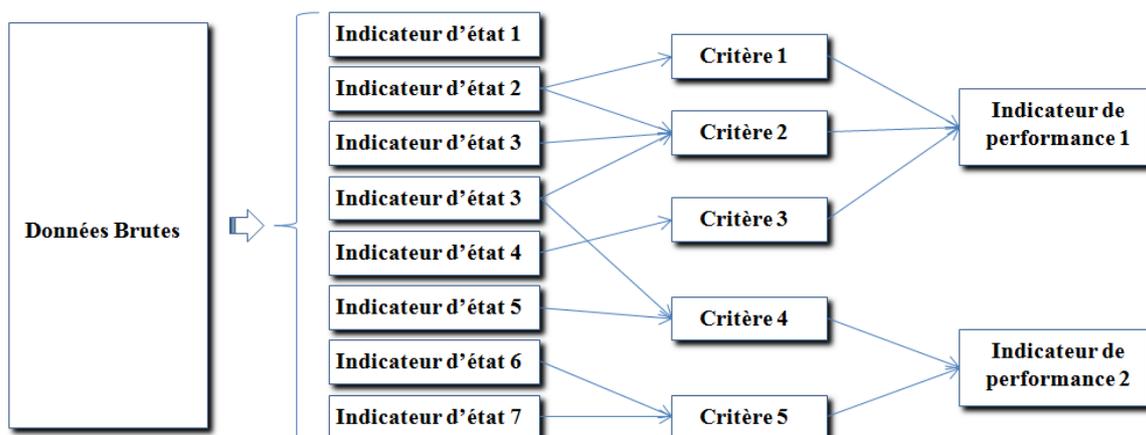


Figure I-1.2 : structure et variables du modèle

Lors de l’utilisation du modèle, **le rôle de l’ingénieur** est :

- en préliminaire, de consulter les documents disponibles et de mener une reconnaissance pédestre des ouvrages ;
- de procéder au renseignement qualitatif, ou au contrôle, des indicateurs d’état et de la segmentation spatiale des linéaires en tronçons homogènes ;
- d’évaluer les critères des tronçons homogènes sous la forme de distributions de probabilité ;
- de contrôler les résultats des indicateurs de performance calculés par le modèle et, au besoin, de réajuster l’évaluation de certains critères.

Tous les indicateurs d’état et critères sont évalués sur l’échelle d’évaluation de la performance des digues définie pour le modèle (Figure I-1.1).



Figure I-1.1 : échelle d’évaluation de la performance des digues définie pour le modèle

Cette échelle va de 0 à 10, où 0 correspond à la situation la plus critique, tandis que 10 correspond à une situation idéale.

Les indicateurs d’état ont un rôle de rassemblement, de formalisation et de stockage de l’information disponible sur les ouvrages. Renseignés linéairement, avec des repères géographiques de début et de fin, les indicateurs d’état permettent, par segmentation spatiale, de faciliter l’identification de tronçons linéairement homogènes pour chaque critère. Ainsi, lorsque l’ingénieur évalue le critère pour un tronçon homogène. L’évaluation du critère et de ses marges d’incertitudes doit être représentative de l’ensemble du tronçon homogène.

2. Données des digues est incertitudes des critères

2.1. Les données des digues

Chaque indicateur d’état synthétise des informations susceptibles de provenir de sources diverses. Les informations nécessaires au renseignement des indicateurs d’état sont des données brutes issues de mesures, d’observations, de calculs ou de documents divers entrant en compte dans les études d’ingénierie classiques : données historiques, tests de perméabilité, caractérisation des matériaux, éléments de l’examen visuel, modélisations hydrauliques, etc.

Bien que les indicateurs d’état apportent une formalisation de l’information, le principe de fonctionnement du modèle d’évaluation de la performance des digues nécessite l’intervention d’un ingénieur spécialisé. Celui-ci pourra s’appuyer sur les évaluations des indicateurs d’état mais devra également interpréter les données « brutes » disponibles sur les linéaires de digues (mesures, observations, estimations etc.) pour l’évaluation de chaque critère.

La qualité des données disponibles pour le diagnostic des digues est souvent perfectible et leur quantité est encore généralement insuffisante. L’ingénieur doit ainsi évaluer les critères en se basant sur des données imparfaites.

2.2. Imperfection des données

Plusieurs types d’imperfections entachent les données des digues : incertitudes, imprécisions et incomplétudes. L’**incertitude** correspond à un doute sur la validité d’une connaissance, elle peut-être aléatoire ou épistémique. L’incertitude aléatoire est décrite comme la variabilité,

l’incertitude stochastique. Elle est utilisée pour décrire les variations inhérentes associées à un système physique ou à l’environnement considéré. L’incertitude est relative à une connaissance imparfaite pour quelque chose qui n’est pas en elle-même aléatoire et qui est en principe susceptible d’être connue.

Exemple d’incertitude épistémique : lors d’un pile ou face non pipé, on sait qu’il y a une chance sur deux de tomber sur pile ou sur face, mais l’on ne peut pas dire avec certitude de quel côté tombera la pièce.

L’**imprécision** correspond à une difficulté dans l’énoncé d’une connaissance. On lui associe les qualificatifs du type « environ », « à peu près », « dans l’intervalle », « compris entre », « approximativement » On est certain de l’intervalle de valeurs possibles, mais on ne sait pas quelle est la valeur précise au sein de l’intervalle.

L’**incomplétude** correspond à une absence de données pour un paramètre quelconque. Elle peut aussi correspondre à une incomplétude partielle, lorsqu’il manque un point de mesure, auquel cas elle s’assimile à de l’incertitude et/ou à de l’imprécision.

2.3. Imperfection des données des digues

Exemples d’imperfections à prendre en compte dans l’évaluation des critères :

- les incertitudes aléatoires. Dans celles-ci, nous trouvons les incertitudes liées à la variabilité naturelle des propriétés des matériaux. *Exemple : nous possédons un grand nombre de mesures d’une propriété étudiée du remblai constitutif d’un corps de digue. On constate que d’un point à un autre, la propriété varie ; ceci implique, si la mesure de la propriété est considérée comme parfaite, une variabilité spatiale de cette propriété au sein du remblai. De même, pour un point donné la propriété mesurée peut varier au cours du temps à cause de mécanismes de dégradations ou de vieillissement.*
Nous trouvons également les incertitudes liées au caractère aléatoire des sollicitations hydrauliques et hydrodynamiques. *Exemple : quelle est l’occurrence d’une crue atteignant telle hauteur critique et venant impacter une digue ?*

- les incertitudes épistémiques. Dans celles-ci nous trouvons les incertitudes liées à la dissémination des investigations le long des linéaires et la représentativité des données disponibles. *Exemple : nous disposons de sondages géotechniques renseignant de la nature d’un remblai de digue dont on souhaite connaître la performance. Nous ne sommes pas certains que les sondages soient représentatifs de l’ensemble de l’ouvrage, longitudinalement comme transversalement. Nous pouvons en revanche réduire cette incertitude épistémique en augmentant le nombre de sondages.*

Nous trouvons également les incertitudes liées aux modèles, qui reposent sur des hypothèses présentant des incertitudes. *Exemple : les résultats d’une modélisation hydraulique de la ligne piézométrique au sein de la digue dépendent des hypothèses adoptées pour la perméabilité des matériaux, la durée de sollicitation des ouvrages, etc. ;*

- les imprécisions, liées aux mesures des phénomènes physiques, liées aux conditions et au format de l’inspection visuelle des ouvrages, aux imprécisions des matériels d’investigation ou aux hypothèses sur lesquelles sont basés les essais géotechniques. *Exemple : un point bas a été levé lors de l’inspection visuelle et estimé à quelques décimètres. Mais nous ne connaissons pas sa mesure exacte de dénivelé ;*
- l’incomplétude, liée au fait que les digues sont encore généralement des ouvrages mal connus. L’absence de plan de construction, la rareté des crues critiques et l’absence de

suivi des travaux, parfois même l’absence de maître d’ouvrage reconnu conduisent à un déficit général d’information.

3. Démarche de renseignement probabiliste des critères

Notre démarche consiste à ce que l’ingénieur renseigne directement les critères sous la forme de distribution de probabilité. Les distributions de probabilité sont construites à partir de paramètres élicité par l’ingénieur : la valeur la plus vraisemblable du critère, en élicitant le mode et l’intervalle des valeurs vraisemblables du critère, avec quantiles 5% et 95%, permettant d’évaluer sa dispersion.

Ainsi, l’utilisation des probabilités subjectives permet de prendre en compte l’incertitude pesant sur les évaluations des critères.

3.1. Les probabilités subjectives

La *théorie des probabilités* est une théorie mathématique utilisée pour décrire et quantifier les situations ou phénomènes caractérisés par le hasard et/ou l’incertitude (expérience aléatoire).

Un phénomène aléatoire ou une information imparfaite peuvent être considéré comme une variable aléatoire et modélisé par une loi de probabilité.

Une variable aléatoire est une fonction définie sur l’ensemble des éventualités, c’est-à-dire l’ensemble des résultats possibles d’une expérience aléatoire. Il s’agit d’une variable pouvant prendre n’importe quelle valeur d’un ensemble déterminé de valeurs numériques, et à laquelle est associée une loi de probabilité. Elle est caractérisée par sa *fonction de répartition* et par sa *densité de probabilité*.

La *loi de la variable aléatoire* X , est la mesure de probabilité de la variable aléatoire X .

Une variable aléatoire discrète (Figure I-3.1) ne prend ces valeurs que dans un ensemble fini, ou dénombrable de valeurs, ici X_n .

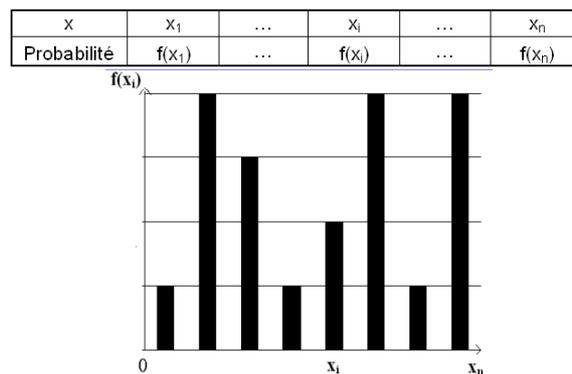


Figure I-3.1 : exemple de variable aléatoire discrète

La *fonction de répartition* d’une variable aléatoire X est l’application F_X de \mathbf{R} dans $[0,1]$ définie par :

$$F_X(x) = P(X \leq x), \forall x \in \mathbf{R}$$

Si X est une variable aléatoire continue, la loi de X est donnée par la connaissance de :

$$P(a \leq X \leq b) \forall a < b \in \mathbf{R}$$

Une variable aléatoire continue peut être modélisée par une **densité de probabilité**, suivant une loi de probabilité sous la forme d’intégrale.

La densité de probabilité (Figure I-3.2) d’une variable aléatoire X est alors une fonction $f_X(x)$ telle que :

$$P(a \leq X \leq b) = F_X(b) - F_X(a) = \int_a^b f_X(x) dx$$

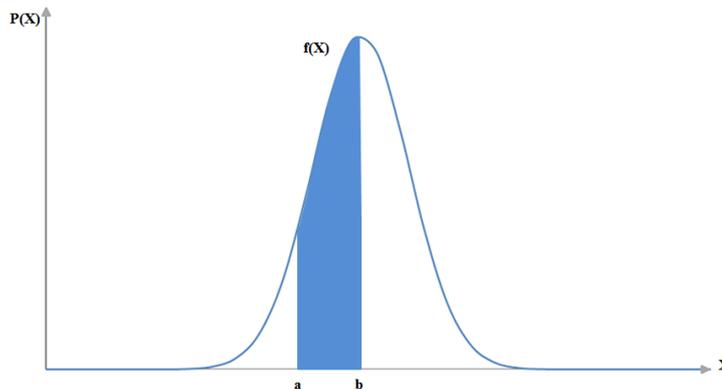


Figure I-3.2 : fonction de densité d’une loi normale

Dans le cas ci-dessus (Figure I-3.2), l’aire de la fonction de densité est égale à 1, et la probabilité que X soit sur l’intervalle $[a, b]$ est égale à la surface contenue entre cet intervalle et la courbe de la loi de probabilité (surface colorée en bleu). Aussi, b correspond au quantile 50% (médiane de la distribution), la probabilité que X soit inférieure ou supérieure à b est donc de 0,5.

Sur la figure ci-dessous (Figure I-3.3), la variable X a plus de probabilité d’être sur l’intervalle $[c, d]$, que sur aucun autre parmi $[a, b]$, $[b, c]$, $[c, d]$, $[d, f]$ et $[f, g]$, puisque c’est celui pour lequel la surface sous la courbe est la plus grande. En revanche, il y a très peu de chance que la variable soit sur l’intervalle $[f, g]$, et quasi aucune, qu’elle soit supérieure à g .

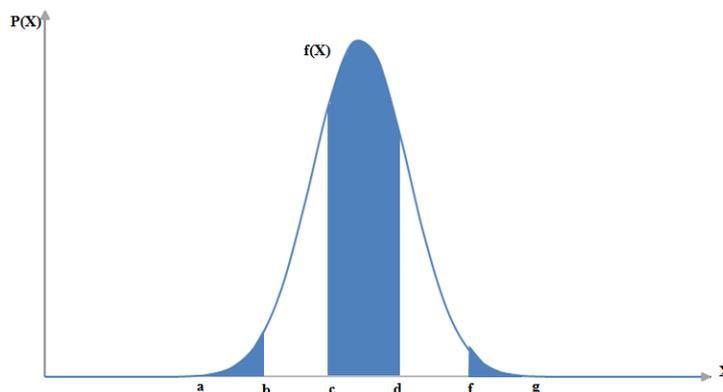


Figure I-3.3 : intervalles et densités de probabilité

L’ajustement d’une distribution par une loi de probabilité peut être effectué par différentes approches :

- à partir d’observations statistiques, lorsque l’on dispose de séries de données (Figure I-3.4) ;
- à partir d’avis experts (Figure I-3.5), lorsque l’on ne dispose pas d’assez de données et où l’on exploite directement l’évaluation « à dire d’expert ». Il s’agit du cas de l’évaluation des critères.

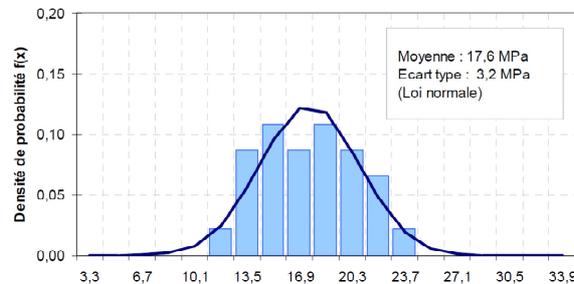


Figure I-3.4 : ajustement d’une loi normale aux données disponibles pour évaluer la résistance à la compression d’un barrage

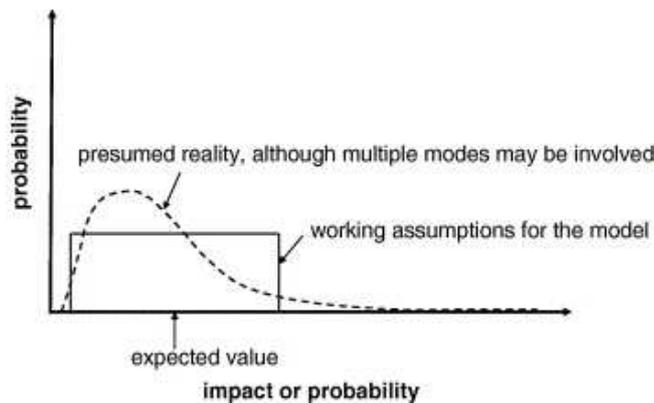


Figure I-3.5 : à partir de paramètres élicités par l’ingénieur, on peut ajuster une loi de probabilité

3.2. Démarche de renseignement des critères

Nous proposons une démarche reposant sur l’élicitation de trois paramètres : quantile 5%, quantile 95% et mode. Pour l’évaluation de chaque critère, l’ingénieur devra éliciter la valeur la plus vraisemblable du critère, soit le mode, et l’intervalle de dispersion par les quantiles 5% et 95% (Figure I-3.6).

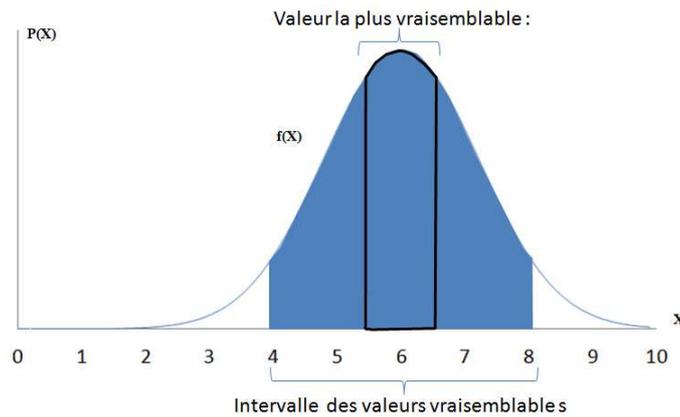


Figure I-3.6 : distribution correspondant à l’éllicitation des paramètres quantiles 5%=4, quantile 95%= 8 et mode = 6.

La dispersion représente l’intervalle des valeurs jugées vraisemblables par l’ingénieur. Elle peut être asymétrique (relativement à la valeur modale) et traduit la confiance de l’ingénieur relative à la valeur modale élicitée. Le modèle ajuste ensuite automatiquement une loi de probabilité aux paramètres élicités par l’ingénieur.

Exemple : évaluation probabiliste du critère « singularités dans le corps de digue » sur un profil de digue

L’ingénieur consulte tout d’abord les indicateurs d’état nécessaires au renseignement de ce critère : « terriers » « arbres/racines », « ouvrages traversant » et « contact entre le corps de la digue et les ouvrages traversants ». Pour le profil de digue étudié, les indicateurs d’état apportent les informations suivantes :

- par l’inspection visuelle, aucun terrier ni ouvrage traversant n’a été relevé ;
- en revanche, observation de nombreux pins adultes disposés en crête de digue.

Compte tenu de ces informations, l’ingénieur évalue le critère « singularité dans le corps de digue » en élicite d’abord les quantiles 5% et 95% de la distribution du critère et il choisit l’intervalle [3, 5] : il estime très peu vraisemblable que la valeur du critère se situe en dehors de cet intervalle. Enfin, il estime que la valeur la plus vraisemblable est 4 (Figure I-3.6).

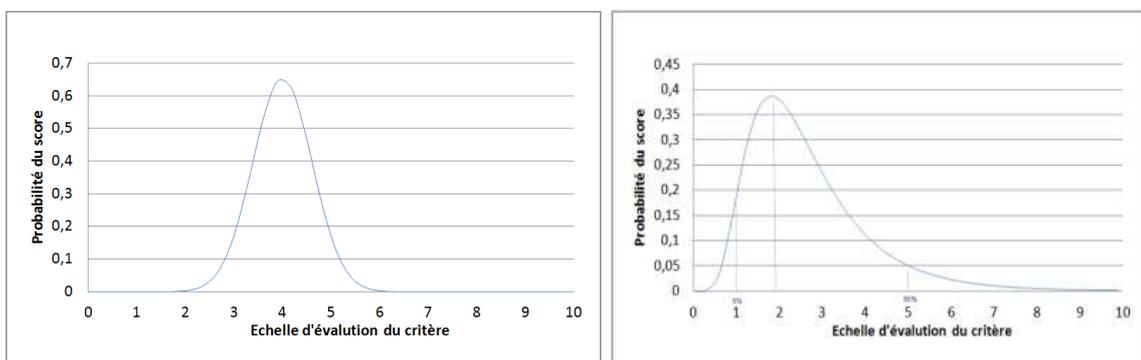


Figure I-3.6 : ajustement automatique de lois normale et log-normale pour l’évaluation du critère « singularités dans le corps de digue »

Cette démarche permet de prendre en compte les incertitudes pesant sur les données d’entrée du critère. Ainsi si certains indicateurs d’états sont mal renseignés ou localement très variables, l’ingénieur a la possibilité d’augmenter les marges d’incertitude. En reprenant l’exemple précédent et s’il pesait une forte incertitude sur la qualité des inspections visuelles,

l’ingénieur pourrait, pour le critère « singularités dans le corps de digue », éliciter le mode 2 associée à l’intervalle d’incertitude [1, 5] (Figure I-3.6, à droite).

Nous ajoutons que lorsque l’évaluation d’un critère apparaît avec quasi certitude comme très bonne ou très mauvaise, et que l’ingénieur ne voit pas l’utilité d’éliciter trois paramètres, il pourra se contenter d’éliciter un simple intervalle délimité par des bornes Min et Max. *Exemple : un critère considéré avec beaucoup de certitude comme très satisfaisant pourra être évalué selon l’intervalle [9-10].* De même, en cas d’incertitude totale, l’ingénieur pourra éliciter l’intervalle uniforme [0, 10].

4. Biais

La littérature cognitive considère les heuristiques (réflexions informelles) comme générateurs de biais susceptibles d’altérer les aptitudes d’un expert à éliciter sa réelle opinion.

Nous proposons ici une démarche de réduction de ces biais, contenant :

- la présentation des biais, afin d’une meilleure prise de conscience ;
- des procédures d’élicitation particulière.

4.1 Présentation des biais

Les principaux biais cités dans la littérature consacrée aux probabilités subjectives sont : la *disponibilité*, la *représentation*, la *sur-confiance* et l’*ancrage* (Morgan et Henrion, 1990).

Le biais de *disponibilité* est un raccourci mental tenant compte seulement des faits les plus récents ou surestimant leur importance en raison de leur « disponibilité » en mémoire (O’Hagan *et al.*, 2006).

Exemple : les médias peuvent rapporter des faits concernant une maladie de façon fréquente et répétitive qui donnent l’impression que la probabilité de contracter la maladie est plus élevée qu’en réalité.

Exemple pour l’évaluation de la performance des digues: l’ingénieur a tendance à donner trop d’importance à un mécanisme de rupture en cause dans une catastrophe largement relayée par les médias.

Le biais de *représentation* est une erreur d’estimation du degré de correspondance entre un échantillon et une population (Kahneman. D *et al.*, 1982). Cela se traduit par une diminution de la prise en compte de l’aspect conditionnel d’une probabilité.

Exemple (Tversky et Kahneman, 1982) : on présente à des sujets X descriptions de Bill et on leur demande d’ordonner les probabilités de plusieurs événements basés sur X.

X : Bill a 34 ans, il est intelligent mais pas imaginatif, compulsif et généralement peu actif. A l’école, il était fort en mathématiques mais faible pour les matières socio-humaines. « Ranger les éléments suivant selon leur degré de probabilité de 1 à 6 » : A-Bill est un physicien aimant jouer au poker ; B-Bill est comptable ; C-Bill joue du jazz en hobby ; D-Bill pratique le surf ; E-Bill est reporter ; F-Bill est un comptable qui joue du jazz comme hobby.

L’élément F est la représentation de B et C, avec B très représentatif et C très peu représentatif. L’élément F est d’une représentativité intermédiaire. Les sujets sans l’heuristique de représentativité vont ranger F entre B et C. N’importe comment, $p(C/X) > p(F/X)$. Dans le présent exemple, 87% des personnes ont répondu $p(F/X) > p(C/X)$, l’expérience a été répétée avec des élèves de la Stanford business school et 80% des sujets ont rangés F devant C...

Exemple pour l’évaluation de la performance des digues : l’ingénieur néglige l’impact des conduites traversantes sur la sécurité des ouvrages alors qu’un pourcentage important de rupture de digue est imputable à ce type de phénomène.

Le biais d’**ancrage** se manifeste lorsque l’expert se laisse trop influencer par une première évaluation spontanée, avec ensuite un ajustement difficile de son jugement.

Exemple (Tversky et Kahneman, 1982) : on demande à des personnes d’ajuster une roue indiquant par un score de 1 à 100 le pourcentage des pays Africains parmi les membres de l’ONU. Si au démarrage de l’expérience, on met la roue sur 10, la moyenne des ajustements est 25, c’est-à-dire que les personnes interrogées estiment que 25% des pays membres de l’ONU sont Africains. Si au démarrage de l’expérience on met la roue sur 65, la moyenne des ajustements est alors 45.

Exemple pour l’évaluation de la performance des digues : après consultation de documents d’archive, l’ingénieur évalue un critère selon une modalité la plus vraisemblable correspondant à son premier jugement, puis ne parvient pas à l’ajuster à la lumière d’autres éléments nuanciant ou contredisant cette appréciation.

Le biais de **sur confiance** conduit l’expert à minimiser l’incertitude de ses évaluations. A contrario, le biais de **pessimisme** conduit l’expert à éliciter des distributions insuffisamment informatives.

4.2 Procédures d’élicitation

Dans cette recherche, nous proposons plusieurs modalités d’élicitation afin de réduire les différents biais :

- le biais de sur-confiance : lors de l’élicitation, l’ingénieur spécialisé doit indiquer quelles conditions auraient pu amener les quantiles 5% et 95% à être estimés plus bas/ haut et pourquoi ils ne le sont pas. Il doit ainsi être amené à donner une attention particulière à la justification de l’incertitude qu’il associe à chaque critère évalué ;
- le biais d’ancrage : on propose d’éliciter les valeurs extrêmes de la distribution avant la valeur centrale. Cette démarche doit amener l’ingénieur à considérer l’ensemble des aspects de l’évaluation du critère avant d’éliciter la valeur qu’il considère la plus vraisemblable ;
- les biais de disponibilité et de représentation : lors du renseignement des critères par l’ingénieur, le modèle met à sa disposition toutes les informations à considérer pour l’évaluation de la performance des ouvrages. Ainsi, l’ingénieur est amené à considérer l’ensemble des critères d’évaluation des digues et, par là, à réduire les biais liés aux éléments qu’il a le plus en mémoire (biais de disponibilité) ou liés à une mauvaise appréciation de la représentativité des éléments (biais de représentation).

