



Université de Marne-La-Vallée

THÈSE
pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Marne-La-Vallée

Spécialité : Sciences de l'Information Géographique

présentée et soutenue publiquement par

Damien SERRE

le 09/12/2005

Evaluation de la performance
des digues de protection contre les inondations
Modélisation de critères de décision
dans un Système d'Information Géographique.

Performance assessment of river levees
Decision criteria model in a Geographic Information System.

Directeur de thèse
Youssef DIAB

Jury

Bernard CERVELLE
Roger COJEAN
Youssef DIAB
Pascal LE GAUFFRE
Pierre MAUREL
Laurent PEYRAS
Rémy TOURMENT

Examineur – Président du jury
Rapporteur
Examineur – Directeur de thèse
Rapporteur
Membre invité
Examineur – Responsable de thèse
Examineur

La science rassemble une somme de connaissances, de théories, de potentialités de développement inouïe au regard de ce qu'était son ambition jadis. Elle permet de faire beaucoup de choses, mais elle n'éclaire plus les hommes sur certaines questions majeures qui les préoccupent : la morale, la guerre, la misère qui résiste à toute tentative de solution. Plus que jamais, l'Homo technicus est plongé dans l'incertitude et la perplexité. Perplexité de voir qu'il peut des choses prodigieuses et maîtrise toujours mal son destin.
Bruno Jarosson « Invitation à la philosophie des sciences »

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été effectué au Cemagref, au sein de l'unité de recherche « Ouvrages Hydrauliques » à Aix en Provence, puis au sein de l'Unité Mixte de Recherche « Territoires, Environnement, Télédétection et Informations Spatiales » à Montpellier.

Youssef Diab, directeur du Laboratoire Génie Urbain, Environnement et Habitat (LGUEH), à Marne la Vallée, a dirigé cette thèse. Je le remercie pour son investissement et pour les conseils qu'il m'a prodigués chaque fois que j'en ai eu besoin.

Je remercie les membres des deux unités de recherche du Cemagref qui ont contribué de près à ce travail. En particulier, j'exprime ma sincère reconnaissance à Patrice Mériaux, Laurent Peyras, Rémy Tourment et Pierre Maurel pour leur encadrement sans faille, leur disponibilité et leur sympathie. Merci aussi aux deux Christophe (Berthaud et Prévot) pour le travail conséquent qu'ils ont fourni, ainsi qu'à Richard Raymond pour ses nombreux conseils.

J'exprime ma sincère reconnaissance à Bernard Cervelle (Université de Marne la Vallée), Pascal Le Gauffre (Institut National des Sciences Appliquées de Lyon) et Roger Cojean (Ecole des Mines de Paris) pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger cette thèse, de présider le jury ou d'en être les rapporteurs. Je les remercie sincèrement de l'intérêt porté à mon travail.

Je tiens également à remercier tous les acteurs qui ont accepté de collaborer, avec beaucoup de passion et d'engagement, aux réunions du groupe d'experts des digues, je pense spécialement à Corinne Curt, Paul Royet et Gérard Degoutte, et aux réunions du comité de pilotage de cette thèse, je pense notamment à Thérèse Libourel.

J'en profite aussi pour remercier Thomas Bonierbale, Katia Laffréchine et Denis Morand, membres du LGUEH, pour les quelques échanges que nous avons pu avoir lors de mes visites à Marne la Vallée ou lors de colloques.

Que ces trois années d'apprentissage à la recherche ne soient qu'un prologue...

J'adresse un grand merci à tous ceux qui ont contribué à rendre ces trois années plus qu'agréables. Je pense en particulier aux membres du club pétanque et du club VTT du Cemagref d'Aix. Je tiens à remercier les stagiaires et thésards de la cuvée 2003, spécialement Aurélie, Nadine, Pauline, Barjot, Pépé Graff, Papy Paulet, Rémy J et tous les autres, qui se sont impliqués énergiquement dans toutes les activités proposées par « l'Orifice du Tourisme », dont Nicolas Figeac est le fondateur.

J'exprime toute ma gratitude à l'ensemble de mes proches, qui m'ont tous, à leur manière, aidé à franchir ce cap.

J'ai une pensée spéciale pour mes parents qui ont tant donné pour que tout cela soit possible... Merci !

Julie, merci d'avoir été là depuis le début. Je n'aurais pas pu entreprendre ce doctorat si tu ne m'avais pas maintenu éveillé, toute une nuit, dans le froid glacial de l'hiver...

Résumé

La France et plus généralement le monde subissent de fréquents épisodes de crues dévastatrices. Les inondations provoquent d'importants dégâts et les coûts induits sont considérables. Les digues de protection contre les inondations, souvent sous-dimensionnées et mal entretenues, ont montré leurs faiblesses à plusieurs reprises et leurs ruptures augmentent la violence des inondations.

A l'échelle nationale, le linéaire conséquent de digues (environ 7 500 km) et le manque de données sur l'ensemble de ce parc d'ouvrages compliquent leur gestion. A l'échelle du gestionnaire local se pose la question de l'optimisation des opérations de maintenance. En effet, un gestionnaire de digues ne dispose généralement pas d'un budget suffisant pour réaliser l'ensemble des opérations de maintenance sur la totalité du parc d'ouvrages. Ce long linéaire pose donc une question majeure : par où commencer les actions de maintenance pour à la fois assurer le bon fonctionnement des digues et optimiser les choix budgétaires ?

Dans ce contexte, les gestionnaires de digues ont besoin de méthodes et d'outils d'aide à la décision. Un premier Système d'Information Géographique (SIG), le SIRS Digues, est opérationnel. Il contient les informations détaillées sur les ouvrages : géoréférencement des digues à l'échelle 1/10 000^{ème} et informations relatives aux digues (constitution, désordres, réseaux, voiries...). Toutefois en l'état, cet outil ne permet pas d'évaluer l'état des digues.

Notre recherche vise à développer des méthodes d'évaluation de la performance des digues. A partir des informations disponibles (inspections visuelles détaillées, essais réalisés, données historiques, etc.), nous proposons des indicateurs capables d'évaluer leur état et leur performance. Notre démarche comporte trois étapes :

- l'élaboration d'un modèle fonctionnel des mécanismes de rupture, bâti à partir de l'Analyse Fonctionnelle (AF) et l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), et utilisant une représentation sous forme de graphes causaux et d'arbres de défaillances ;
- la construction d'indicateurs de performance pour chaque mécanisme de rupture, sur la base de critères et d'une méthode d'aide à la décision multicritère : l'agrégation à base de règles ;
- l'intégration du modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues dans le SIRS Digues. Cette opération permet de cartographier et de visualiser la performance d'un parc d'ouvrages.

Après une application de ces méthodes sur une digue existante, nous proposons divers développements et perspectives à cette recherche, dont la principale est, à moyen terme, le développement d'un outil opérationnel pour l'aide à la décision dans les actions de maintenance des digues de protection contre les inondations.

Mots clés : digue de protection contre les inondations, gestion patrimoniale, analyse fonctionnelle, AMDE, indicateur de performance, aide à la décision multicritère, SIG.

Abstract

More and more floods occurred over the last decade in France and in the world, causing important damages and significant costs. Moreover, levees are often not well maintained, so they hardly resist to major floods and can break easily. These failures increase flood consequences.

At french national scale, the length of levees, estimated to 7500 kilometers, and the lack of data all along these infrastructures complicates their management. At a local manager scale, the aim is to optimise maintenance operations. In fact, a levee manager has generally not a sufficient budget to lead all needed maintenance operations. The huge length of these linear infrastructures brings up the following issue: which section of the levee, on one hand has to be inspected, improved and maintained and, on the other hand, to optimise budget distribution?

In this frame, levee managers need approaches and tools in order to be helped in their maintenance decision. A first Geographic Information System (GIS) called « SIRS Dignes », is developed. It contains detailed data about infrastructures: levee localisation at a scale of 1/10.000^{ème} and data about levees (constitution, degradations, pipe and street networks...). However, in the current version of this software, levee performance can not be assessed.

The goal of our research is to develop methods allowing the assessment of levees performance. From data collected (detailed visual inspections, laboratory tests, historical data, etc.), we establish indicators able to assess levee condition and performance. Our approach contains three main steps:

- analysing and modeling levees failure mechanisms with a functional model build up from Functionnal Analysis (FA) and Failure Modes and Effetcs Analysis (FMEA), represented with causal graphs and fault trees representation;
- establishing of performance indicators according to each failure mechanisms, with the use of criteria and a multicriteria decision method: the affectation based on aggregation rules;
- integrating the levee performance assessment multicriteria model into the SIRS Dignes in order to vizualise levee performance on charts.

After showing an application of all these methods on a real levee, we suggest some future developments according to this research. The principal one is the development of an operational tool allowing to assist levee managers in their maintenance operations.

Keywords: river levee, asset management, functional analysis, FMEA, performance indicator, multicriteria decision aid, GIS.

Table des matières

Glossaire.....	13
Introduction	17
Première partie Les digues en France : du constat d’une situation à l’expression d’un besoin.....	23
Chapitre 1 : La gestion des ouvrages de génie civil.....	24
1.1. Les différents concepts.....	24
1.1.1. Système de génie civil et performance – définitions et principes.....	24
1.1.2. Maintenance des ouvrages de génie civil.....	26
1.1.3. Diagnostic et analyse de risque des ouvrages de génie civil.....	27
1.2. Les dispositifs de gestion patrimoniale.....	29
1.2.1. Les concepts de la gestion patrimoniale.....	29
1.2.2. La démarche de la gestion patrimoniale.....	30
1.2.3. Les différents dispositifs de gestion patrimoniale.....	31
1.3. Exemples de dispositifs de gestion patrimoniale – ouvrages à grand linéaire.....	32
1.3.1. Les ouvrages enterrés d’assainissement.....	33
1.3.2. Les routes.....	34
1.4. Synthèse.....	35
Chapitre 2 : Le parc français de digues de protection contre les inondations	37
2.1. Le parc de digues.....	37
2.1.1. Définitions et typologie des digues en France.....	37
2.1.2. Le recensement en cours des digues.....	42
2.1.3. Caractéristiques des digues de protection contre les inondations.....	44
2.1.4. Des enjeux importants.....	49
2.1.5. Une sécurité perfectible.....	50
2.1.6. Des ouvrages mal documentés.....	51
2.1.7. Synthèse.....	51
2.2. Les modes de gestion des digues.....	52
2.2.1. Des acteurs très nombreux.....	52
2.2.2. La responsabilité du propriétaire.....	54
2.2.3. Le contrôle par l’administration des digues intéressant la sécurité publique.....	55
2.2.4. Synthèse sur le dispositif de gestion des digues.....	56
Chapitre 3 : L’analyse de la performance des digues.....	58
3.1. Démarche d’évaluation de la performance des ouvrages de génie civil.....	58
3.1.1. Définitions et conception des indicateurs de performance.....	58
3.1.2. Démarche générale d’évaluation de la performance.....	60
3.1.3. Exemple d’indicateurs de performance.....	61
3.1.4. Synthèse.....	63
3.2. Pratique actuelle de l’évaluation de la performance des digues.....	64
3.2.1. Evaluation rapide de l’état des digues.....	64
3.2.2. Evaluation approfondie de l’état des digues.....	66
3.2.3. Un outil d’aide à la gestion des digues : le SIRS Digues.....	69
3.2.4. Synthèse.....	70
Chapitre 4 : Objectifs et propositions	71
4.1. Contexte.....	71

4.2. Objectifs	71
4.3. Propositions.....	72
Deuxième partie Modélisation des mécanismes de rupture des digues.....	75
Chapitre 5 : Mécanismes de rupture des digues en remblai	76
5.1. Introduction aux mécanismes de rupture	76
5.1.1. Définitions générales.....	76
5.1.2. Documentations techniques disponibles	77
5.1.3. Les mécanismes de rupture des ouvrages en remblai	78
5.2. Le mécanisme de surverse.....	79
5.2.1. Description du mécanisme	79
5.2.2. Exemple de cas de surverse.....	80
5.3. Le mécanisme d'érosion interne	81
5.3.1. Description du mécanisme	81
5.3.2. Exemple de cas d'érosion interne.....	83
5.4. Les mécanismes d'érosion externe.....	84
5.4.1. Description du mécanisme	84
5.4.2. Exemple de cas de rupture par érosion externe.....	86
5.5. Le mécanisme de glissement.....	87
5.5.1. Description du mécanisme	87
5.5.2. Exemple de cas de rupture par glissement	89
5.6. Synthèse	90
Chapitre 6 : Proposition d'un modèle fonctionnel de rupture des digues	91
6.1. Les méthodes pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes.....	91
6.1.1. L'Analyse Fonctionnelle	92
6.1.2. L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)	95
6.1.3. Autres méthodes qualitatives de la Sûreté de Fonctionnement.....	99
6.1.4. Les méthodes quantitatives de la Sûreté de fonctionnement.....	100
6.1.5. Synthèse	102
6.2. Les modèles issus du raisonnement qualitatif.....	103
6.2.1. Principes du raisonnement qualitatif.....	103
6.2.2. Les modèles du raisonnement qualitatif.....	104
6.2.3. Synthèse	107
6.3. Modèle fonctionnel pour les mécanismes de rupture des digues	107
6.3.1. L'analyse fonctionnelle des digues	107
6.3.2. L'AMDE appliquée aux digues.....	113
6.3.3. Modèle qualitatif de scénario de rupture de digue	116
6.4. Synthèse	119
Chapitre 7 : Modélisation des mécanismes de rupture de digue	120
7.1. L'apport de l'expérience	120
7.2. Présentation de la modélisation d'un mécanisme	121
7.3. Une représentation des scénarios sous forme d'arbres de défaillance	124
7.4. Synthèse	125
Troisième partie Evaluation de la performance des digues	127
Chapitre 8 : Indicateurs d'état et critères pour l'évaluation de la performance des digues.....	128
8.1. Définitions et intérêt des indicateurs de performance.....	128
8.2. Construction des indicateurs de performance	130
8.2.1. Principes et méthodologie de construction des indicateurs de performance.....	130
8.2.2. Exemples dans le domaine du génie civil	132
8.2.3. Synthèse	138

8.3. Proposition d'indicateurs d'état et de critères pour les digues.....	138
8.3.1. Principes de construction des indicateurs de performance des digues.....	138
8.3.2. Construction des indicateurs d'état et des critères pour les digues : application au mécanisme d'érosion interne.....	140
8.4. Synthèse	146
Chapitre 9 : L'analyse multicritère pour l'évaluation de la performance des digues ...	147
9.1. Les différentes méthodes multicritères	147
9.1.1. Contexte de l'aide à la décision multicritère.....	147
9.1.2. Actions, familles de critères et problème multicritère	148
9.1.3. Les méthodes issues de la théorie de l'utilité multiattribut.....	150
9.1.4. Les méthodes de surclassement.....	152
9.1.5. Les méthodes interactives	154
9.1.6. Synthèse	156
9.2. Analyse multicritère appliquée aux digues	157
9.2.1. Test d'une méthode élémentaire : la moyenne pondérée	157
9.2.2. L'affectation à base de règles.....	160
9.2.3. Automatisation de l'évaluation de la performance des digues.....	164
9.3 Synthèse	166
Quatrième partie Intégration du modèle multicritère et du SIRS Digues.....	169
Chapitre 10 : Des SIG pour la gestion d'ouvrages linéaires	170
10.1. Définitions, intérêts et limites des SIG.....	170
10.1.1. Définitions.....	170
10.1.2. Intérêts des SIG	172
10.1.3. Limites des SIG	173
10.1.4. Synthèse	174
10.2. Des SIG couplés à des modèles d'aide à la décision multicritère.....	174
10.2.1. Apporter aux SIG des capacités d'aide à la décision	174
10.2.2. Solutions pour coupler les SIG avec un modèle multicritère.....	175
10.2.3. Des SIG couplés à des méthodes multicritères	177
10.2.4. Synthèse	180
Chapitre 11 : Intégration des indicateurs de performance des digues et du SIRS Digues	182
11.1. Description de l'application SIRS digues	182
11.1.1. Contenu informationnel de l'application.....	182
11.1.2. Architecture informatique du système	186
11.1.3. Fonctionnalités de l'application	187
11.1.4. Exemple de traitement des informations avec le SIRS Digues dans sa version actuelle	190
11.1.5. Synthèse	194
11.2. Du SIRS Digues à un outil d'aide à la décision à référence spatiale	195
11.2.1. Concepts des systèmes support de décision	195
11.2.2. Intégration de la méthode multicritère et du SIRS Digues.....	197
11.2.3. La cartographie de la performance des digues	203
11.2.4. Synthèse	204
11.3. Validation du modèle multicritère d'évaluation de la performance sur une digue réelle	205
11.3.1. Objectif.....	205
11.3.2. La digue étudiée	205
11.3.3. La collecte des données.....	208
11.3.4. La saisie des données	208

11.3.5. La restitution des résultats.....	210
11.3.6. Synthèse	215
Chapitre 12 : Perspectives	216
12.1. Recherche et développement.....	216
12.1.1. L'évaluation de la performance des digues vis à vis de l'ensemble des mécanismes	216
12.1.2. L'intégration dans le SIRS Dignes.....	217
12.2. Validation et transfert vers les gestionnaires.....	218
12.2.1. Phase de validation.....	218
12.2.2. Phase de transfert	219
Conclusion.....	221
Bibliographie.....	227
Annexes	241

Glossaire

Action (en aide à la décision multicritère)

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).

Aide à la décision

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 ces intervenants se trouvent placés d'autre part (Roy et al, 1993).

AMDE : Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets

Méthode inductive d'analyse de système utilisée pour l'étude systématique des causes et effets des défaillances qui peuvent affecter les composants de ce système (NF X60-510, CEI 812-1985, norme MIL-STD 1629A).

Analyse de risque

Activité qui consiste à répondre aux trois questions suivantes (Kaplan, 1997) :

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

Analyse fonctionnelle

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

Composant

Elément matériel ou ensemble matériel remplissant une fonction particulière dans un système ou un sous-système (Zwengelstein, 1996).

Critère

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).

Défaillance

Altération ou cessation de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques (AFNOR, 2001).

Dégradation (d'une fonction)

Catégorie de perte de performance, correspondant à une diminution de la performance d'une fonction restant néanmoins supérieure au seuil fonctionnel (Cremona, 2002).

Détérioration/Désordre

Etat dégradé ou comportement defectueux d'un ouvrage du point de vue de sa sécurité et des performances (ICOLD, 1983).

Diagnostic

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, CEI).

Digue

construction établie dans le but de contenir des eaux ou à protéger de leurs effets (Kurtz, 1997).

Digue en charge en permanence

Digue sollicitée en situation normale d'exploitation par la charge hydraulique. Ce cas correspond aux digues de navigation ou aux digues de dérivation pour certaines industries (hydroélectricité, nucléaire...).

Digue de protection contre les inondations

Digue dont au moins une partie est construite en élévation au dessus du niveau du terrain naturel et destiné à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables (Mériaux et al., 2001).

Durabilité

Aptitude d'une entité à accomplir une (des) fonction(s) requise(s) dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un (des) état(s) limite(s) soit (soient) atteint(s) (AFNOR, 1988).

Fiabilité

Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné (AFNOR, 1988).

Fonction

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

Géomatique

Terme formé du préfixe géo et du mot informatique. Discipline ayant pour objet la gestion des données géographiques et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion (Office Québécois de la Langue Française).

Granularité

Finesse « d'un grain » d'un modèle. La granularité spatiale est l'échelle spatiale de description d'un système ; la granularité temporelle est la finesse du pas de temps dans la description d'une chronologie.

Indicateur/Indicateur d'état

Paramètre ou valeur calculée à partir de paramètres donnant des indications sur, 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). Dans notre recherche, nous utilisons le terme d'indicateur d'état.

Indicateur de performance

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 al., 2001).

Indice

Ensemble de paramètres ou d'indicateurs agrégés ou pondérés décrivant une situation (OCDE, 1993).

Maintenance

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 (AFNOR, 2001).

Mécanisme

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).

Mécanisme de rupture (de digue)

Processus physique par lequel la digue peut être amenée à produire une « lâchure » d'un volume d'eau et, de fait, inonder le val protégé.

Mode de défaillance

Un mode de défaillance est la non-réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : pas de fonction, perte de fonction, dégradation de fonction, fonction intempestive. (ISDF).

Mode de rupture (de digue)

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.

Paramètre

Propriété mesurée ou observée (OCDE, 1993).

Performance

Aptitude d'une structure à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue. Par extension, on parle de performance d'une fonction pour indiquer l'état de réalisation de la fonction (Cremona, 2002).

Risque

Mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences (Villemeur, 1988).

Rupture (de digue)

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 du val protégé (ICOLD, 1995).

SIG (Système d'Information Géographique)

Système de gestion de base de données conçu pour saisir, stocker, manipuler, analyser et afficher des données à référence spatiale en vue de résoudre des problèmes complexes de gestion et de planification (Fischer *et al.*, 1993).

SIRS (Système d'Information à Référence Spatiale)

Organisation structurée de ressources humaines, d'équipements, de procédures et de données qui se coordonnent pour réaliser l'acquisition et la gestion de données et fournir l'information sur le territoire (Ministère des Affaires Municipales du Québec).

Sûreté de Fonctionnement/sûreté de fonctionnement

La Sûreté de Fonctionnement est la Science des Défaillances, incluant leur connaissance, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise (Villemeur, 1988).

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

Surveillance

Action d'observer attentivement pour contrôler, vérifier, s'assurer qu'il n'existe aucun risque de danger (Hanicotte *et al.*, 1998).

Système

Ensemble déterminé d'éléments discrets (ou composants) interconnectés ou en interaction (Villemeur, 1988).

Introduction

Face à l'aléa inondation, les hommes ont de tout temps essayé de se protéger des débordements des fleuves et des rivières. Ils ont tout d'abord établi leurs lieux de vie dans des zones à topographie favorable et hors des champs d'expansion des crues : il s'agissait, dans ce cas, d'une protection passive. Puis, ils ont tenté de « dompter » les cours d'eau pour vivre plus près de leurs abords et devenir ainsi des riverains au sens originel du terme. Cette protection, dite active, a été rendue possible par la construction progressive de digues. A l'instar de celles de la Loire, les plus anciennes digues encore en fonctionnement aujourd'hui et surélevées au cours du temps, datent du Moyen-Age. Les hommes ont pu ainsi profiter des bénéfices du réseau hydrographique, qui représentait un axe de communication et d'échanges privilégié. Cela n'empêchait pas lors des crues des cours d'eau que des digues se rompent et que les zones anthropisées soient inondées. De nombreux récits historiques viennent témoigner sur ces événements et il existait, jusqu'à une période récente, un certain fatalisme des hommes face à la force des rivières et des fleuves ou face à la fragilité des ouvrages de protection.

Aujourd'hui, les sociétés modernes sont devenues très sensibles aux risques et leur perception a été sensiblement modifiée. Le risque induit par les digues de protection contre les inondations se situe à l'interface entre le risque naturel (lié à l'aléa hydrologique) et le risque technologique (lié aux ouvrages eux-mêmes). La rupture d'une digue lors d'une crue fait partie de cette catégorie de risque dorénavant difficilement accepté par les populations et les politiques concernées. Par ailleurs, l'accroissement de la démographie et l'attractivité des villes ont abouti à autoriser la construction de logements, entreprises, bâtiments publics... dans des zones potentiellement inondables. Il en résulte donc une vulnérabilité accrue dans les lieux protégés par les digues, ces ouvrages n'ayant en outre généralement pas été conçus pour résister à des crues exceptionnelles ou extrêmes.

En France, mais aussi en Europe et plus généralement dans le monde, la fréquence des crues s'est accélérée lors de la dernière décennie et leur intensité a augmenté. Ces crues conduisent de plus en plus souvent à des ruptures de digues, ce qui a pour effet d'accroître les effets des inondations dans les zones censées être protégées par ces ouvrages. Citons quelques événements remarquables :

- les inondations dans le sud de la France en 1999, 2002 et 2003 ;
- en Chine en 1998 le long du fleuve Yangze, où les ruptures de digues ont provoqué la mort de 2000 personnes, selon les chiffres officiels du gouvernement Chinois ;

- à Saint Louis (Etats-Unis) le long du Mississippi en 1998, où des digues atteignant 15 mètres de hauteur se sont rompues ; très récemment (septembre 2005) à la Nouvelle-Orléans (Etats-Unis) suite au passage du cyclone Katrina. Le bilan provisoire à ce jour fait état de plusieurs milliers de morts et de plusieurs dizaines de milliards de dollars de dégâts.

En une génération, les problématiques liées aux digues ont profondément évolué, à l'instar d'autres domaines du génie civil. Les questions liées à la conception et à la réalisation des ouvrages se sont déplacées vers leur gestion et leur exploitation, avec l'objectif sous-jacent de la maîtrise des risques qu'ils induisent. Il s'agit donc de produire la meilleure gestion et la meilleure exploitation d'un parc de digues, et en particulier d'améliorer et d'optimiser les actions de maintenance, dans le souci permanent de maintenir sur le long terme un niveau de sécurité optimal pour l'aménagement hydraulique.

La maîtrise des risques liée aux digues est fondamentale et les défaillances de ces ouvrages sont susceptibles d'avoir des conséquences en vies humaines ou économiques lourdes, comme l'ont montré les inondations récentes dans le sud de notre pays : Languedoc-Roussillon en 1999 (36 victimes et 620 M€ de dommages), Gard en 2002 (23 victimes et 1200 M€ de dommages) et basse vallée du Rhône en 2003 (7 victimes et 1000 M€ de dommages).

Le constat de la fragilité des digues en France, face aux crues majeures, a conduit à prendre conscience que ces ouvrages avaient besoin d'être mieux diagnostiqués, surveillés et entretenus. Un recensement récent a mis en évidence des caractéristiques communes souvent observées sur ces ouvrages : construction avec des matériaux hétérogènes et sans moyen de compactage (digue anciennes), état général médiocre voire mauvais, entretien insuffisant ou absent, propriétaires parfois non identifiés, etc. Le grand linéaire de ces ouvrages (environ 7500 km sur le territoire national) complique par ailleurs leur gestion.

C'est dans ce contexte que les premiers travaux relatifs au projet « SIRS Digues » ont été engagés en 1998. Le SIRS Digues (Système d'Information à Référence Spatiale) est un Système d'Information Géographique (SIG) centré sur les digues et le lit fluvial endigué, à un niveau de précision adapté aux gestionnaires locaux. Il permet le géoréférencement des digues et des zones protégées. Depuis 2001, cet outil dorénavant opérationnel est implanté dans deux syndicats gérant chacun environ 200 kilomètres de digues (AD-IDR en Isère, le SYMADREM en Camargue). Bien que moderne et novateur, le SIRS Digues ne permet

toutefois pas actuellement d'évaluer l'état des ouvrages et d'analyser leur aptitude à résister aux mécanismes de rupture auxquels ils sont potentiellement soumis.

Ainsi, développer des outils d'aide à la gestion des digues, permettant d'établir des priorités dans les actions de maintenance à réaliser sur l'ensemble du linéaire du parc, apparaît comme un objectif essentiel des gestionnaires de digues, des bureaux spécialisés qui les assistent et des services de l'administration qui les contrôlent. Les enjeux sont avant tout d'assurer la sécurité des personnes et des biens protégés par les ouvrages, mais aussi l'optimisation de la programmation des actions de maintenance dans un contexte d'ouvrages de grand linéaire (pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres) et de budget forcément limité. Ce long linéaire pose donc une question majeure : par où commencer les actions de maintenance pour à la fois assurer le bon fonctionnement des digues et optimiser les choix budgétaires ?

Dans le contexte des digues, des travaux de recherche réalisés depuis quelques années, ont développé des approches physiques. Des méthodologies d'évaluation de l'état des ouvrages ont été identifiées et formalisées : étude morphodynamique, analyse topographique, études hydrologique et hydraulique, inspection visuelle, reconnaissances géotechniques et géophysiques, modélisation géomécanique... Appuyées par l'analyse experte, ces approches sont performantes pour l'évaluation préliminaire ou approfondie des digues.

En revanche, il n'existe pas de méthodes destinées à formaliser l'évaluation de l'état des ouvrages, prenant en compte l'ensemble des mécanismes de rupture auxquels une digue est potentiellement soumise et intégrant les aléas et l'environnement extérieur (crues, végétation, animaux, actions de l'homme...). De même, aucune méthode proposant des critères de décision ou des indicateurs de performance et pouvant être associée à un système d'information géographique, n'a été développée.

Remarquons que cette approche d'analyse de la performance mise en œuvre dans des outils d'information géographique pour l'aide à la décision a déjà été développée en génie civil sur des ouvrages à grands linéaires : routes, réseaux enterrés d'eau ou d'assainissement, etc. Ces dispositifs de gestion patrimoniale sont alors appliqués et apportent des solutions efficaces en terme de gestion durable des ouvrages.

Notre recherche s'inscrit dans ce cadre. Son objectif essentiel est de proposer des méthodes d'évaluation de la performance d'un parc de digues, à travers des indicateurs de

performance. S'agissant d'ouvrages à grands linéaires, les méthodes développées doivent pouvoir être intégrées dans un Système d'Information Géographique (l'outil SIRS Dignes), afin de cartographier les ouvrages selon leurs niveaux de performance et de localiser les tronçons de digues les plus fragiles.

Notre travail s'inscrit clairement dans le cadre d'un environnement professionnel fort, à vocation de contrôle, de diagnostic et de suivi des ouvrages hydrauliques de génie civil et en particulier des digues. Par conséquent, il est nécessairement mené en considérant les pratiques de la profession et présente une vocation applicative.

Nous présentons dans une première partie le contexte dans lequel nous travaillons. Après avoir rappelé les dispositifs généraux de gestion des ouvrages de génie civil, nous présentons le parc de digues de protection contre les inondations, qui va plus particulièrement nous intéresser tout au long de cette recherche, et nous relevons alors les spécificités de ces ouvrages et de leurs modes de gestion. Dans ce cadre, il nous a semblé intéressant de faire une étude bibliographique sur les méthodes de gestion patrimoniale utilisées dans le domaine des ouvrages de génie civil à grand linéaire, puis de présenter la pratique actuelle de gestion des digues, permettant ensuite d'établir des propositions pour conduire notre recherche.

Dans la deuxième partie, nous établissons une synthèse des mécanismes de rupture des digues en remblai, celles-ci représentant la majorité du parc de digues en France. Ce travail permet de disposer d'une collection complète de mécanismes de rupture qui nous servira tout le long de notre recherche. Nous proposons ensuite un modèle de rupture de digue : nous présentons les méthodes disponibles, la démarche adoptée, les méthodes utilisées et les adaptations qu'elles ont nécessitées. Nous détaillons l'Analyse Fonctionnelle (AF) et l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), que nous avons adaptées au contexte particulier des digues.

Dans la partie 3 consacrée à l'évaluation multicritère de la performance des digues, nous examinons comment sont construits de façon générale les indicateurs de performance, puis dans le contexte particulier des ouvrages linéaires de génie civil. Nous proposons alors des indicateurs de performance des digues. Nous étudions ensuite les méthodes multicritères d'aide à la décision qui permettent, à partir d'un raisonnement fondé sur plusieurs critères, de proposer une évaluation globale de la performance d'un ouvrage. Parmi celles-ci, nous

proposons d'utiliser une méthode multicritère d'affectation à base de règles adaptée au cas des digues.

Enfin en dernière partie, nous proposons, après une étude bibliographique dédiée aux fonctionnalités d'aide à la décision des SIG, d'intégrer les indicateurs de performance des digues et la méthode multicritère choisie dans un SIG. Nous présentons une application au mécanisme d'érosion interne d'un type particulier de digue.

Première partie
**Les digues en France : du constat d'une
situation à l'expression d'un besoin**

Chapitre 1 : La gestion des ouvrages de génie civil

Dans ce chapitre, nous définissons les concepts de la gestion des ouvrages de génie civil (système de génie civil, maintenance, diagnostic et analyse de risque), puis nous examinons les différents dispositifs de gestion patrimoniale. Nous présentons ensuite deux exemples particuliers de gestion patrimoniale de parcs d'ouvrages de génie civil à grand linéaire.

1.1. Les différents concepts

1.1.1. Système de génie civil et performance – définitions et principes

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, et 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 (Fig. 1.1).

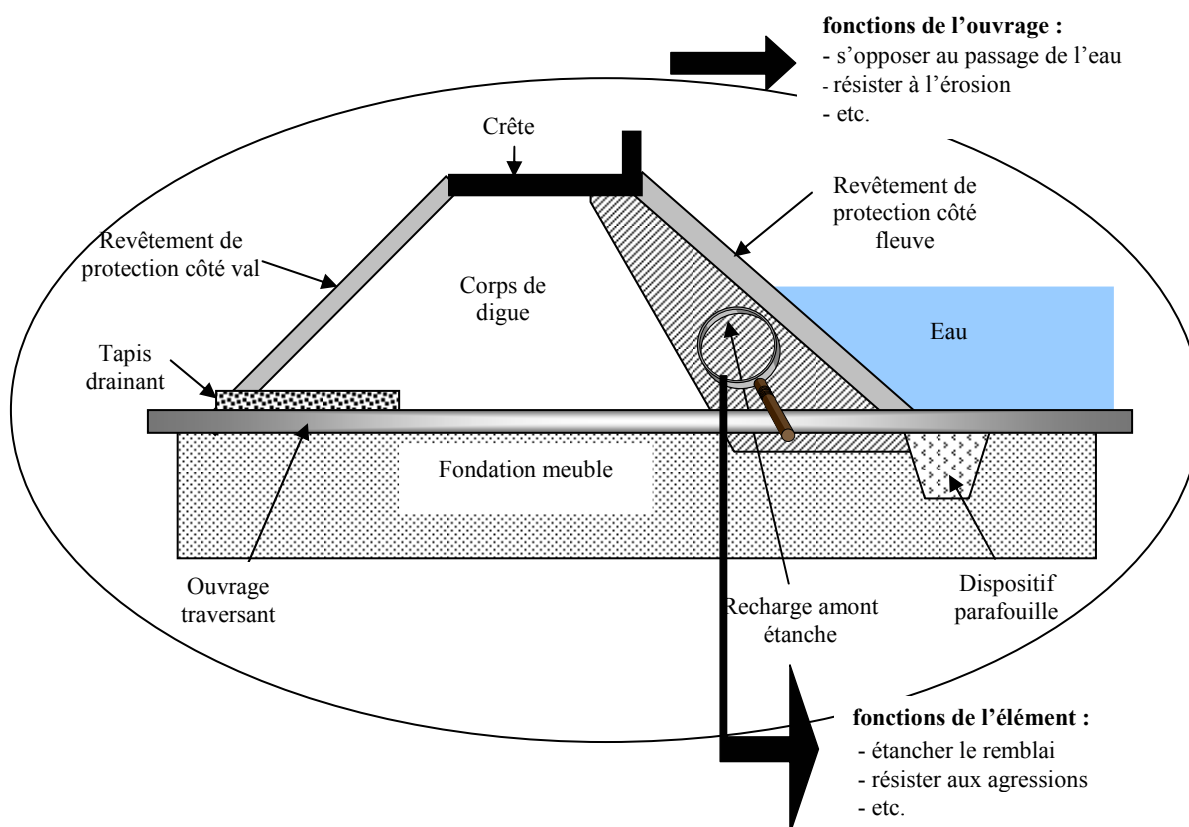


Figure 1.1. Eléments et fonctions d'un système de génie civil particulier : une digue

Ainsi, deux types d'analyses permettent de définir un système de génie civil : structurelle et fonctionnelle (Cremona, 2002).

L'aptitude d'une structure à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue est appelée la **performance**. Les performances d'un système de génie civil sont amenées à évoluer durant sa vie : les fonctions initialement prévues lors de la construction peuvent être modifiées volontairement par le gestionnaire ou encore par des événements extérieurs, et des dégradations peuvent perturber les fonctions initiales. Trois principales causes peuvent provoquer les pertes de performances (Cremona, 2002) :

- le vieillissement de l'infrastructure ;
- les causes humaines s'exerçant par erreur ;
- les causes extérieures prévues ou imprévues.

On considère deux catégories de perte de performance (Fig. 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) (Cremona, 2002) ;
- 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, une au moins des performances est inférieure au seuil fonctionnel.

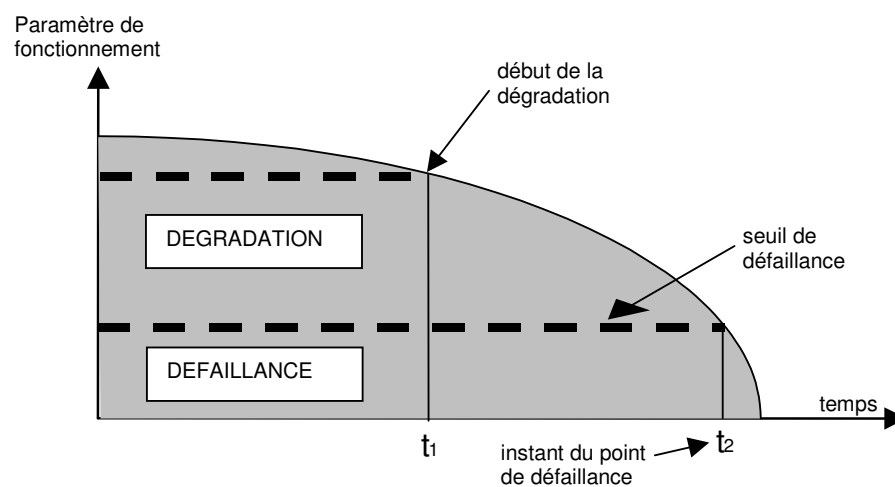


Figure 1.2. Dégradation et défaillance (Zwingelstein, 1996)

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, 2002). 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 comme dans le cadre d'une phase de conception, mais en se basant sur l'état structurel réel de l'ouvrage en cours d'exploitation.

1.1.2. Maintenance des ouvrages de génie civil

La ***maintenance*** comprend « *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).

En fonction du type de structure et de la politique d'exploitation des ouvrages, on rencontre deux principales stratégies de maintenance pouvant s'appliquer aux ouvrages : corrective et préventive, dont les détails apparaissent à la figure 1.3.

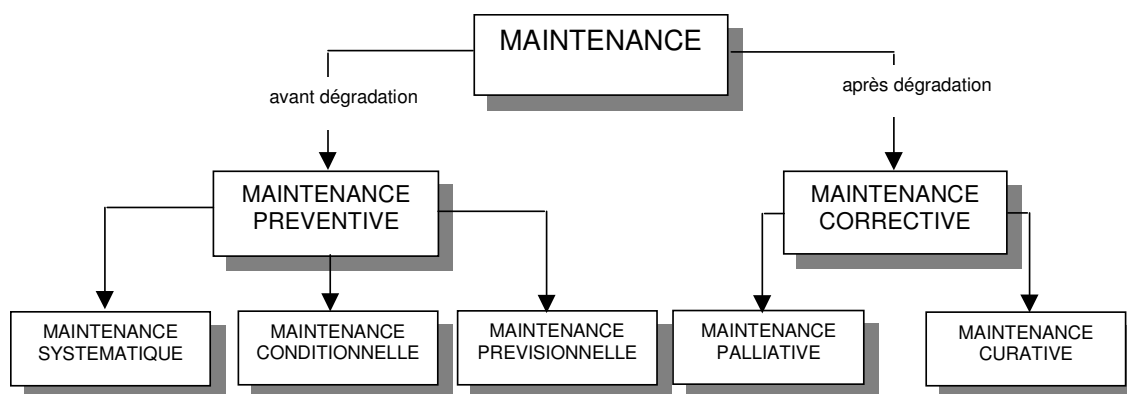


Figure 1.3. Les stratégies de maintenance (Zwingelstein, 1996)

La maintenance préventive va chercher à anticiper les pertes de performances au moyen d'un suivi rapproché de l'état de l'ouvrage et à apporter les mesures correctives avant la défaillance. Elle est appliquée pour les ouvrages présentant des risques forts, comme par exemple la rupture d'un barrage.

A contrario, la maintenance corrective intervient après le constat de la défaillance ou de la dégradation et est mise en œuvre dans des contextes où l'enjeu est plus limité.

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 : 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) et la haute surveillance en cas de sollicitations accidentelles, de dégradations évolutives ou de risque imminent. La surveillance inclut également l'auscultation des ouvrages et les mesures en continu (Cremona, 2002).

1.1.3. Diagnostic et analyse de risque des ouvrages de génie civil

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, évaluer l'état, analyser la sûreté et les risques de défaillance d'un système. Elles commencent à être utilisées dans le contexte des ouvrages de génie civil.

Le **diagnostic** d'un ouvrage est « *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.

L'évaluation de **l'état** d'un ouvrage consiste à déterminer, à un instant donné de sa vie (généralement à l'instant présent), sa condition structurelle (l'état des dégradations). La recherche des conditions de réalisation des fonctions de l'ouvrage est l'étape suivante qui vise alors à évaluer sa *performance*.

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 représente 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 ?

Dans une étude d'analyse de risques d'un ouvrage, on cherche donc à évaluer sa **sûreté de fonctionnement** (2^{ème} question dans la liste proposée par Kaplan). 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 1.4 :

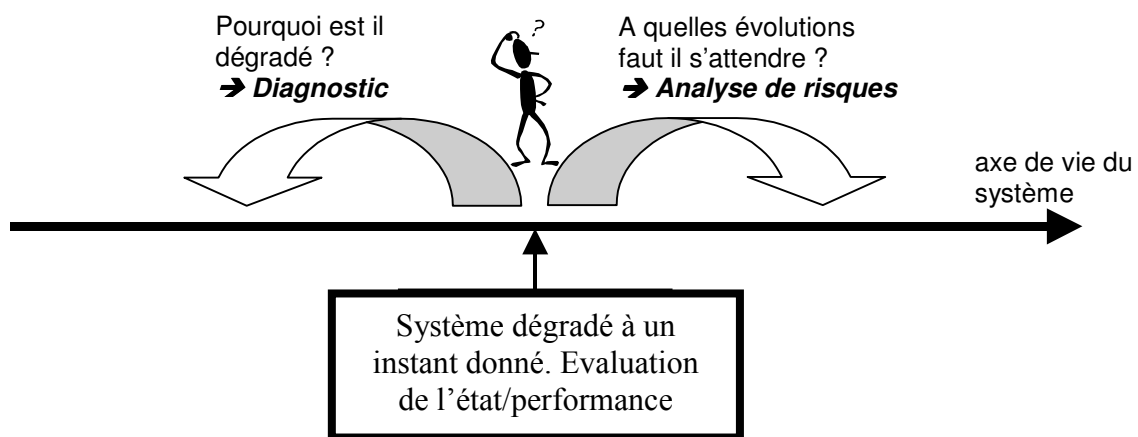


Figure 1.4. Diagnostic, évaluation de l'état/performance et l'analyse de risques

Pour établir le diagnostic d'un ouvrage, évaluer son état et sa performance, ou encore analyser les risques (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*, qui 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 sa représentation sous la forme de modèles physiques et mathématiques, appuyés par la simulation numérique ;
- la *modélisation fonctionnelle* : 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.

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 les méthodes basées sur *l'analyse statistique* et celles basées sur *l'expertise*. Nous renvoyons le lecteur intéressé par plus de détails vers (Peyras *et al.*, 2004).

1.2. Les dispositifs de gestion patrimoniale

1.2.1. Les concepts de la gestion patrimoniale

Les parcs d'ouvrages de génie civil constituent, pour la plupart, des patrimoines conséquents, de valeur technique et financière importante.

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

La gestion technique concerne toutes les phases du cycle de vie de l'ouvrage, de la conception au démantèlement éventuel. Elle 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. Ces coûts sont liés, par exemple, à l'acquisition, la construction, le fonctionnement, la maintenance, la réhabilitation...

La gestion patrimoniale s'inscrit directement dans le cadre des principes du développement durable, avec pour notions principales :

- la transmission aux générations futures ;
- la rationalisation économique ;
- la prise en compte de l'environnement.

Dans les différents domaines du génie civil, cette notion est devenue essentielle et les différents parcs d'ouvrages font l'objet d'un dispositif de gestion patrimoniale adapté. L'activité scientifique et technique relative à la gestion patrimoniale sont au cœur des préoccupations des différents gestionnaires et organismes de recherche (AUGC, 2003a, 2003b). 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, utilisateurs et personnel d'exploitation). Face à une société devenue très sensible aux risques et à leur affichage, il est indispensable que les gestionnaires assurent une sécurité élevée pour leurs ouvrages ;
- 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, afin de *« ne pas entraîner la gestion future vers une impasse, en laissant le soin à nos successeurs de réparer lourdement ou de remplacer ce que nous aurions dû traiter à temps, avec beaucoup moins de moyens »* (Delfosse, 2001).

1.2.2. La démarche de la gestion patrimoniale

La gestion d'un parc d'ouvrages (on parle aussi de politique d'Inspection Maintenance Réparation, IMR) a pour objectifs principaux (Cremona, 2002) :

- d'assurer que l'ouvrage remplisse ses fonctions requises ;
- d'assurer la sécurité des usagers et la protection de l'environnement ;

- d'assurer 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 (ou le dispositif d'IMR) 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 personnels aux différents niveaux de qualification, les bases de données (inspection, historiques...) et 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).

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 ses 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.

1.2.3. Les différents dispositifs de gestion patrimoniale

Les stratégies de maintenance reposent sur la prévision de l'évolution des ouvrages, en fonction de leur environnement et des sollicitations auxquelles ils seront soumis. Ces stratégies dépendent du type du parc d'ouvrages (Cremona, 2002). Un parc d'ouvrage est caractérisé notamment par le nombre d'ouvrages le composant (pour les parcs d'ouvrages ponctuels : ponts, barrages,... ou pour les parcs d'ouvrages linéaires : réseaux enterrés, routes, digues,...) et par leur homogénéité ou leur hétérogénéité.

Dans le contexte d'un parc important d'ouvrages ponctuels homogènes ou d'ouvrages linéaires homogènes, où des données statistiques sont disponibles et où les mécanismes sont bien maîtrisés, la maintenance basée sur la fiabilité est une méthode intéressante. Elle est fondée entre autres sur la connaissance des taux de fiabilité des éléments du système (Zwingelstein, 1996) :

- identification des paramètres rentrant dans les conditions d'états-limites ;
- caractérisation statistique de ces paramètres (lois et moments) ;
- recherche des probabilités de non respect des conditions d'état-limite.

Cette approche est couramment appliquée dans l'industrie Offshore et le nucléaire, mais aussi aux réseaux de distribution. Nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Zwingelstein, 1996).

La maintenance basée sur la fiabilité trouve ses limites dès lors que les données sont en quantités insuffisantes : mesures expérimentales difficiles, données statistiques peu nombreuses... Les calculs de probabilité deviennent alors rapidement complexes, voire impossibles et leur validité devient difficile à démontrer.

Dans le cadre d'un parc d'ouvrages ponctuels ou linéaires hétérogènes, dans des situations de structures mal connues, les données disponibles sont de mauvaise qualité ou en petite quantité et rendent difficile la prévision de l'évolution des dégradations.

Dans ce contexte, la façon la plus simple d'évaluer les évolutions futures des dégradations est d'examiner les lois d'évolution d'ouvrages existants de même conception et ayant connu des mécanismes analogues en se basant sur le retour d'expérience (Cremona, 2002).

1.3. Exemples de dispositifs de gestion patrimoniale – ouvrages à grand linéaire

Quelques gestionnaires sont confrontés à la gestion de parcs d'ouvrages à grand linéaire et hétérogènes. Nous présentons ici deux exemples représentatifs : les ouvrages enterrés d'assainissement et les réseaux de routes.

1.3.1. Les ouvrages enterrés d'assainissement

Le parc des réseaux d'assainissement en France (assainissement eaux usées et pluviales) présente un linéaire compris entre 160 000 km (Diab, 2002) et 250 000 km (Vasconcelos *et al.*, 2004) dont la moitié a plus de 40 ans. Cette différence s'explique par la méconnaissance du réseau et par la difficulté de l'estimer. Ce parc comprend deux catégories : les ouvrages visitables et les ouvrages non visitables (diamètre inférieur à 800 mm). Ces ouvrages ont pour fonction de collecter et de transporter les eaux usées et les eaux pluviales.

Les informations relatives à l'état des ouvrages sont obtenues soit visuellement, soit à l'aide d'inspections télévisées pour les plus petites sections. Ainsi, on peut collecter des données relatives à l'état des canalisations. D'autres données, relatives à leur environnement, sont également déterminantes pour évaluer la performance du réseau. Ces données portent sur la nature du sol entourant le tuyau, l'occupation du sol au dessus du tuyau (route, bâtiment...), la présence de racines près du tuyau...(Laffréchine, 1999). Le collecte de certaines de ces données est très difficile, voire impossible sans appliquer de méthodes destructives.

La gestion traditionnelle repose essentiellement sur la gestion des urgences : le gestionnaire n'intervient que lorsque la défaillance a eu lieu et que les effets se font sentir sur l'environnement (Abraham *et al.*, 1998).

Des méthodes et des outils sont développés pour améliorer la gestion de ce patrimoine dans le cadre de politiques de maintenance préventive. Pour cela, on cherche à évaluer la performance des ouvrages. Des indicateurs de performance (Diab, 2002) et (Le Gauffre *et al.*, 2004a) ont été construits. Les bases de données deviennent un outil incontournable à la bonne gestion des réseaux (Breysse *et al.*, 2002) et certains gestionnaires utilisent des SIG (Fig. 1.5) (Dupont *et al.*, 2004), (Laffréchine, 1999). Ces méthodes et outils contribuent à orienter le gestionnaire vers des solutions de maintenance adaptées à son parc d'ouvrages et à ses moyens financiers.

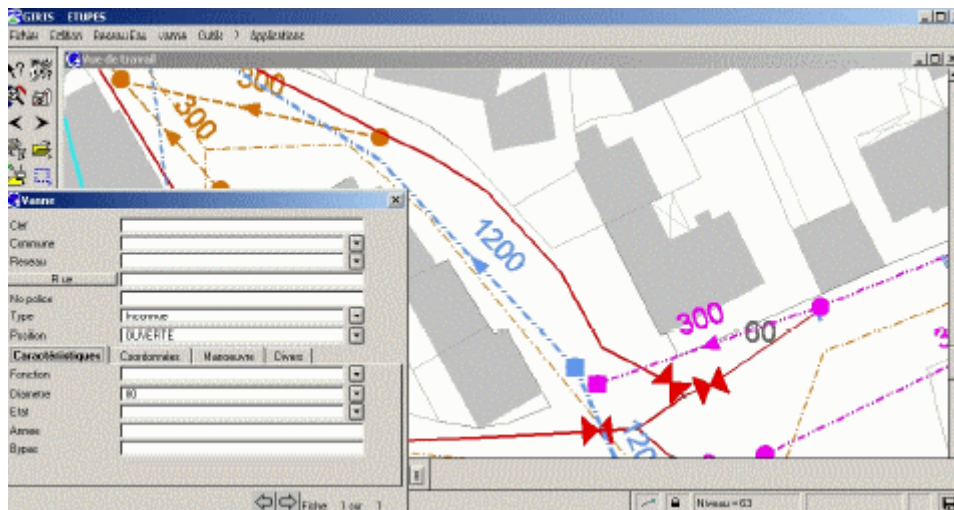


Figure 1.5. SIG dédié à la gestion des réseaux d'eau

En synthèse de cet exemple, les réseaux d'assainissement sont des ouvrages à fort linéaire placés dans un environnement mal connu et hétérogène. Les gestionnaires cherchent à mettre en place des politiques de gestion leur permettant de donner des priorités à leurs interventions (Diab, 2002). Pour cela, des méthodes sont actuellement développées : elles intègrent l'utilisation d'indicateurs de performance, de bases de données, de statistiques des observations visuelles et par caméra vidéo, et de SIG.

1.3.2. Les routes

Les routes font partie des ouvrages à grand linéaire. En France, à titre d'exemple, on estime la longueur totale du réseau de Routes Nationales (RN) à environ 30 000 km (Courilleau, 1997).

L'inspection des routes consiste à relever visuellement, et à l'aide d'outils spécifiques d'acquisitions de données tractés par des véhicules, toutes les données possibles relatives à la couche supérieure de la route (VSS, 1997, 2000).

A partir de ces relevés de surface, le gestionnaire cherche à évaluer l'ensemble de la structure portante (plate forme support) de la chaussée. Il cherche à évaluer la performance des sous-couches de la chaussée qu'il ne voit pas directement, mais dont la détérioration se manifeste par des symptômes repérables en surface. Des indicateurs de performance sont proposés pour évaluer la performance des chaussées (OCDE, 1997, SETRA, 2000b, VSS, 1996).

Ensuite ces données sont stockées et exploitées dans des bases de données (SETRA, 1993, 2003), puis dans des SIG (Fig. 1.6) afin d'orienter le gestionnaire dans ses actions de maintenance (David, 2002, EPFL, 2001, SETRA, 2000a).

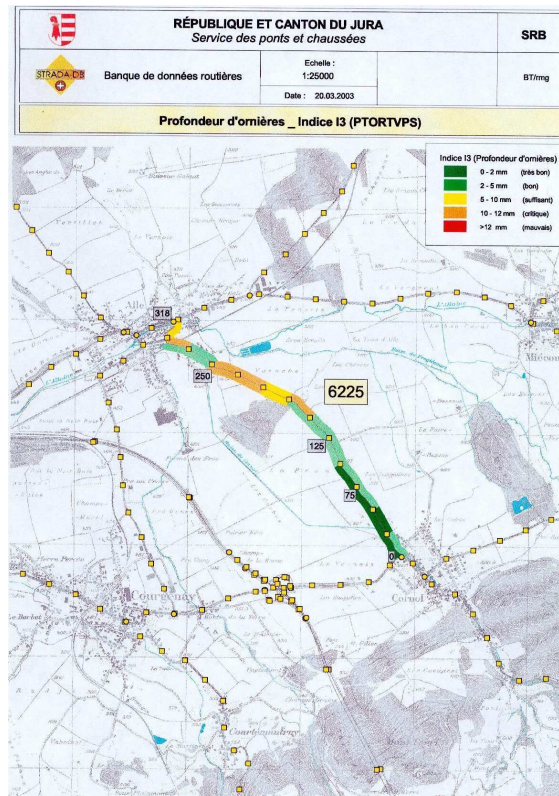


Figure 1.6. Visualisation de la performance d'un tronçon de route dans un SIG (EPFL, 2001)

Dans le domaine des routes se développent des méthodes d'évaluation de la performance à l'aide d'indicateurs. Ces derniers, couplés à des SIG permettent aux gestionnaires de mettre en place des actions de maintenance sur les tronçons routiers qui apparaissent comme prioritaires dans le SIG.

1.4. Synthèse

Les ouvrages de génie civil constituent un patrimoine qu'il est nécessaire de maintenir. Assurer la sécurité des biens et des personnes et garantir le fonctionnement et la pérennité des ouvrages sur le long terme sont les priorités. Il est donc essentiel de s'intéresser à la performance de ces ouvrages.

Les gestionnaires des parcs d'ouvrages, avec des budgets limités, doivent trouver 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).

La gestion patrimoniale, respectant les principes du développement durable, constitue une démarche adaptée. Elle repose sur la connaissance du patrimoine (l'identification des composants du parc d'ouvrages) et sur l'évaluation de sa performance au moyen d'indicateurs destinés à définir les priorités d'actions de maintenance.

En fonction de la typologie du parc d'ouvrages (ouvrages ponctuels ou linéaires, homogènes ou hétérogènes), les dispositifs de gestion patrimoniale diffèrent. Pour des parcs d'ouvrages à grand linéaire, de type hétérogène, avec des ouvrages mal connus ou placés dans des environnements eux aussi mal connus, on constate que la gestion patrimoniale s'oriente vers :

- le développement de méthodes d'évaluation de la performance ;
- la construction d'indicateurs de performance ;
- l'utilisation de SIG pour optimiser la gestion des données et aider à la décision.

Nous allons maintenant présenter en détail le parc de digues sur lequel portent nos recherches.

Chapitre 2 : Le parc français de digues de protection contre les inondations

Dans ce chapitre nous présentons le parc français de digues, et nous examinons en détail le parc de digues de protection contre les inondations, sur lequel portent nos travaux de recherche. Nous développons ensuite les modes de gestion de ces digues.

2.1. Le parc de digues

2.1.1. Définitions et typologie des digues en France

Une **digue** est une construction établie dans le but de contenir des eaux ou de se protéger de leurs effets (Kurtz, 1997). Cette définition est d'une portée générale et englobe tout les types de digues existants.

Les digues peuvent avoir deux fonctions principales : dériver l'eau et/ou canaliser ou protéger contre les inondations (Lepetit, 2002). Ainsi, le parc français de digues est composé de deux grandes familles de digues :

- **les digues en charge en permanence** : ce type de digue subit tout au long de sa vie la charge de l'eau. Ce sont les digues de navigation, d'irrigation, de drainage, de rivières canalisées ou de dérivation pour l'énergie (fig. 2.1) ;



Figure 2.1. Digue de navigation du Rhône en charge en permanence (Perrier et al., 2004)

- **les digues de protection contre les inondations** : ce type de digue n'est en charge qu'épisodiquement durant les crues des cours d'eau (Fig. 2.2). C'est ce type de digues auquel nous nous intéressons dans notre recherche.



Figure 2.2. Digue de protection contre les inondations (Mériaux et al., 2001)

D'après la bibliographie disponible (CFGB, 2004), nous avons pu dégager une première répartition des différents types de digues composant le parc français (Fig. 2.3).

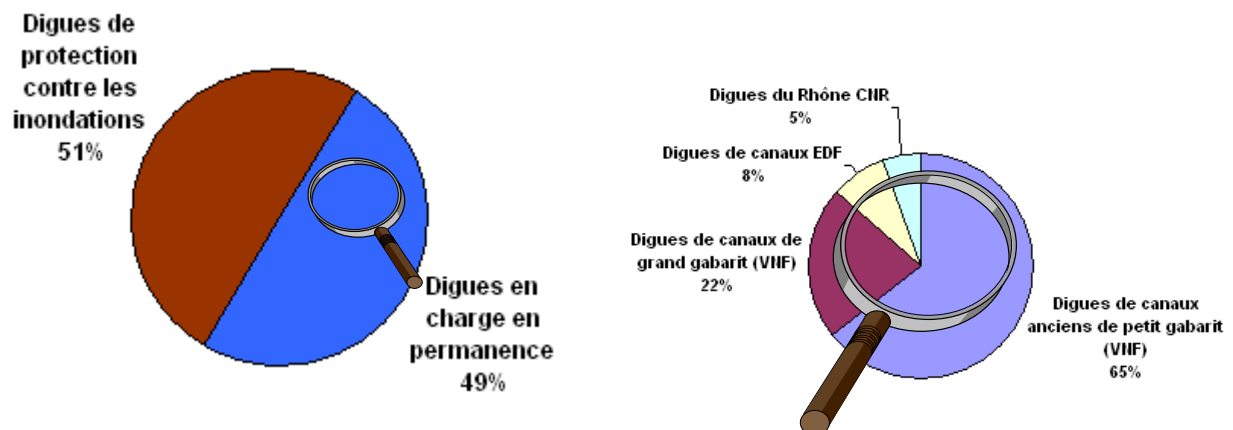


Figure 2.3. Répartition des digues en France (estimations)

Ces données ne donnent qu'un ordre de grandeur de la composition du parc français de digues, en particulier elles ne prennent pas en compte les digues « à la mer » et le linéaire des digues de canaux n'est qu'une estimation. On retient que les digues de protection contre les inondations représentent environ la moitié du parc total de digues, soit environ 7500 kilomètres d'ouvrages.

2.1.1.1. Les digues en charge en permanence

Une *digue en charge en permanence* est sollicitée en situation normale d'exploitation par la charge hydraulique. Ce cas correspond aux digues de navigation ou aux digues de dérivation pour certaines industries (hydroélectricité, nucléaire...).

Les digues de navigation le long des canaux à grand gabarit sont relativement récentes et en bon état. Par contre, les digues de navigation le long des canaux de plus petit gabarit sont plutôt anciennes, une partie d'entre elles datant du 19^e siècle. Les ouvrages sont donc hétérogènes et assez mal connus des gestionnaires, et on note environ 10 ruptures par an, en moyenne, le long des 6700 km de canaux navigables (Daly *et al.*, 2004). Les digues de navigation le long des canaux présentent divers profils, selon la topographie du site (Fig. 2.4).

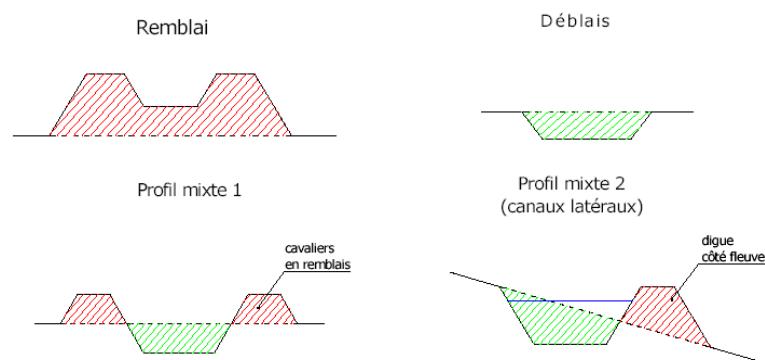


Figure 2.4. Typologie de digues de canaux en fonction de la position par rapport au terrain naturel (Daly *et al.*, 2004)

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) gère environ 400 km d'ouvrages en charge en permanence, digues de navigation et de dérivation confondues. La fonction principale de ces digues concerne, comme les digues de navigation le long des canaux, le maintien d'un niveau d'eau suffisant dans le fleuve pour permettre la navigation (Tratapel, 2004). Le profil type de ces digues est présenté à la figure 2.5.

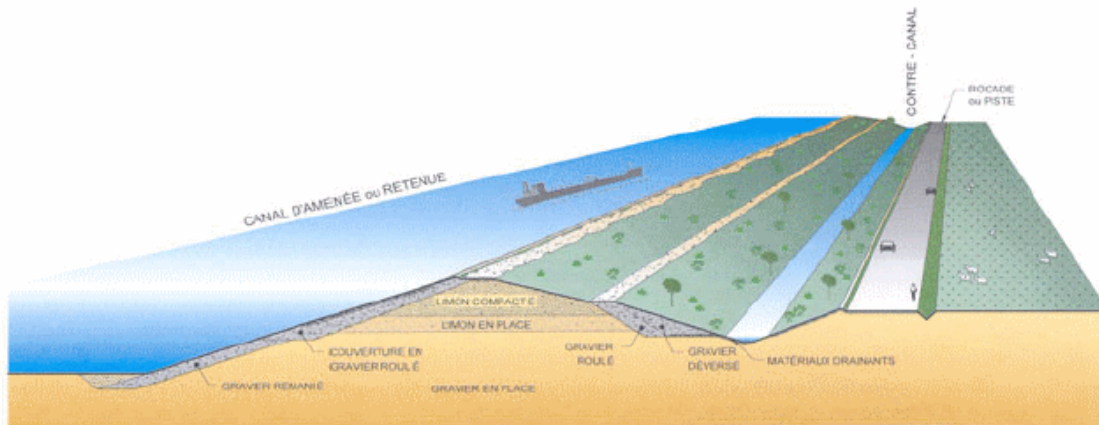


Figure 2.5. Profil type d'une digue de navigation de la CNR (Tratapel, 2004)

Les digues de dérivation sont également en charge en permanence et visent à dériver les eaux vers une installation industrielle. A titre d'exemple, nous présentons à la figure 2.6 les digues du canal d'irrigation d'Oraison (Alpes de Haute Provence) gérées par EDF qui a en charge la gestion d'environ 600 km de digues réparties sur quelques 300 canaux (Perez, 2004).



Figure 2.6. Digues du canal d'Oraison, période de travaux (Perez, 2004)

2.1.1.2. Les digues de protection contre les inondations

Les *digues de protection contre les inondations* sont des ouvrages dont au moins une partie est construite en élévation au dessus du niveau du terrain naturel et destinés à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables (Mériaux *et al.*, 2001).

Les digues de protection contre les inondations constituent le deuxième grand type de digues. On trouve ces digues essentiellement le long des cours d'eau, parfois positionnées directement

en contact avec la berge, ou éloignées de plusieurs mètres, ou plus (quelques centaines de mètres), de celle-ci (Fig. 2.7) (Mériaux *et al.*, 2001).

Il existe un type particulier de digues de protection contre les inondations : les digues de ceinture. Elles ont la particularité d'entourer, totalement ou partiellement, une zone à enjeux (ville, village, hameau, mas...) en se rattachant à flanc de coteau (cf. Chapitre 11).

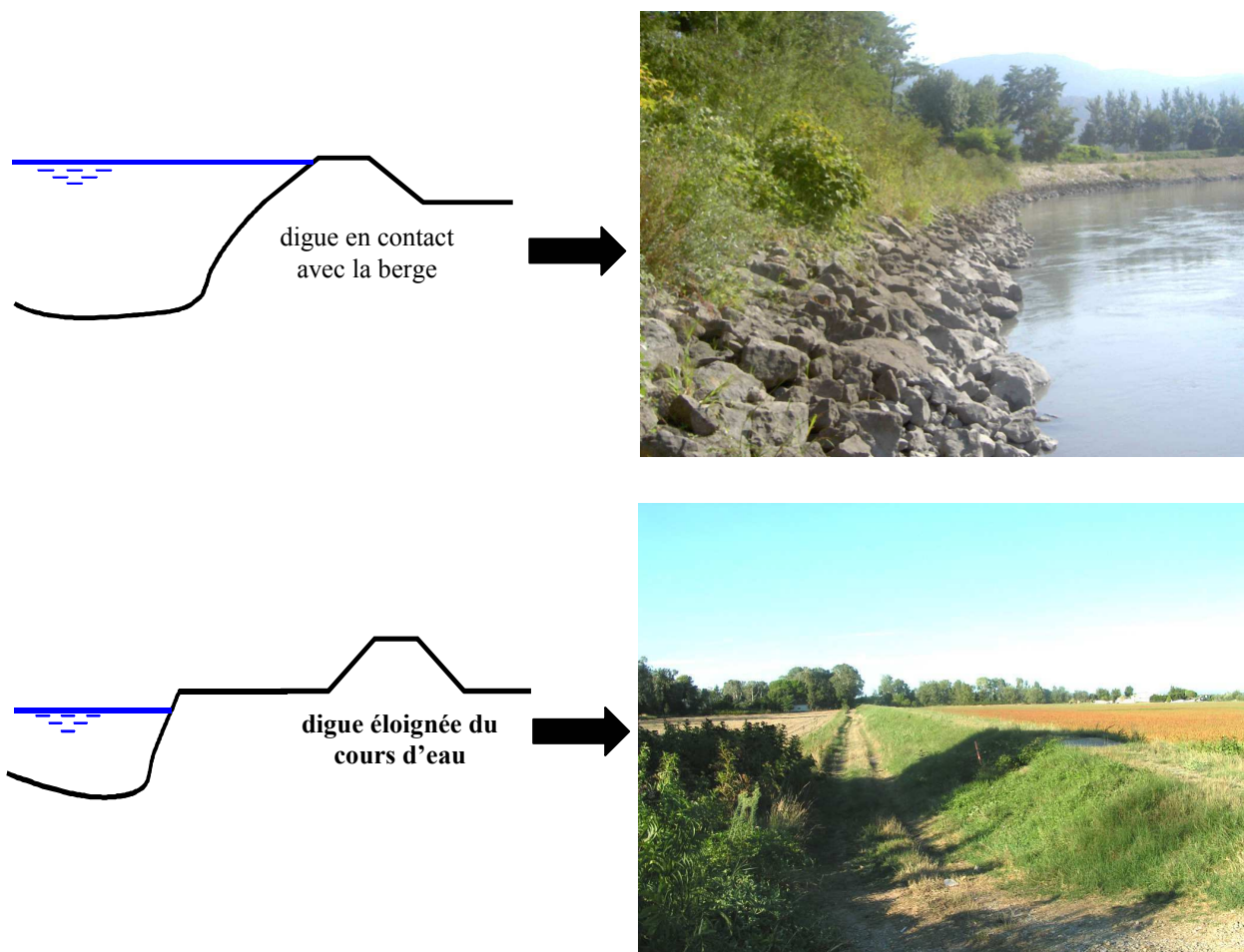


Figure 2.7. Positionnement de la digue par rapport cours d'eau

Leur fonction principale est la protection contre les inondations des zones qu'elles sont censées protéger. On estime le linéaire de digues à 7500 km sur le territoire métropolitain (Mériaux *et al.*, 2004).

Plus rarement, on peut retrouver ces digues le long de certaines côtes maritimes : c'est par exemple le cas en Camargue, aux Salins de Giraud (Fig. 2.8). Ces digues « à la mer » ont pour

fonction de protéger les estuaires et les zones littorales contre les marées hautes ou contre les effets des phénomènes dépressionnaires (Mériaux *et al.*, 2001).

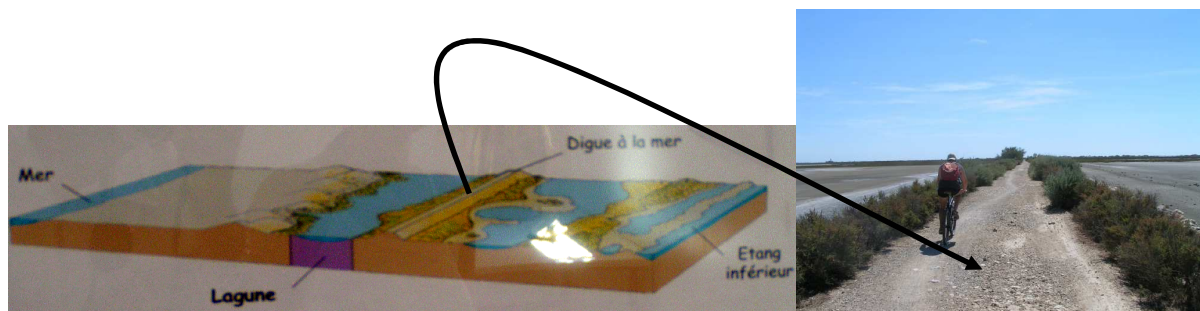


Figure 2.8. Digue « à la mer » en Camargue

2.1.2. Le recensement en cours des digues

Les digues de protection contre les inondations représentent un parc d'ouvrages très important et mal connu. Conscient de cette situation, et à la suite des inondations de Camargue de l'hiver 1993-1994, le Ministère chargé de l'Environnement a initié, au milieu des années 1990, une opération de recensement des digues afin d'avoir une idée précise du parc des ouvrages concernés à l'échelle nationale et d'identifier les menaces que peuvent présenter certaines de ces digues (Mériaux *et al.*, 2004).

La première phase du recensement a consisté, à partir de 1994 (Circulaire Interministérielle du 17 août 1994), à produire un inventaire des structures gestionnaires de digues. Depuis 1999 (Circulaire du 28 mai 1999), l'inventaire des ouvrages proprement dit a été initié.

Pour cela, une première base de données destinée aux services de contrôle de l'Administration a été développée pour le recueil, l'exploitation des informations concernant les caractéristiques techniques, l'entretien des ouvrages, les gestionnaires et les zones protégées. En 2003, ce système d'information a été rendu définitivement opérationnel à travers la base de données « BarDigues » (Fig. 2.9) (Mériaux *et al.*, 2004).

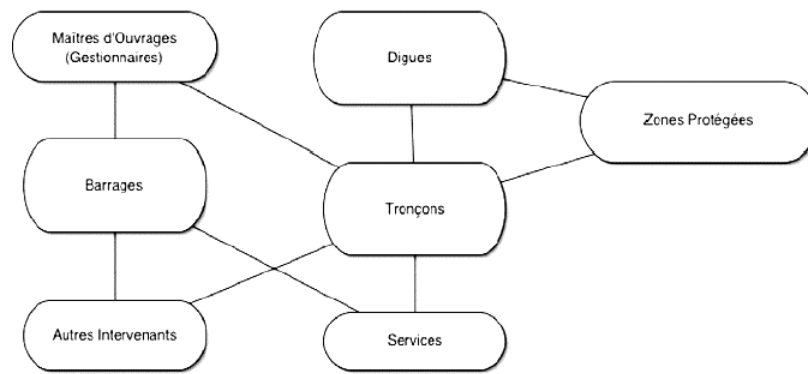


Figure 2.9. Principales tables de la base de données « BarDigues » (Mériaux et al., 2004)

Ce système d'information a pour principal objectif de recenser le linéaire de digues français, de connaître les gestionnaires des ouvrages, de dresser une typologie des digues suivant leurs dimensions et leur état évalué globalement. La base de données « BarDigues » ne contient donc pas de données techniques précises.

Le recensement des digues est donc actuellement en cours d'achèvement. En attendant que tous les départements aient identifié leur patrimoine, une première estimation effectuée en 2003 (Mériaux et al., 2003b) permettait d'évaluer une longueur totale de digues comprise entre 7600 et 12000 km en France. En 2004, une nouvelle estimation (Mériaux et al., 2004) permettait d'affiner les prévisions du linéaire de digues qui s'établirait à environ 7500 km sur le territoire métropolitain.

Au milieu de l'année 2004, les données validées de 6 régions complètes (Alsace, Aquitaine, Franche-Comté, Haute Normandie, Midi Pyrénées et Nord Pas-de-Calais, cumulant 23 départements et représentant le quart du territoire métropolitain) et de 19 départements *isolés* étaient disponibles (Mériaux et al., 2004).

Depuis le milieu des années 90, l'Etat a pris conscience de l'urgence à recenser les digues de protection contre les inondations. L'outil « BarDigues » a été développé à cet effet et un cadre administratif accompagne ce recensement. Il permettra à moyen terme d'acquérir des données importantes sur le linéaire de digues, estimé à ce jour à 7500 kilomètres environ, sur les principales caractéristiques des digues (dimensions, géométrie...), sur les gestionnaires et sur les zones protégées. Toutefois, ce recensement ne vise pas à collecter des données techniques précises, ni à connaître l'état précis et la performance des ouvrages.

Ainsi, nous pouvons conclure que nous avons à faire à un parc d'ouvrages linéaires très important et globalement mal connu.

2.1.3 Caractéristiques des digues de protection contre les inondations

2.1.3.1. Fonctionnement d'un système endigué

La référence bibliographique majeure, à partir de laquelle est construite cette section, est (Mériaux *et al.*, 2001).

On peut décrire le fonctionnement hydraulique d'une vallée endiguée (Fig. 2.10) de la façon suivante :

- lors d'une crue, la rivière déborde de son lit mineur et inonde progressivement le lit majeur endigué ;
- l'endiguement limite l'emprise de l'inondation pour les crues faibles et moyennes, mais il surélève la ligne d'eau là où la présence des digues conduit à rétrécir sensiblement la largeur du lit naturel (c'est très souvent le cas dans la traversée des villes) ;
- l'écrêtement (phénomène qui amortit les débits maximaux par inondation d'espaces en lit majeur) est, de ce fait, limité lors des crues courantes ;
- les zones protégées par des digues peuvent, dans certains cas, être inondées par le remous du fleuve à sa jonction avec un affluent, ou par les ruissellements issus de bassins versants latéraux dont les exutoires au fleuve se trouvent saturés, ou encore par remontée de la nappe phréatique ;
- on aménage parfois des déversoirs qui permettent :
 - de protéger la digue contre le mécanisme de surverse ;
 - l'écrêtement de la crue en permettant l'inondation d'une zone à enjeux limités ;
- pour les crues extrêmes, l'ensemble de la vallée est inondée, soit à la suite du fonctionnement des déversoirs, soit par des ruptures de digues ; le fleuve ou la rivière recouvrent ainsi l'ensemble de leur lit majeur, comme en l'absence de protections.

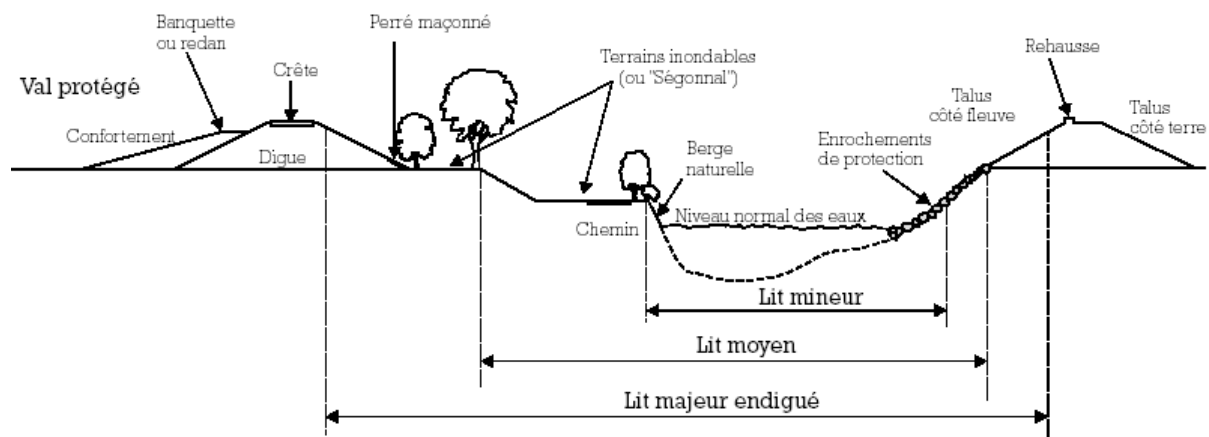


Figure 2.10. Coupe type de vallée endiguée (Mériaux et al., 2001)

2.1.3.1. Les digues anciennes

Les digues anciennes constituent l'essentiel du parc de digues de protection contre les inondations. Il s'agit le plus souvent d'ouvrages en remblai de terre, allant du limon au sable, parfois même au gravier.

L'histoire de leur construction explique leur constitution. Les digues anciennes sont souvent des ouvrages construits par étapes à plusieurs périodes, en fonction de l'évolution des usages du fleuve ou des besoins de protection (Fig. 2.11).

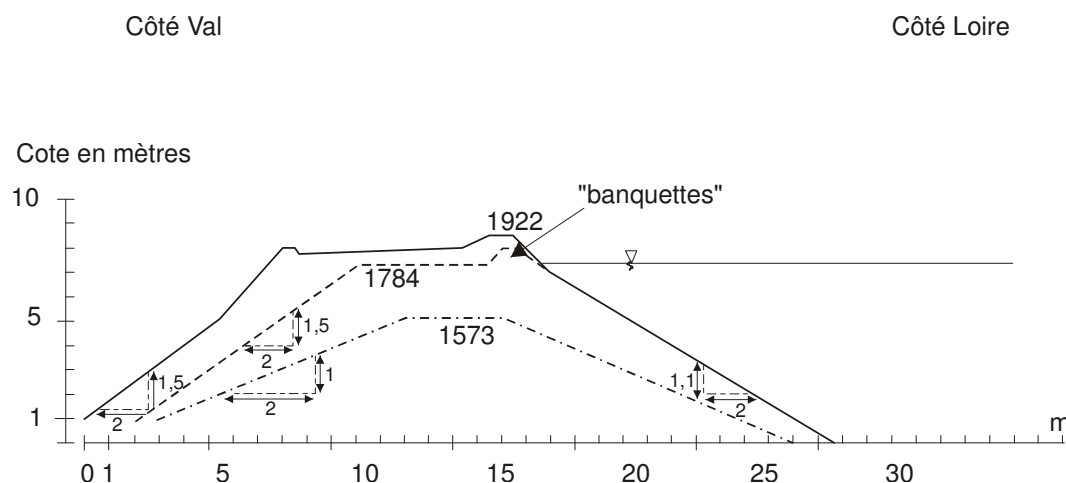


Figure 2.11. Coupe caractéristique des digues de Loire (Mériaux et al., 2001)

Le plus souvent, les digues anciennes ont été édifiées à partir de matériaux pris sur place. Ainsi, la variabilité des matériaux rentrant dans la constitution des ouvrages peut être grande, y compris le long d'un même cours d'eau (matériau sableux le long du bassin moyen et matériau limoneux en approchant de l'embouchure). Mais dans une section donnée, il s'agit

généralement de remblais homogènes sans zonage et sans dispositifs particuliers de drainage interne (Fig. 2.12).

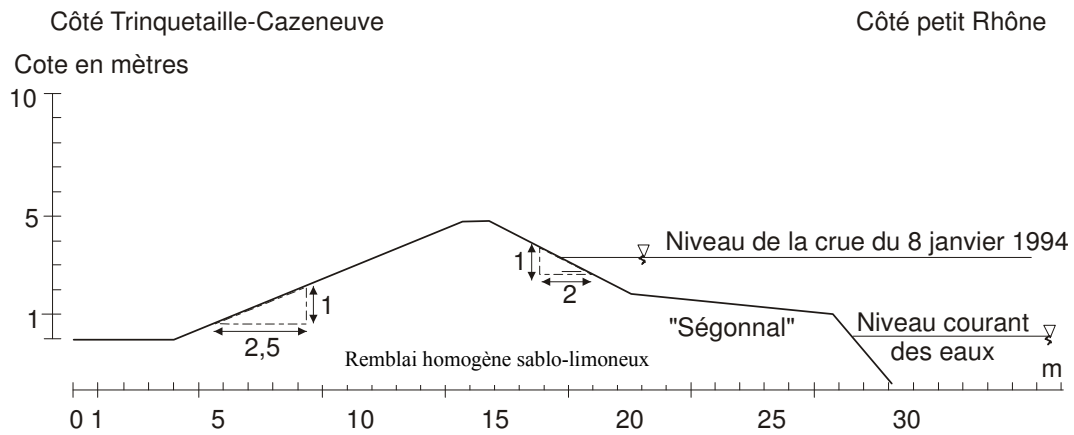


Figure 2.12. Coupe type des digues du Petit Rhône en Camargue (Mériaux et al., 2001)

L'absence de moyens lourds de terrassement et de compactage lors de l'édification des digues anciennes conduit à des remblais de relativement faible compacité sans ancrage particulier dans la fondation, laquelle n'a pas fait l'objet de traitement particulier pour assurer son étanchéité.

2.1.3.2. Les digues récentes

Les digues les plus récentes font appel à des conceptions se rapprochant de celles des barrages. On y retrouve un zonage des matériaux avec séparation des fonctions d'étanchéité et de drainage (Fig. 2.13).

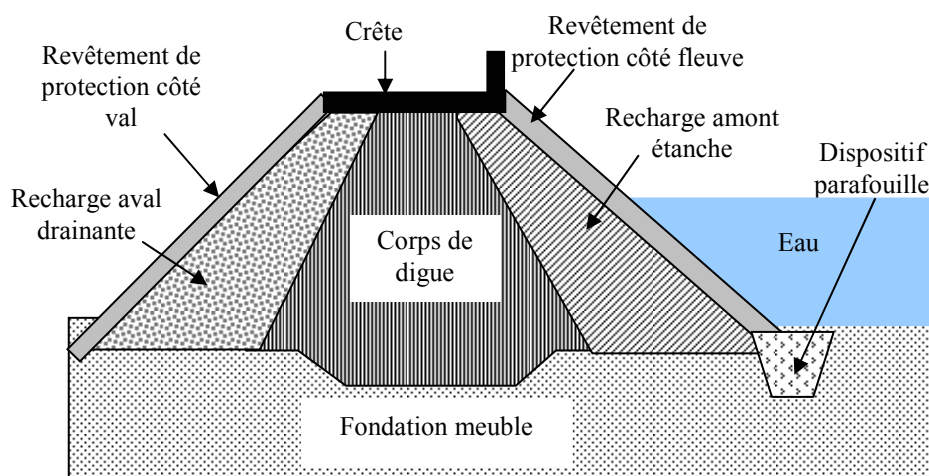


Figure 2.13. Coupe type des digues zonées

Dans les secteurs où l'emprise disponible au sol était réduite (zones urbaines en général), on a édifié des murs poids épais, en maçonnerie de pierres appareillées. C'est le cas de la Loire dans la plupart des traversées de villes, de la Garonne à Toulouse et Bordeaux, du Rhône en Arles et dans bien d'autres secteurs.

Souvent, ces murs, au parement fortement pentu coté fleuve, sont épaulés côté val par un remblai en terre ou en matériau grossier qui, par exemple, supporte une voie de circulation (Fig. 2.14). Dans la technique moderne, le béton a remplacé la maçonnerie en laissant parfois encore une place à cette dernière comme traitement esthétique des parements vus.

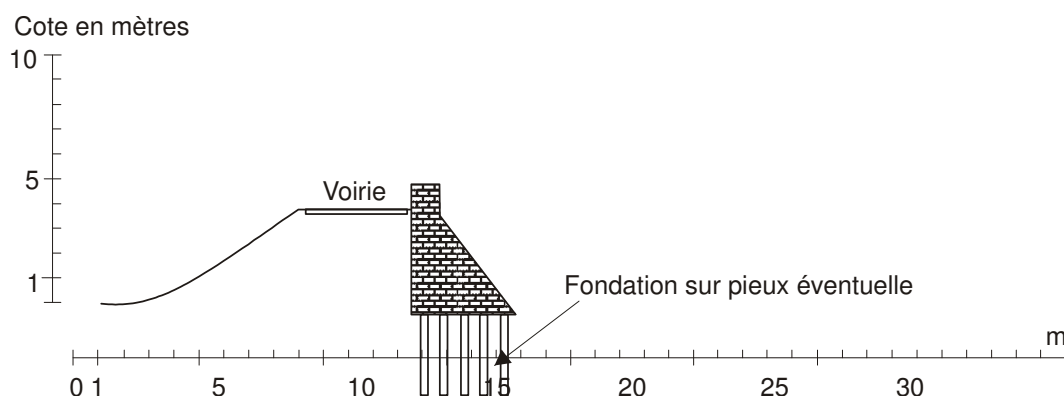


Figure 2.14. Coupe type d'une digue en maçonnerie (Mériaux et al., 2001)

2.1.3.3. Les déversoirs

Quel que soit le matériau de construction, les digues ne sont pas conçues pour contenir les crues exceptionnelles (typiquement, de période de retour égale ou supérieure à 100 ans). Pour éviter la surverse qui entraînerait de façon quasi certaine leur rupture brutale, on aménage, dans certains cas, des déversoirs dont la cote est calée quelques décimètres (classiquement de l'ordre du mètre pour les déversoirs de Loire) en dessous de la crête de digue.

Ces déversoirs peuvent être constitués de simples zones basses aménagées dans les digues, mais il s'agit le plus souvent de seuils déversants avec une carapace en maçonnerie de pierres appareillées recouvrant la partie en remblai. Le profil du seuil se poursuit par un radier aval, faisant office de zone de dissipation de l'énergie de l'eau. Parfois, le seuil en maçonnerie est surmonté d'un merlon en terre calé à une cote légèrement inférieure à la crête de digue. Ce dispositif fusible est censé être rapidement érodé dès le début de la surverse, libérant ainsi une section plus grande pour l'écroulement de la crue (Fig. 2.15).

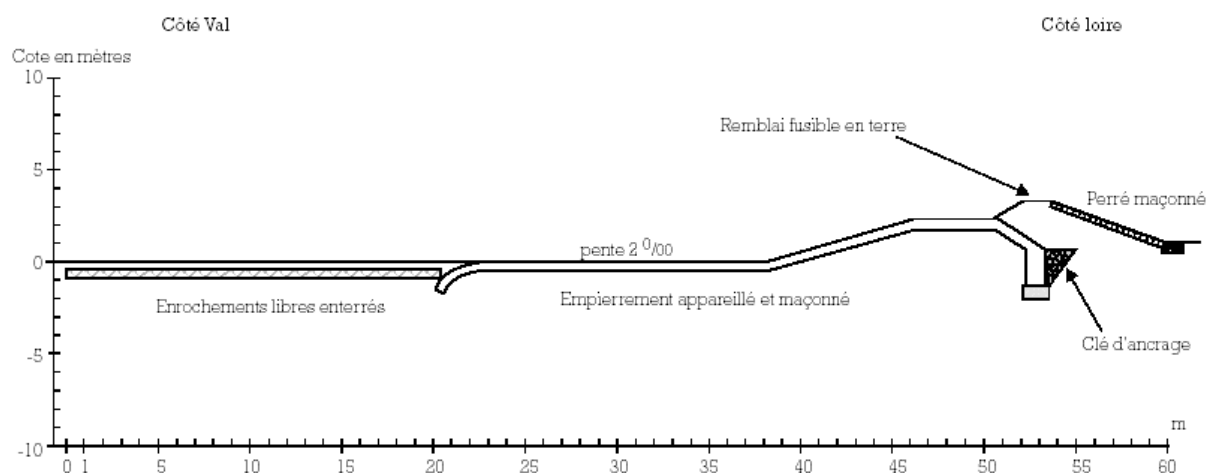


Figure 2.15. Coupe type d'un déversoir sur la Loire (Mériaux et al., 2001)

L'intérêt d'un dispositif fusible est de retarder la mise en fonction du déversoir ; l'inondation du val se produit donc moins fréquemment. Les déversoirs les plus récents sont des ouvrages totalement en béton.

2.1.3.4. Des ouvrages singuliers

Les digues sont des ouvrages linéaires. Cependant leur homogénéité longitudinale est loin d'être la réalité. En effet, de nombreux ouvrages singuliers y sont implantés. Il en est ainsi des passages batardables et rampes d'accès au fleuve, des traversées par aqueducs, galeries et conduites, équipées ou non de clapets (Fig. 2.16).



Figure 2.16. Ouvrage singulier dans la digue : une conduite

2.1.3.5. Synthèse

Le parc de digues de protection contre les inondations en France est constitué essentiellement d'ouvrages anciens, voire très anciens, construits de manière successive selon l'histoire des crues des cours d'eau. Il s'agit d'ouvrages le plus souvent en remblai de terre, édifiés sans véritables moyens de terrassement et de compactage et qui apparaissent, au final, relativement fragiles.

Nous avons présenté les divers profils de digues, liés à leur conception (digue anciennes ou récentes, en site urbain...) et/ou à la disponibilité des matériaux à proximité des cours d'eau, les ouvrages particuliers tels que les déversoirs et les ouvrages singuliers insérés dans les digues. Cette présentation montre un parc d'ouvrages anciens, particulièrement hétérogènes.

2.1.4. Des enjeux importants

En France, d'après le Ministère chargé de l'Environnement, 4,5 millions de personnes occupent 20.000 km² de zones inondables, soit 8000 communes concernées par le risque d'inondation.

Les premières estimations issues de ce recensement des digues donnent une idée de l'importance des enjeux. D'après une estimation réalisée au deuxième semestre 2004, la France comporte entre 6 000 et 7 500 km de digues, gérées par environ un millier de gestionnaires différents. Cela représente environ 2.200 à 2.700 zones d'une superficie totale de l'ordre de 15.000 à 18.000 km², abritant une population comprise entre 1,6 et 2 millions d'habitants.

Dans l'attente de statistiques précises provenant du recensement complet des digues, on peut citer quelques exemples de zones protégées par les digues le long de certains cours d'eau (Mériaux *et al.*, 2001).

Sur les 450 km de la Loire Moyenne (entre le Bec d'Allier et le Bec de Maine), 600 km de digues protègent quelques 100.000 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.

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.

On s'aperçoit, à travers ces deux exemples bien renseignés, que les enjeux sont importants dans les zones protégées par les digues. Il existe en France de nombreux cours d'eau endigués présentant des enjeux tout aussi considérables. Ainsi, on peut affirmer qu'en France, des centaines de milliers de personnes occupent des zones protégées par les digues. Le recensement en cours permettra d'établir à moyen terme des statistiques précises à ce sujet.

2.1.5. Une sécurité perfectible

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).

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).

En Aquitaine, suivant les cours d'eau, des deux tiers à la totalité du linéaire de digues apparaissent en état dégradé ou inconnu (Mériaux *et al.*, 2004).

Ces exemples montrent qu'à la plupart des crues majeures, les digues présentent 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.

2.1.6. Des ouvrages mal documentés

Dans le cadre du recensement en cours, à propos de l'état des digues d'Aquitaine, pour les digues classées « en mauvais état » ou « état inconnu » par les préfets, c'est « état inconnu » qui prévaut largement (Mériaux *et al.*, 2004). Cet aspect est suffisamment éloquent pour montrer que les digues sont mal connues et mal documentées.

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).

Une autre difficulté majeure provient de l'hétérogénéité des digues. En effet, parfois le gestionnaire ne dispose de données précises que sur un tronçon de digue de quelques mètres de long. Mais, à cause de cette hétérogénéité, il ne peut extrapoler les résultats acquis à d'autres tronçons. Parfois même, il ne peut faire cette extrapolation entre deux sondages, pourtant proches l'un de l'autre.

Les digues apparaissent donc mal documentées, voire pas du tout ; et l'acquisition de données sur l'ensemble du linéaire est complexe et coûteuse du fait de l'hétérogénéité des digues.

2.1.7. Synthèse

Nous avons présenté les deux types de digues existants : les digues en charge en permanence et les digues de protection contre les inondations. Ces dernières sont l'objet de nos recherches.

Un recensement des digues de protection contre les inondations initié par le Ministère chargé de l'Environnement est en cours pour déterminer le linéaire de ces digues en France, leurs gestionnaires, les zones protégées par ces digues et quelques informations relatives à la géométrie des digues. Aujourd'hui, le linéaire de digues est estimé à 7500 km.

Nous avons présenté les principales caractéristiques des digues : leur constitution, leurs profils et leurs dimensions. Globalement, les digues anciennes ont été construites sans véritable moyens de terrassement et de compactage. La diversité des matériaux utilisés et la présence de nombreux ouvrages singuliers dans les digues leur confère 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, conduisant le plus souvent, lors de crues majeures à des ruptures.

Les premiers résultats du recensement en cours montrent que peu d'informations sont disponibles sur l'ensemble du linéaire : les digues sont donc des ouvrages mal documentés et l'acquisition d'informations pour évaluer l'état des digues reste complexe et coûteuse.

2.2. Les modes de gestion des digues

2.2.1. Des acteurs très nombreux

Plusieurs catégories d'acteurs (Fig. 2.17) sont concernés de plus ou moins près par la gestion des digues. Parmi eux nous retenons (Mériaux *et al.*, 2001) :

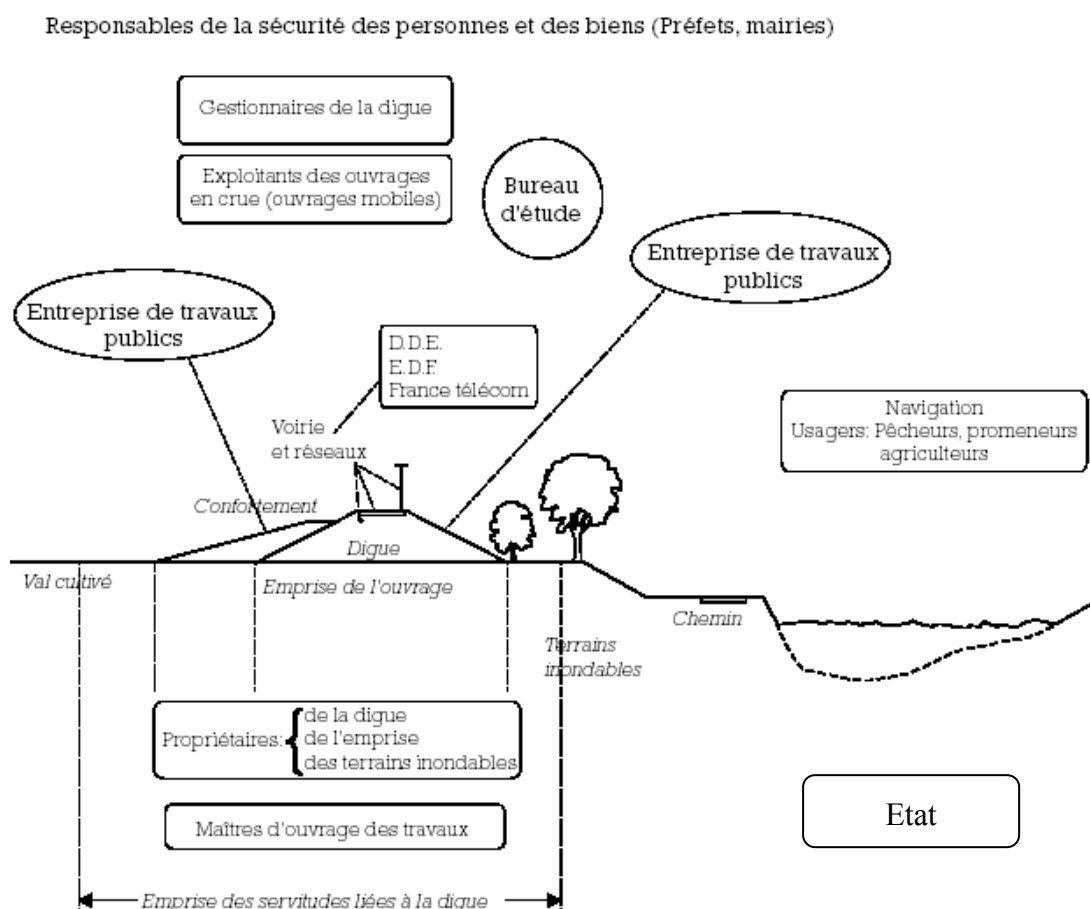


Figure 2.17. Identification des intervenants dans la gestion des digues (Mériaux *et al.*, 2001)

- **le propriétaire de la digue** (l'ouvrage stricto sensu) : il s'agit en général de celui qui a construit la digue. Sa forme juridique est variable : Etat, Collectivité locale ou groupement de collectivités, Association Syndicale Autorisée, Association Syndicale Forcée, personnes privées, ... ;
- **le propriétaire de l'emprise de la digue**, c'est à dire du fonds sur lequel l'ouvrage a été construit. Le plus souvent le propriétaire de l'emprise est le propriétaire de la digue, mais on rencontre des situations où il s'agit de deux entités différentes, dont les liens ne sont pas toujours clairement établis ;
- **le propriétaire ou le gestionnaire de constructions ou de réseaux** installés sur ou dans le corps de digue : bâtiments, locaux de service, lignes électriques ou téléphoniques, vannes et batardeaux, canalisations, voies de communication,... ;
- **le propriétaire ou le gestionnaire des terrains et/ou bâtis (inondables)** situés entre la digue et le lit mineur du fleuve ou de la rivière ;
- **le propriétaire ou le gestionnaire des terrains et/ou bâtis protégés** (côté val, côté terre), situés à l'abri de la digue, mais exposés au risque de rupture ou d'inondation après rupture ;
- **le gestionnaire de la digue** : si le gestionnaire est différent du propriétaire de la digue, il est chargé par ce dernier, en principe sous couvert d'un contrat formel, d'assurer l'entretien et le fonctionnement des ouvrages ;
- **le Service de Police des Eaux**, représentant l'administration française et responsable du suivi des procédures d'autorisation des ouvrages et généralement en charge du contrôle de ces ouvrages.

En plus de ces acteurs, déjà très nombreux, viennent s'ajouter le maître d'ouvrage des travaux de construction, de rehaussement ou de confortement de la digue, les bureaux d'ingénierie (privé ou public), les entreprises chargées des travaux, les services responsables de la sécurité des biens et des personnes (Préfet, Maires). Etant donné le nombre conséquent d'acteurs potentiels intervenant de près ou de loin dans la gestion des digues, la première difficulté consiste à les identifier (Mériaux *et al.*, 2001).

Le recensement en cours met en évidence que, dans de nombreux cas, le propriétaire (ou le gestionnaire) n'est pas connu. A ce titre, son identification et son activation (lorsqu'il n'exerce plus ses fonctions de propriétaire) font partie des priorités des services de Police des Eaux (Circulaire du 6/8/2003).

Les acteurs intervenant dans la gestion des digues sont très nombreux et trop souvent les propriétaires et maîtres d'ouvrage sont apparus inconnus ou inactifs. Cette complexité dans les intervenants et l'absence dans de nombreux cas de structure motrice dans les actions à engager rendent la gestion des digues perfectible.

2.2.2. La responsabilité du propriétaire

Le propriétaire des digues (collectivités locales ou leur groupement, association syndicale, personnes privées...) est pleinement responsable, tant au civil qu'au pénal, des dommages qui peuvent être occasionnés par l'ouvrage et en particulier, le cas échéant, par sa rupture (Code Civil, article 1383 et suivants).

La surveillance et l'entretien des digues sont de la responsabilité du propriétaire. Les principes de surveillance et d'entretien des digues sont rappelés par la réglementation (circulaire du 6/8/2003). A ce titre, les services de contrôle doivent demander au propriétaire de définir des consignes permanentes de surveillance et d'entretien des ouvrages, portant notamment sur le contrôle de la végétation, l'entretien des accès, et les mesures à prendre en cas de désordres et/ou lors des crues.

La surveillance repose notamment sur les visites périodiques (périodicité au moins annuelle) qui ont pour but l'examen, notamment visuel, des digues. Par ailleurs, le propriétaire doit procéder systématiquement à une visite de l'ouvrage après chaque événement hydraulique l'ayant sollicité de manière significative.

Le propriétaire est responsable de l'entretien, et de façon plus générale, de l'ensemble des travaux de maintenance des digues :

- les travaux réguliers d'entretien réalisés toute l'année : traitement de la végétation, perrés, animaux fouisseurs,... ;
- les travaux de grosse maintenance ou de mise à niveau : confortement, recharge,...

Le rôle du propriétaire est de procéder régulièrement au diagnostic des digues. Celui-ci comprend une évaluation régulière de l'état des ouvrages (état structural) et une analyse de leur capacité hydraulique.

Enfin, le propriétaire est tenu de constituer et de maintenir à jour un dossier comprenant tous les documents administratifs, techniques, de gestion et le registre de l'ouvrage (circulaire 6/8/2003).

Les obligations du propriétaire de digues sont inscrites dans le cadre réglementaire qui précise les principes de la gestion des digues. Le propriétaire doit entretenir et surveiller ses ouvrages et être capable de fournir au service de contrôle un dossier complet sur les ouvrages. Il est en outre responsable de l'état de ses ouvrages et des travaux de maintenance et de remise à niveau nécessaires à un fonctionnement satisfaisant.

2.2.3. Le contrôle par l'administration des digues intéressant la sécurité publique

La réglementation récente (circulaire du 6/8/2003) fixe les principes du contrôle des digues de protection contre les inondations intéressant la sécurité publique par l'administration (service de Police des Eaux). Elle vise à s'appliquer de façon très large au parc de digues en France, et plus particulièrement aux digues n'ayant pas fait l'objet d'entretien et de maintenance depuis de nombreuses années et dont, pour certaines d'entre elles, les propriétaires ne sont pas nécessairement identifiés.

Les mesures prévues dans la réglementation pour le contrôle des digues sont décrites ci-après. Elles prévoient les étapes chronologiques suivantes.

2.2.3.1. Identification des digues intéressant la sécurité publique – identification des propriétaires

Compte tenu de la méconnaissance du parc de digues de protection contre les inondations, la première mission du service de Police des Eaux est, dans un premier temps, l'identification des digues intéressant la sécurité publique (*digue dont la rupture ou la submersion éventuelle pourrait provoquer des inondations ayant, du fait des hauteurs d'eau et/ou des vitesses atteintes, des répercussions graves pour les personnes* – circulaire 6/8/2003), dans un deuxième temps, l'identification des propriétaires.

2.3.3.2. Prise en main par l'administration du contrôle des digues

Une fois cette étape réalisée, le contrôle proprement dit des ouvrages par l'administration débute. Il consiste en une première visite qui a pour objet l'examen initial de la sécurité et des risques des ouvrages. Pour cette visite initiale, le service de Police des Eaux demande au

propriétaire de réaliser, d'une part, un débroussaillage de la digue pour permettre une inspection visuelle, d'autre part, un relevé topographique de l'ouvrage s'il est inexistant ou insuffisant, ainsi que la constitution du dossier de l'ouvrage.

C'est également au cours de cette étape que sont définies les éventuelles études et travaux nécessaires à une remise à niveau de la sécurité des digues :

- pour les digues paraissant en bon état, le service de Police des Eaux demande au propriétaire d'effectuer un diagnostic hydraulique des ouvrages : détermination de la durée de retour de l'événement hydraulique susceptible de provoquer une surverse, analyse du fonctionnement de la digue pour les divers scénarios correspondant à cet événement hydraulique et à des événements hydrauliques plus graves ;
- pour les digues dont l'état apparaît perfectible, le service de Police des Eaux demande en plus un diagnostic structural approfondi de la digue : éléments permettant d'apprécier les faiblesses de l'ouvrage, définition des travaux nécessaires à sa remise en état.

A la suite de ces diagnostics, le service de Police des Eaux demande au propriétaire d'effectuer ces travaux de maintenance et de remise à niveau.

2.3.3.3. Contrôle régulier des digues

Dans une phase de contrôle régulier, une fois les ouvrages et les propriétaires identifiés, et une fois les ouvrages remis à niveau, le rôle de l'administration est d'apprécier si le propriétaire remplit les obligations de maintien en bon état de ses ouvrages, notamment ses obligations de surveillance, d'entretien et d'inspection régulière. Pour cela, l'administration procède à des contrôles fixés par la réglementation (circulaire 6/8/2003) qui prévoit les visites suivantes :

- les visites régulières au moins annuelles ;
- les visites particulières en crue et post-crue ;
- les visites de contrôle décennales, prévoyant une inspection détaillée des digues.

2.2.4. Synthèse sur le dispositif de gestion des digues

Le premier aspect de la gestion des digues de protection contre les inondations concerne la mise en place en cours de la politique d'Inspection Maintenance Réparation, élaborée pour s'adapter à un parc d'ouvrages globalement en mauvais état, mal surveillé et mal maintenu.

La récente réglementation fixe des mesures préliminaires de démarrage, puis de diagnostic des ouvrages, et enfin de surveillance et de contrôle régulier.

Le deuxième aspect de la gestion du parc de digues est la complexité à établir les programmes de maintenance et de réparation des digues, liée à un important linéaire d'ouvrages, une méconnaissance du parc et une hétérogénéité forte des ouvrages globalement en mauvais état. Il est donc fondamental de fournir aux gestionnaires des digues et aux services de Police des Eaux qui les contrôlent, des méthodes et des outils pour prioriser les actions et les interventions. Notre recherche s'inscrit dans ce cadre.

Chapitre 3 : L'analyse de la performance des digues

Ce chapitre traite, d'une part, de l'évaluation de la performance des ouvrages de génie civil - nous en définissons les concepts, proposons une démarche et étudions des exemples -, d'autre part, de la pratique actuelle d'évaluation de l'état des digues et des besoins.

3.1. Démarche d'évaluation de la performance des ouvrages de génie civil

3.1.1. Définitions et conception des indicateurs de performance

Les gestionnaires d'ouvrages de génie civil, dans le cadre d'une gestion patrimoniale, ont besoin d'évaluer la performance de leur parc d'ouvrages. Pour cela, ils utilisent des *indicateurs de performance*.

Nous tentons ici de définir les *paramètres*, *indicateurs*, *critères* et *indicateurs de performance*. Selon les domaines d'activités, ces termes peuvent être employés différemment et leur signification peut varier sensiblement. Pour notre recherche, nous retiendrons les définitions ci-dessous.

Un ***indicateur de performance*** est défini par (Bonnetfous *et al.*, 2001) comme « *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* ».

En génie civil, un *indicateur de performance* porte une information sur la capacité d'un ouvrage à répondre aux sollicitations pour lesquelles il a été conçu. A ce titre, un *indicateur de performance* n'est qu'un type particulier d'*indicateur*.

Un ***indicateur*** est défini comme « *un paramètre ou valeur calculée à partir de paramètres donnant des indications sur un phénomène, 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). Un indicateur peut donc être un *paramètre* ou être composé de plusieurs *paramètres*. Un ***paramètre*** correspond à des informations mesurées ou relevées sur l'ouvrage.

Ces indicateurs peuvent ensuite être agrégés pour évaluer un *critère*. Un **critère** est défini comme « *un facteur de jugement sur la base duquel on mesure et on évalue un objet* » (Laaribi, 2000) et comme « *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).

La performance d'un ouvrage est généralement évaluée à partir de critères. Ainsi, le gestionnaire doit ensuite combiner tous les critères qu'il aura à sa disposition pour obtenir une évaluation globale de la performance de son ouvrage. Dans ce cas des méthodes multicritères peuvent être employées (cf. partie 3). Toutefois, le gestionnaire peut aussi se contenter de la valeur de chaque critère sans les agréger. En effet, les gestionnaires ont tendance à développer un critère pour une fonction spécifique que l'ouvrage doit réaliser. Ils peuvent donc analyser la performance de fonctions particulières liées à un composant particulier (Cremona, 2002).

A ce titre, un indicateur de performance pourra donc résulter de la valeur (Fig. 3.1) :

- d'un indicateur ;
- d'un critère ;
- d'un raisonnement fondé sur plusieurs critères.

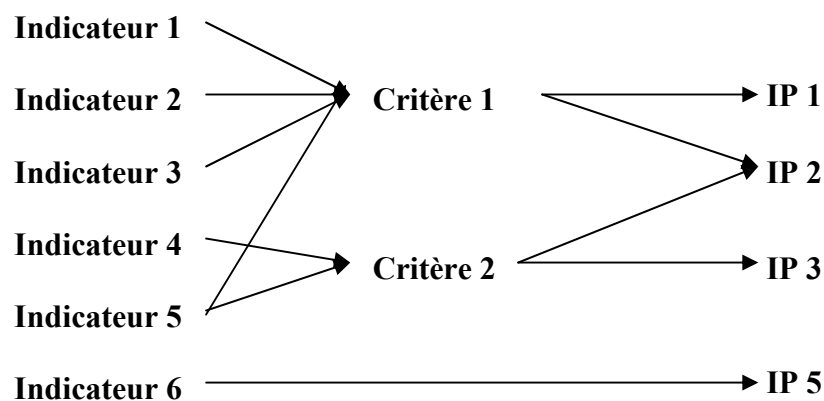


Figure 3.1. Construction des indicateurs de performance (IP)

Les indicateurs de performance sont des informations destinées à aider un acteur à évaluer le résultat d'une action. La valeur de ces indicateurs de performance provient de la valeur des indicateurs et des critères à partir desquels ils sont construits.

Nous étudions maintenant les étapes successives de la démarche d'évaluation de la performance des ouvrages de génie civil.

3.1.2. Démarche générale d'évaluation de la performance

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, 2002).

L'évaluation de l'état est une étape de diagnostic 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 comme en conception, mais avec l'état structural réel de l'ouvrage en cours d'exploitation.

Quel que soit le type d'ouvrage de génie civil, la démarche générale pour pouvoir, dans une dernière étape, en évaluer sa performance, est quasiment identique. L'étude d'exemples d'évaluation de la performance de divers ouvrages de génie civil nous permet de dégager une démarche générale. Elle repose sur 3 étapes (Cremona, 2002) :

- l'analyse historique et documentaire du parc d'ouvrages ;
- la définition des éléments des ouvrages et de leurs fonctions ;
- l'analyse des mécanismes de dégradation et/ou de rupture.

La première étape d'analyse du parc d'ouvrages consiste, pour le gestionnaire, à définir précisément le problème de gestion auquel il est confronté. Ces problèmes peuvent être divers. Il peut s'agir, par exemple, d'une défaillance de l'ouvrage ou de ses composants, d'une dégradation de l'ouvrage, d'un parc d'ouvrage vieillissant qu'il faut remettre à niveau...

Au préalable, l'étude de la documentation des ouvrages (documents de conception et d'inspection) est un pré-requis essentiel à l'évaluation de la performance. En effet, ces documents contiennent les informations importantes qui sont nécessaires pour une évaluation complète. Ils doivent être vérifiés en ce qui concerne leur exactitude et, en particulier, s'ils ont été mis à jour après des modifications de la structure.

Lors de la deuxième étape de définition des éléments de l'ouvrage et de leurs fonctions, le gestionnaire cherche à définir le système de génie civil qu'il doit gérer. Pour cela, il analyse son ouvrage pour connaître, d'une part, les composants de son ouvrage et, d'autre part, les

fonctions qu'ils doivent accomplir. Ainsi le gestionnaire pourra déterminer sur quels composants il devra agir par rapport à son problème de départ.

Lors de la dernière étape, le gestionnaire cherche à analyser et à modéliser les mécanismes affectant l'ouvrage. Le gestionnaire peut alors évaluer la performance de l'ouvrage grâce à des indicateurs de performance.

3.1.3. Exemple d'indicateurs de performance

Prenons tout d'abord pour exemple la construction d'un indicateur de performance, dans le domaine des réseaux d'assainissement, développé par (Diab, 2002). L'objectif de cette étude est de prioriser les actions de réhabilitation du réseau dans le cadre d'un plan d'intervention. Pour cela, il est nécessaire de déterminer les zones à risques et les hiérarchiser (Diab, 1993). La méthodologie mise en œuvre repose sur une approche multicritère simple prenant en compte les risques hydrogéotechniques, hydrauliques, structurels mais aussi les conséquences des désordres (risque d'impact). Elle est inspirée du contexte parisien (nature du sol urbain, ouvrages unitaires visitables... (Tab. 3.1).

RISQUES	CRITERES		INDICATEURS (exemples)
		Note	
1) Liés aux terrains (risques géotechniques) NOTE G	1.1 entraînement de fines 1.2 tassement 1.3 dissolution de couches de gypse 1.4 vides 1.5 argiles gonflantes	f t d v a	- position du collecteur par rapport à la couche de terrain - importance des circulations d'eau - épaisseur de la couche de gypse - importance de la surcharge
2) liés à l'effluent (risques hydrauliques) NOTE H	2.1 action mécanique de l'effluent 2.2 action physico-chimique 2.3 charges hydrauliques	m p c	- pente du tronçon - charriage de sable - forme du radier - présence de rejets chimiques - mise en charge - tronçon soumis aux crues de Seine
3) liés à l'ouvrage (risques endogènes) NOTE E	3.1 géométrie du collecteur 3.2 état du tronçon	g e	- type de la section - épaisseur et nature des matériaux - nombre, longueur, répartition des fissures
4) liés au milieu environnant et au fonctionnement du réseau d'assainissement (risques d'impact) NOTE I	4.1 conséquences sur le fonctionnement du réseau d'assainissement 4.2 conséquences sur le fonctionnement des autres réseaux 4.3 répercussions en voirie 4.4 conséquences sur les immeubles proches et sur l'environnement politique et social	r x w z	- rang du collecteur (primaire, secondaire, émissaire..) - nature et importance des autres réseaux - distance voûte - voirie - importance de la voirie - présence de monuments historiques à proximité

Tableau 3.1. Les différents risques et leur déclinaison en indicateurs et critères (Diab, 2002)

Ensuite, l'approche propose, d'une part, un indicateur de performance par risque, sous la forme d'une note, résultant d'une combinaison des différents indicateurs et critères, d'autre part, une combinaison de ces indicateurs de performance, sous la forme de notes, pour l'obtention d'un indicateur de performance global également sous la forme d'une note (Fig.3.2).

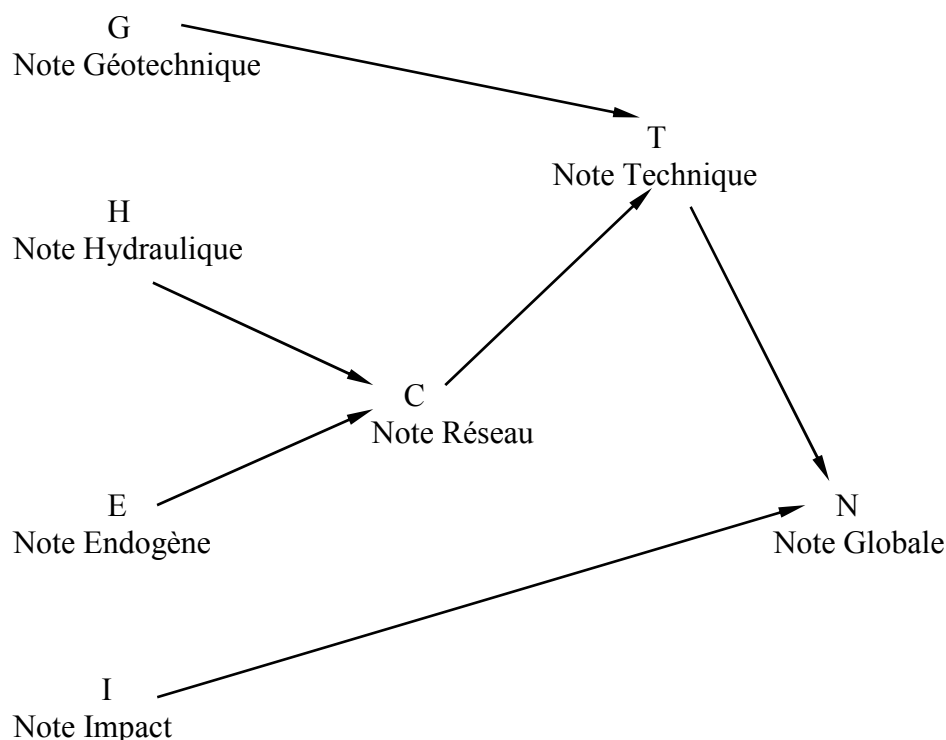


Figure 3.2. Combinaison des IP et obtention de l'IP global (Diab, 2002)

Cet exemple illustre la manière dont on peut combiner indicateurs et critères pour obtenir des indicateurs de performance pour un risque particulier et pour le risque global. De plus, la démarche d'évaluation de la performance présentée au paragraphe 3.1.2 est suivie. Cette approche est tributaire de la qualité des informations collectées et des experts qui attribuent les notes.

3.1.4. Synthèse

Les gestionnaires d'ouvrages de génie civil sont amenés à évaluer l'état, puis la performance de leurs ouvrages de génie civil. Les indicateurs de performance permettent d'apprécier l'aptitude d'un ouvrage à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu. Ils permettent d'évaluer la performance de l'ouvrage à un moment donné, de suivre l'évolution de sa performance au cours du temps, et de « mesurer » l'impact de l'action de maintenance. La performance, évaluée à partir d'indicateurs et de critères, est très utile pour déterminer les actions de maintenance qui doivent être menées en priorité, sur tel ou tel composant de l'ouvrage, par rapport à telle ou telle fonction à accomplir par le composant.

3.2. Pratique actuelle de l'évaluation de la performance des digues

Les références bibliographiques majeures quant à la gestion des digues sont (Mériaux *et al.*, 2001), (Fauchard *et al.*, 2004) et (Lino *et al.*, 2000) qui proposent une méthodologie pour l'évaluation de l'état des digues. Ces auteurs proposent une évaluation de l'état des digues en deux temps : une évaluation rapide suivie d'une évaluation approfondie.

3.2.1. Evaluation rapide de l'état des digues

Le fort linéaire de digues en France impose, dans un premier temps, de réaliser une évaluation rapide de l'état des digues car l'évaluation approfondie de l'état des digues est coûteuse et délicate (Mériaux *et al.*, 2001).

On effectue donc, dans un premier temps, une évaluation rapide de l'état des digues qui repose essentiellement sur :

- **un débroussaillage préalable** qui permet, de maintenir des conditions parfaites de visibilité des talus et du pied de digue, d'éviter le développement de racines dans la digue et de dissuader l'installation d'animaux fouisseurs (Mériaux *et al.*, 2001) ;
- **un levé topographique** de l'ouvrage et de ses abords (plan au 1/500^{ème}) devant comprendre au minimum des profils en long de la digue et des profils en travers régulièrement espacés (Mériaux *et al.*, 2001) ;
- **une inspection visuelle** de la totalité du linéaire : cette inspection visuelle constitue le meilleur moyen de détecter les principaux désordres affectant les digues puisque ceux-ci se manifestent généralement à « la surface » de l'ouvrage (Lino *et al.*, 2000).

Menés régulièrement, l'entretien de la végétation et les inspections visuelles permettent, en outre, d'assurer la surveillance de routine de la digue (Mériaux *et al.*, 2001). Les points à observer lors des inspections visuelles de routine sont (Tab. 3.2) :

Mécanismes de rupture	Points d'observation	Surveillance visuelle de routine (*)		
		Talus côté rivière (fleuve)	Crête	Talus côté terre (val)
Surverse	Profil en long de la crête		Apparition / évolution d'irrégularités sur le profil : points bas, affaissements, ornières - état des batardeaux, portes, ...	
	Cote du cours d'eau, laisses de crue	Relevé de la cote le jour de la visite, existence de laisses récentes		
	Déversement		Etat du revêtement et de l'éventuel dispositif fusible (déversoir)	Etat du revêtement et du dissipateur aval (déversoir)
	Dispositif de revanche		Etat du dispositif de revanche : aspect du contact avec le corps de digue, stabilité	
Erosions de surface / affouillements	Effets sur talus des sollicitations hydrauliques fluviales	Verticalité du talus, déchaussement de la végétation rivulaire, apparition / évolution d'anse d'érosion	Fissuration longitudinale sur la crête au droit d'anse d'érosion	
	Protection de surface (revêtement)	Etat du revêtement de protection (perré, masque béton, enrochement,...)		Etat du revêtement de protection (écoulements fluviaux dans le Val)
	Protection de pied de talus	Etat de la protection de pied de talus (rideau de pieux ou de palplanches, enrochement,...)		
	Proximité et tracé du lit mineur / caractéristique de l'écoulement	A observer, si la levée est proche du lit mineur. Etat du contact avec le lit mineur. Direction et vitesse du courant.		
	Effets sur talus des sollicitations externes diverses	Apparition et/ou stade de développement de ravines, impacts de terrassement, ...		Apparition et/ou stade de développement de ravines, impacts de terrassement, ...
Erosion interne	Végétation	Nature, développement et stabilité, racines et souches, sur ou en pied de talus	Nature et développement, racines et souches	Nature et développement, racines et souches, sur ou en pied de talus
	Terriers	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente	Taille, localisation et densité, indice d'activité récente
	Canalisations / traversée	Débouchés de canalisation ou de traversées, aspect du contact avec le remblai, état du dispositif anti-retour éventuel	Regards de canalisation, passages en cavalier	Débouchés de canalisation ou de traversées, aspect du contact avec le remblai, état du vannage éventuel
	Confortement	Etat du confortement éventuel (recharge étanche, géomembrane)	Etat du rideau d'étanchéité éventuel (palplanches, paroi moulée, ...)	Etat du confortement éventuel (recharge drainante)
	Ouvrages singuliers	Etat, configuration : échelle, cale, rampe, bâtiment encastré, ...	Etat, configuration : porte, batardeau, bâtiment encastré, ...	Etat, configuration : puisard, mur de soutènement, bâtiment encastré, ...
	Fuite	Fontis	Fontis	Indices de fuite
Instabilité d'ensemble	Saturation, piézométrie	Apparition / évolution de zones humides, sources - Etat des piézomètres et mesure si possible	Etat des piézomètres et mesure si possible	Etat des piézomètres ou, en pied de talus, de puits ou fossé, et mesure si possible
	Mouvements de terrain	Apparition / évolution de fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés	Apparition / évolution de fissures longitudinales, affaissements - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides tels que chaussées, parapets, murets	Apparition / évolution de fissures dans le terrain, bombements, loupes de glissement - désordres (fissuration, renversement) sur ouvrages rigides - arbres inclinés
Conditions d'accès pour l'entretien	Accessibilité aux engins de terrassement (et d'entretien)	Etat de la voirie de pied de talus	Etat de la voirie de crête	Etat de la voirie en pied ou à proximité du pied de talus

Tableau 3.2. Points à observer lors de l'inspection visuelle de routine (Mériaux et al., 2001)

Cette première étape de l'évaluation de l'état de la digue a pour objectifs :

- de déterminer rapidement l'état de l'ouvrage et les zones à risques (pré-zonage) (Mériaux *et al.*, 2001) ;
- d'envisager une évaluation approfondie de l'état, qui peut se limiter aux zones à risques déterminées par l'évaluation rapide (Mériaux *et al.*, 2001).

En synthèse, l'évaluation rapide comprend un débroussaillage préalable, un levé topographique et une inspection visuelle. Cette étape permet de déterminer les zones où une recherche plus approfondie doit être mise en œuvre.

3.2.2. Evaluation approfondie de l'état des digues

L'évaluation approfondie de l'état des digues intervient donc dans un deuxième temps, uniquement sur les zones à risques déterminées précédemment. Elle comprend trois phases (Fauchard *et al.*, 2004).

Une phase d'étude préliminaire pour rechercher les indices à partir : de l'historique de la digue, d'études géologiques, d'études morphodynamiques, de la topographie, de l'inspection visuelle sur le terrain. L'ensemble des informations recueillies lors de l'inspection visuelle est répertorié sur des cartes au 1/500^{ème}, les désordres constatés sont reportés sur la carte et numérotés. Ces numéros renvoient aux lignes successives de la fiche de relevé des désordres (Fig. 3.3) où ils sont détaillés et commentés. On associe à chaque désordre un dossier photographique.

La reconnaissance géophysique : sur la digue, cette reconnaissance consiste à déduire les caractéristiques internes de l'ouvrage en étudiant les variations d'un champ physique mesuré selon des profils en long (en crête ou en pied) de la digue. Le résultat d'une reconnaissance géophysique (Fig. 3.4) doit permettre de donner une image interne de l'ouvrage sur tout le linéaire, reflétant la nature et la répartition des matériaux, les zones remaniées, la présence d'hétérogénéités, de conduites...

INSPECTION VISUELLE DES DIGUES DU										Département:		Réf. du PK:									
Date :		Commune :		PK :		Lieu-dit :		PK déb :		Longueur tronçon (m):		Rive : RD / PG		Page:							
Représentation générale										PK fin :											
Parties 1a 1b 2a 2b 3a 3b 4a 4b 5a 5b 6a 6b 7a 7b 8a 8b										Description du/des désordres(s)						Observations d'ensemble : ouvrages longitudinaux / accès / photos					
Code : DIM										Prédiction(s) sur nature d'ouvrage											
1a										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
1b										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
2a										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
2b										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
3a										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
3b										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
4a										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
4b										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
5a										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
5b										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
6a										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
6b										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
7a										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
7b										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
8a										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
8b										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
Talus de										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
de										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
digue										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
côté										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
rivière										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
7a										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
7b										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
8a										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
8b										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
Crête										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
1c										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
2c										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
Crête										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
3c										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
de										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
4c										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
digue										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
5c										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
6c										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
Partie										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
1e										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
Talus /										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
2e										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
pied de										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
3e										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
digue										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
4e										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
côté										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
5e										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
terre										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
6e										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
7e										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					
8e										Code : DIM						Prédiction(s) sur nature d'ouvrage					

Figure 3.3. Fiche de relevé de désordres

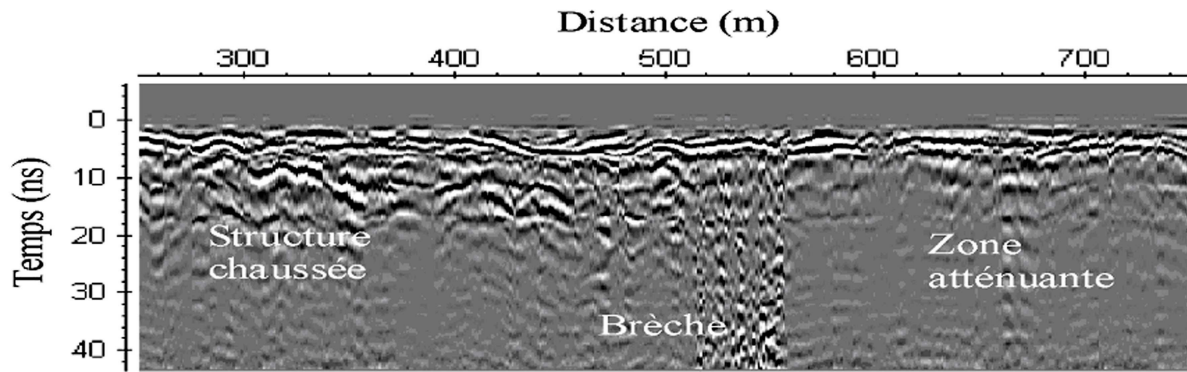


Figure 3.4. Radargramme avec mise en évidence d'une brèche (Mériaux et al., 2003a)

La reconnaissance géotechnique : cette reconnaissance consiste à mettre en œuvre des essais de caractérisation des sols, in situ, ou en laboratoire. Ils comprennent essentiellement des forages destructifs ou carottés, des essais pénétrométriques, de perméabilité et de cisaillement, et éventuellement des sondages à la pelle mécanique (Fig. 3.5). Ces essais permettent de détecter des défauts de perméabilité, de compacité et de contact entre les couches.

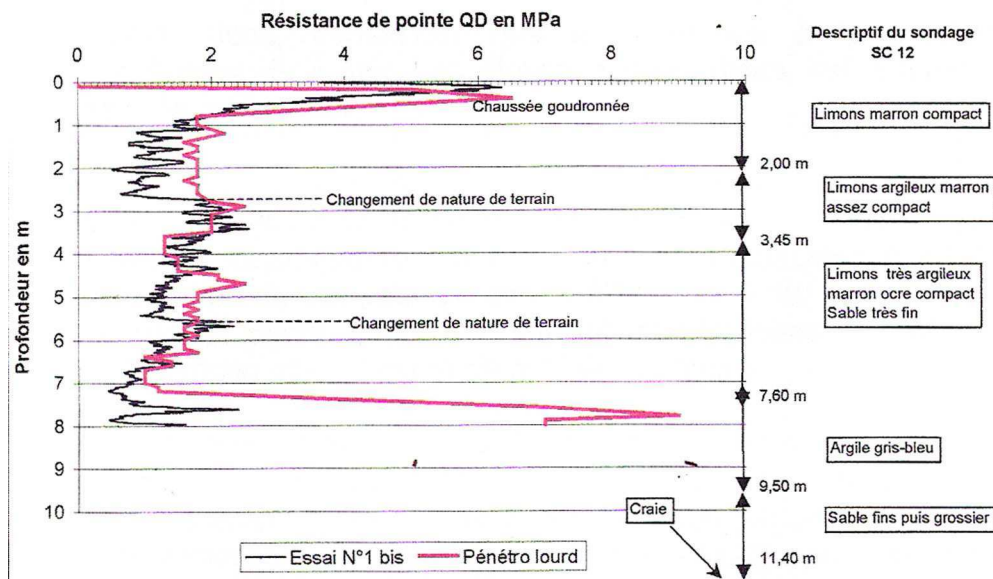


Figure 3.5. Comparaison d'essais pénétrométriques au PANDA et au pénétromètre lourd (Mériaux et al., 2003a)

A l'issue de cette évaluation approfondie, l'état de la digue est connue avec une bonne précision. Pour plus de détails sur ces trois phases, nous renvoyons le lecteur vers (Fauchard et al., 2004), (Lino et al., 2000), (Mériaux et al., 2001) et (Royet et al., 2004).

L'évaluation approfondie des digues se déroule en trois phases : la phase d'étude préalable, la reconnaissance géophysique et la reconnaissance géotechnique. Elle aboutit à une connaissance précise de l'état de l'ouvrage.

3.2.3. Un outil d'aide à la gestion des digues : le SIRS Digues

Aujourd'hui, il est explicitement demandé aux gestionnaires de collecter, puis de communiquer au service de contrôle, les principales données sur leurs digues dès lors que les digues intéressent la sécurité publique, mais aussi de mettre en place un dispositif de gestion pérenne qui permette de garantir sur le long terme la sécurité des digues lors des crues. Ainsi, les recherches sur les systèmes d'informations dédiés à la gestion des digues s'inscrivent pleinement dans l'émergence de ces nouveaux besoins des gestionnaires et autres acteurs impliqués à des échelles et titres divers dans la problématique de la sécurité des digues. C'est dans ce contexte que le SIRS Digues (Système d'Informations à Références Spatiales) a été conçu. Nous expliquons l'utilisation du terme SIRS plutôt que SIG dans le chapitre 10.

Les premiers travaux sur le SIRS Digues ont commencé en 1998, tout d'abord à l'initiative du Cemagref, puis progressivement avec l'appui d'autres partenaires. En se basant sur une démarche structurée d'analyse/conception de SIRS (Rouzet *et al.*, 1997), le Cemagref a réalisé en 1998 une première étude, dite de diagnostic stratégique, en interviewant des gestionnaires de la Loire et du Vidourle sur leurs pratiques actuelles et leurs attentes vis à vis d'un SIRS (Belouze, 1999).

A l'issu de cette phase, il a été décidé de privilégier l'analyse d'un SIRS centré sur les digues et le lit fluvial endigué, à un niveau de précision adapté aux gestionnaires locaux : l'équivalent cartographique du 1/5.000^{ème} au 1/10.000^{ème}, avec la possibilité d'une gestion documentaire des informations à plus grande échelle. L'objectif a été ensuite de vérifier, d'un point de vue technique, l'intérêt des gestionnaires locaux pour un tel SIRS. Avec le soutien du Ministère chargé de l'Environnement, le Cemagref a alors développé une maquette générique de sensibilisation pour aider les gestionnaires à mieux cerner le potentiel de l'outil et ainsi, à affiner l'expression de leurs attentes. La maquette a été développée sur le val de Cisse en Loire Moyenne, en bénéficiant de la contribution des gestionnaires du val et des acteurs régionaux.

Les années 2001 et 2002 ont alors été consacrées à étudier la faisabilité technique, économique et organisationnelle du SIRS chez deux gestionnaires d'endiguements majeurs en

France : le SYMADREM (Syndicat Mixte d'Aménagement des Dignes du Rhône et de la Mer) en Camargue et l'AD-IDR (Association Départementale – Isère Drac Romanche) en Isère (Turpeaud *et al.*, 2004).

Les deux gestionnaires se sont ensuite associés pour financer en 2003 et 2004 le développement de l'application par une société d'informatique, avec l'assistance du Cemagref pour la rédaction du cahier des charges et du suivi du développement. Le développement a été achevé en juillet 2004 (Maurel *et al.*, 2004b).

Cet outil informatique est développé sur la base d'un SIG. Il permet de gérer les informations des différents composants du système « digue » : structure et géométrie de la digue et du lit du cours d'eau, ouvrages hydrauliques, réseaux de communication, de flux d'énergie, désordres, historique des crues, parcellaire foncier, travaux et études, organismes et intervenants (Maurel *et al.*, 2004a), (Moins, 2005).

La présentation détaillée de l'outil SIRS Dignes sera réalisée dans la partie 4 de ce mémoire.

Le SIRS Dignes est une application informatique développée pour répondre aux besoins des gestionnaires de digues. Il permet, grâce à ses capacités de stockage, de conserver certaines informations relatives aux digues et de les positionner géographiquement : désordres, profil type, photos....

3.2.4. Synthèse

En synthèse, il existe des méthodologies rapides et approfondies pour évaluer l'état des digues. Toutefois, elles ne comprennent pas de méthodes synthétiques d'évaluation de la performance.

A côté des méthodes développées pour évaluer l'état des digues, un outil d'aide à la gestion des informations, le SIRS Dignes, a été conçu : il permet le stockage des données, la localisation et la visualisation, sur le linéaire de digues, d'informations relatives aux ouvrages. La pratique actuelle se limite à une localisation et à une visualisation des données saisies et ne permet ni d'évaluer la performance des digues ni de la localiser sur le linéaire de digues.

Chapitre 4 : Objectifs et propositions

4.1. Contexte

Nous avons vu que les digues sont des ouvrages à fort linéaire, anciens, globalement en mauvais état et mal documentés. Pour la plupart des ouvrages, le dispositif de gestion, fondé sur la réglementation récente, est balbutiant et/ou en cours de mise en place.

Pour aider les gestionnaires dans leurs missions, un système d'information géographique – le SIRS Digues – a été développé pour gérer l'ensemble des données relatives aux digues. Par ailleurs, les méthodologies pour l'évaluation de l'état des ouvrages sont maintenant bien définies et décrites dans la littérature technique.

4.2. Objectifs

Dans ce contexte, notre travail de recherche consiste à proposer des méthodes pour évaluer la performance des digues, avec, in fine, l'objectif d'améliorer la gestion patrimoniale des digues. Il s'agit de fournir, dans le cadre du diagnostic rapide des digues, une évaluation de la performance du parc d'ouvrages d'un gestionnaire, avec les données disponibles, pour lui permettre :

- de disposer d'une vision global de la performance de son parc d'ouvrages ;
- de mieux programmer les travaux de maintenance sur l'ensemble du linéaire de digues ;
- de déterminer sur quels tronçons de digues doit être mené le diagnostic approfondi ;
- d'évaluer l'impact d'éventuels travaux de maintenance sur le niveau performance du parc de digues.

Il est bien sûr évident que ce travail doit aboutir à des méthodes utilisables par les gestionnaires de digues. Cela signifie que notre recherche doit permettre des développements dans un outil d'aide aux gestionnaires, à travers le SIRS Digues, dans la mesure où la digue à grand linéaire a besoin d'informations géoréférencées.

4.3. Propositions

Pour notre recherche, nous disposons de plusieurs méthodes adaptées à nos besoins provenant de divers domaines scientifiques (Tab. 4.1) :

- les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, pour la représentation, la modélisation du comportement et l'analyse des défaillances des digues ;
- les méthodes issues des Sciences de l'Ingénieur, plus spécifiquement la modélisation qualitative des systèmes pour la modélisation des mécanismes de rupture des digues ;
- les méthodes issues de la Recherche Opérationnelle, en particulier l'aide à la décision multicritère ;
- les méthodes et outils issus des Sciences de l'Information Géographique, comme les SIG, les bases de données spatiales, la spatialisation des informations, les représentations cartographiques...

Parties de la thèse	Domaines scientifiques	Méthodes
Partie 2	Sûreté de Fonctionnement	Analyse Fonctionnelle
		AMDE
	Sciences de l'Ingénieur	Modélisation qualitative
Partie 3	Recherche Opérationnelle	Modélisation des indicateurs et critères
		Aide multicritère à la décision
Partie 4	Sciences de l'Information Géographique	Couplage de modèles multicritères avec un SIG
		Spatialisation de l'information
		Représentation cartographique

Tableau 4.1. Synthèse des méthodes utilisées dans le cadre de notre recherche

Dans le cadre du développement des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement et de la Recherche Opérationnelle, le rôle des experts du domaine des digues est prépondérant.

Nous construisons notre méthodologie de recherche selon les étapes suivantes (Fig. 4.1). Une première étape essentielle pour évaluer la performance des ouvrages de génie civil est l'analyse du système de génie civil d'un point de vue structurel et fonctionnel. Nous proposons, lors de la deuxième étape, d'utiliser, pour définir les digues et décrire les fonctions et les défaillances de ce système, des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement (cf. Partie 2).

Pour représenter les mécanismes de rupture des digues (troisième étape), nous développons un modèle de rupture à partir des méthodes issues de la modélisation qualitative (cf. Partie 2).

A partir de la modélisation des mécanismes de rupture, nous proposons des indicateurs et des critères pour évaluer la performance des digues et surveiller son évolution (cf. Partie 3). Cela constitue la quatrième étape de notre méthodologie.

A partir d'une méthode d'analyse multicritère adaptée au contexte des digues, nous agrégeons les niveaux de performance de chaque indicateurs et critères. Cette agrégation multicritère (cinquième étape) vise à évaluer la performance des digues pour chaque mécanisme (cf. Partie 3).

Enfin, dans la sixième et dernière étape, nous développons les bases d'un outil d'aide à la décision, sur la base du SIRS Dignes existant, permettant de prendre en compte le fort linéaire de digues et d'intégrer les indicateurs de performance (cf. Partie 4). Puis nous testons le modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues sur un ouvrage réel (digue de Cazouls d'Hérault). Cet outil permettra aux gestionnaires de digues de visualiser cartographiquement la performance de leur parc de digues (cf. Partie 4).

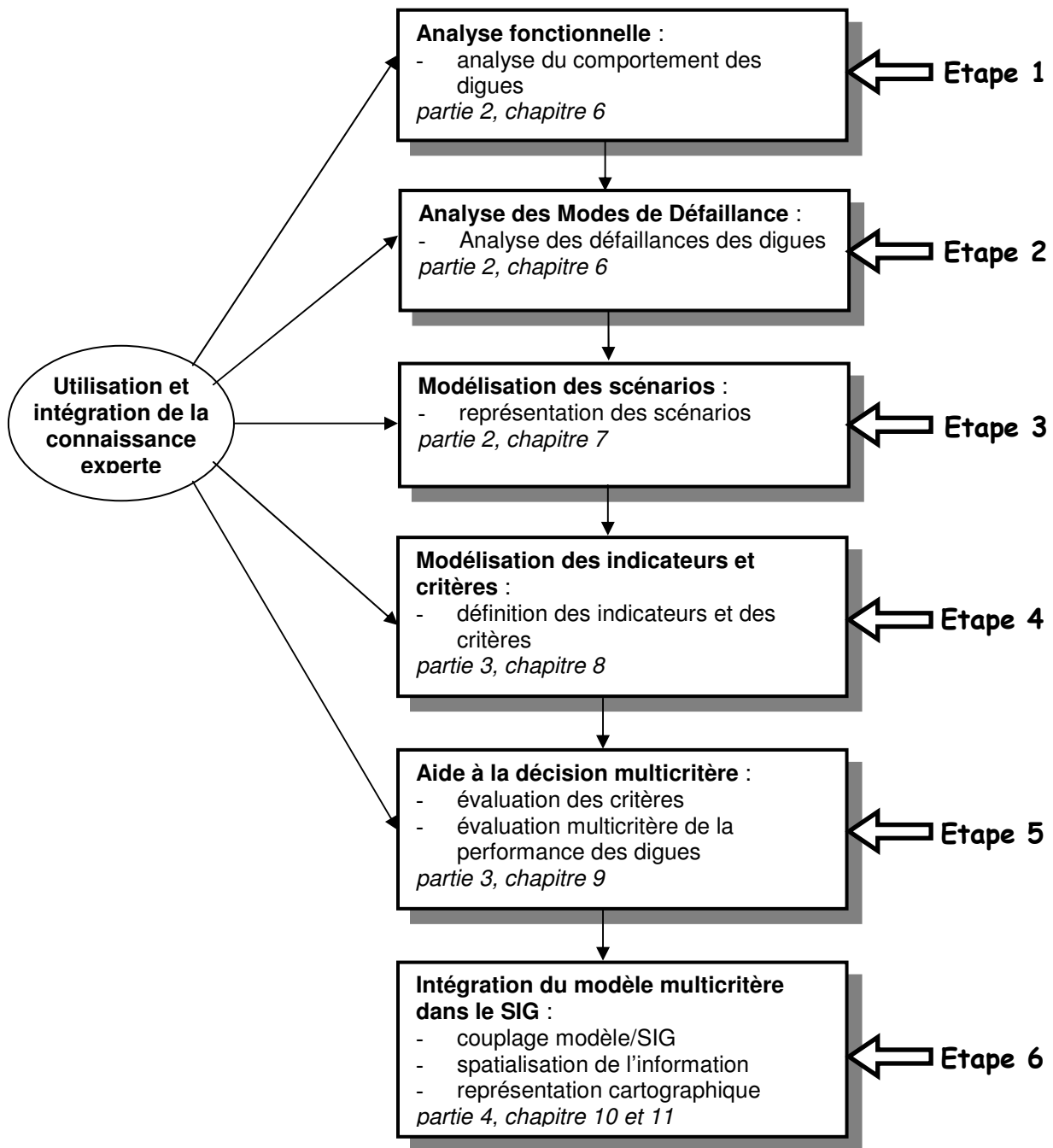


Figure 4.1. Démarche d'analyse de la performance des digues et de construction d'un outil d'aide à la décision

* * *

*

Deuxième partie
Modélisation des mécanismes de rupture
des digues

Chapitre 5 : Mécanismes de rupture des digues en remblai

Ce chapitre présente les différents mécanismes de rupture qui peuvent se produire dans les ouvrages en remblai en général et dans les digues de protection contre les inondations en particulier. Nous donnons les définitions générales liées aux mécanismes qu'on va adopter dans l'ensemble du mémoire, puis nous établissons une synthèse des principaux mécanismes de rupture des digues.

Les mécanismes décrits sont représentatifs de ceux qui sont observés sur le parc de digues qui intéresse notre recherche. A ce titre, nous illustrons cette synthèse par des études de cas issus de ce parc.

5.1. Introduction aux mécanismes de rupture

5.1.1. Définitions générales

La littérature technique relative aux digues fait apparaître parfois des imprécisions dans la définition des termes liés aux mécanismes. Il nous a semblé important de préciser clairement, en introduisant dans ce chapitre, un référentiel de termes techniques, établi à partir de références bibliographiques plus larges que celles uniquement consacrées aux digues, et qui sera utilisée tout au long de ce mémoire.

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 du val protégé.

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 le val protégé.

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 : la non-réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : pas de fonction, perte de fonction, dégradation de fonction, fonction intempestive (ISDF, ?).

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 defectueux de l'ouvrage du point de vue de sa sécurité et des performances (ICOLD, 1983).

5.1.2. Documentations techniques disponibles

Notre étude bibliographique relative aux digues ne repose que sur quelques ouvrages de référence. En effet, la documentation technique disponible est peu importante : elle se limite à quelques références majeures suivantes : (Mériaux *et al.*, 2001), (Lino *et al.*, 2000) et (CFGB, 2004).

La référence la plus intéressante pour l'analyse des mécanismes des digues est (Mériaux *et al.*, 2001). Elle traite de recommandations pour la surveillance, l'entretien et le diagnostic des digues et on y trouve des informations précieuses concernant les mécanismes de rupture.

Toutefois, il n'existe pas d'ouvrage technique spécifique traitant des mécanismes de rupture, à l'instar de ce qui existe dans le domaine des barrages, notamment (ICOLD, 1993). Nous avons donc recueilli l'information détaillée relative aux mécanismes de rupture des digues sur la base des références indiquées ci-dessus et complétée par l'interview des experts du domaine.

5.1.3. Les mécanismes de rupture des ouvrages en remblai

Pour les ouvrages hydrauliques en remblai, quatre mécanismes de rupture sont classiquement considérés : l'érosion externe, l'érosion interne, l'instabilité externe et la liquéfaction (Fig. 5.1) . Ces mécanismes sont largement documentés dans la littérature technique, notamment celle des barrages (ICOLD, 1993).

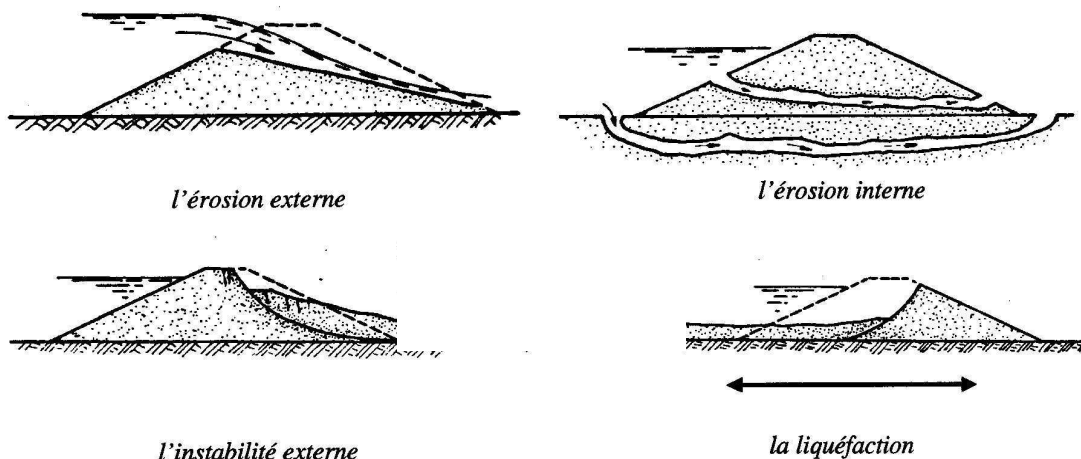


Figure 5.1. Les quatre mécanismes de rupture des ouvrages en remblai. Schéma extrait de (Lepetit, 2002)

Ces mécanismes concernent logiquement les digues, avec des spécificités particulières propres à ces ouvrages. Pour les digues de protection contre les inondations, on considère quatre mécanismes de rupture (Mériaux *et al.*, 2001) :

- la surverse (du cours d'eau vers le val protégé) ;
- l'érosion interne ;
- l'érosion externe ;
- le glissement.

Notons deux particularités liées aux digues de protection contre les inondations :

- le mécanisme de liquéfaction n'est pas considéré, les digues de protection contre les inondations étant des ouvrages hors d'eau en situation normale d'exploitation ;
- on distingue le mécanisme de surverse de celui de l'érosion externe.

La suite de ce chapitre est consacrée à la description de ces quatre mécanismes.

5.2. Le mécanisme de surverse

5.2.1. Description du mécanisme

La surverse est un mécanisme de rupture par submersion : durant la crue, l'eau déborde au-dessus de la digue provoquant l'écoulement d'une lame d'eau par dessus l'ouvrage, et conduit généralement et rapidement à la brèche, par érosion régressive du talus côté val protégé, puis de la crête (Fig. 5.2).

L'érosion subie lors de la surverse se déroule en deux phases :

- une phase d'érosion progressive : l'eau s'écoulant par dessus la digue érode la digue ;
- une phase de basculement : le profil en travers de la digue ne résiste plus à la poussée de l'eau.

Les connaissances techniques actuelles ne permettent pas d'évaluer précisément la durée de résistance d'une digue à la surverse, et par précaution, les ingénieurs considèrent que les digues en terre ne supportent pas les débordements d'eau (Gignoux, 2000). 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.

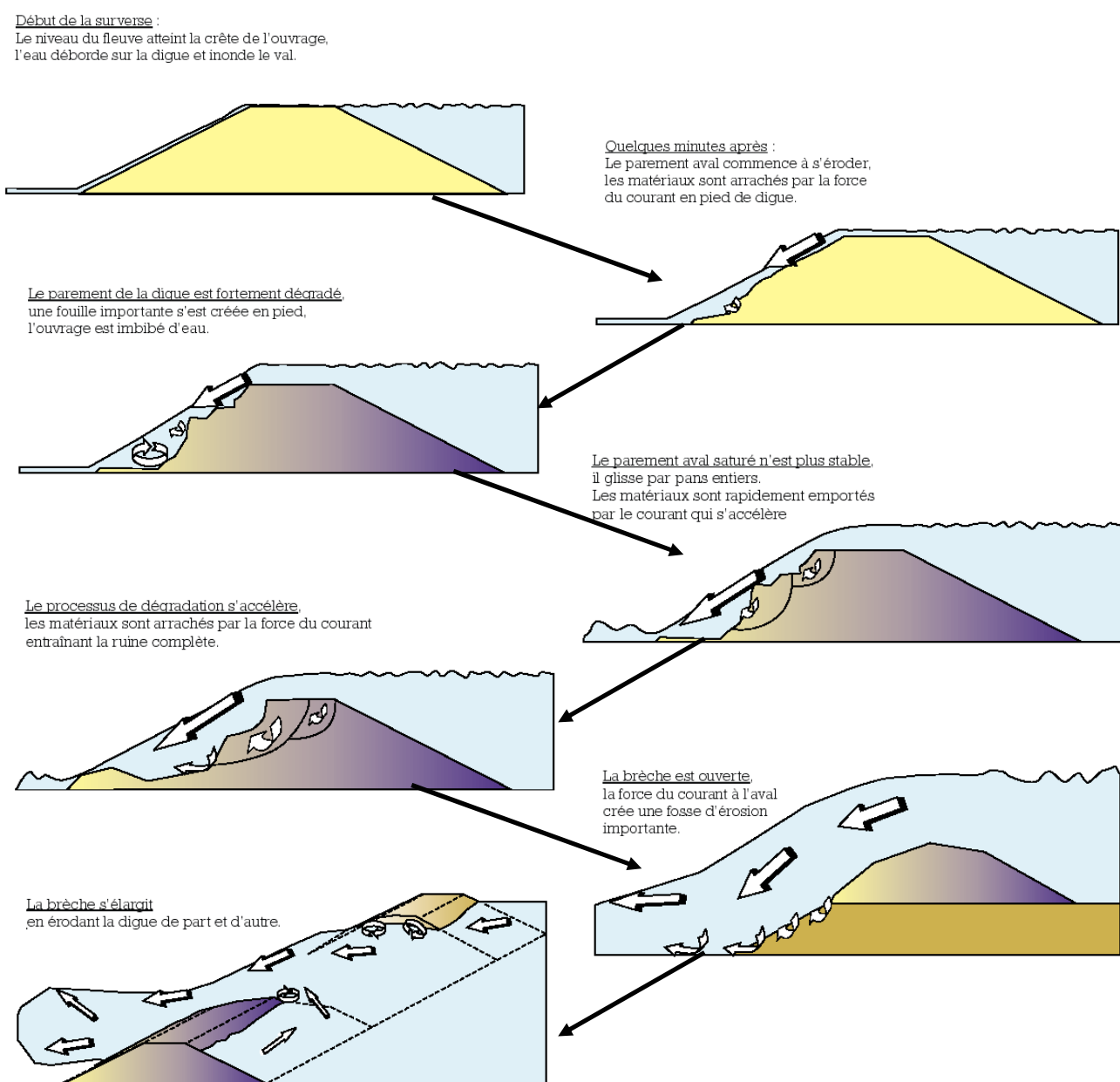


Figure 5.2. Mécanisme de rupture par surverse (Mériaux et al., 2001)

5.2.2. Exemple de cas de surverse

Ce mécanisme est à l'origine des principales ruptures, ayant affecté les digues de protection contre les inondations, en France, lors des deux siècles passés, à l'occasion de très fortes crues (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 des 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.

La figure 5.3 illustre la rupture d'une digue de protection contre les inondations par mécanisme de surverse :



Figure 5.3. Cas de rupture par surverse sur le Vidourle (Gard)

5.3. Le mécanisme d'érosion interne

5.3.1. Description du mécanisme

L'érosion interne est la première source d'incidents sur les ouvrages hydrauliques en terre (CFGB, 1997). L'érosion interne est définie comme l'entraînement vers l'aval des particules constitutives du remblai ou de la fondation sous l'action d'un écoulement provenant de la retenue pour les barrages ou des écoulements liés à la crue pour les digues.

Pour que l'érosion interne se développe, deux phénomènes doivent avoir lieu simultanément : l'arrachement de particules et le transport de ces particules. Pour plus de détails sur ces phénomènes, le lecteur pourra consulter (CFGB, 1997).

Ces différents modes de déclenchement de l'érosion interne peuvent se combiner entre eux et être difficilement distinguables. Pour entraîner la rupture, il faut aussi que les conditions du transport des particules soient assurées afin que l'érosion soit entretenue. La nature du transport conduit à distinguer deux mécanismes d'érosion interne : le renard hydraulique et la suffusion (Fig. 5.4).

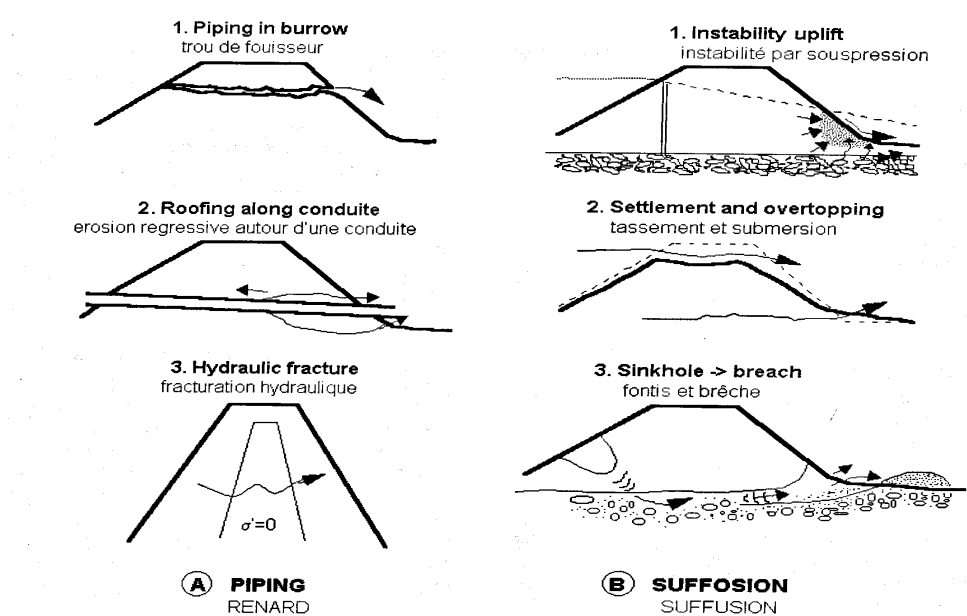
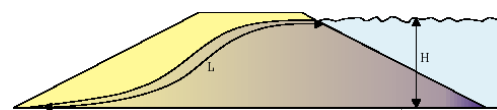


Figure 5.4. Erosion interne par renard et par suffusion (CFGB, 1997)

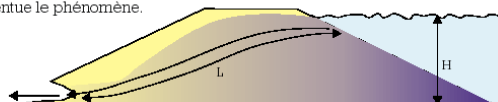
Les vitesses de l'écoulement sont fortes dans le mécanisme de renard hydraulique et peu élevées dans le mécanisme de suffusion. Le mécanisme de renard est le plus dangereux et le plus rapide : c'est celui qui entraîne le plus souvent la rupture des digues (Fig. 5.5).

Mécanisme du renard hydraulique (ou érosion interne régressive) :
Avec l'augmentation du niveau d'eau amont (H),
le remblai se sature progressivement.
Le gradient hydraulique (H/L) augmente.



Quelques minutes après :
Le long des lignes de courant préférentiel, un écoulement se crée,
générant une petite fuite à l'aval de l'ouvrage.

La fuite est établie
et des matériaux peu cohésifs du remblai sont entraînés
par l'écoulement au débouché de la fuite.
Progressivement, le chemin hydraulique se raccourcit,
le gradient hydraulique (H/L) augmente
et accentue le phénomène.



La fuite s'agrandit,
les matériaux entraînés par l'eau de fuite laissent un vide,
développant une cavité qui se propage vers l'amont et s'élargit à l'aval.
La galerie ainsi formée peut traverser entièrement l'ouvrage
et conduire à sa ruine en une ou
plusieurs crues successives.

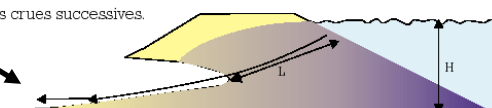


Figure 5.5. Mécanisme du renard hydraulique dans une digue (Mériaux et al., 2001)

Des facteurs tels que l'absence de filtre aval, la présence de terriers d'animaux, la présence de conduite traversante ou de racines d'arbres favorise le développement d'un mécanisme de rupture par renard sur les digues.

5.3.2. Exemple de cas d'érosion interne

En France, entre 1970 et 1997, 71 manifestations d'érosion interne ont été répertoriées (Tab. 5.1) sur l'ensemble des ouvrages en remblai (digues et barrages), parmi lesquelles les accidents les plus nombreux concernent les digues de protection contre les inondations et les digues d'aménagements hydroélectriques.

71 incidents	23 renards	16 levées de protection contre les crues
		1 digue d'aménagement hydroélectrique
		6 petits barrages agricoles
	48 suffusions	36 digues d'aménagement hydroélectrique
		4 petits barrages
		8 grands barrages

Tableau 5.1. Recensement des incidents liés à l'érosion interne (CFGB, 1997)

La figure 5.6 illustre un cas de rupture de digue lié au mécanisme d'érosion interne s'étant développé autour d'une canalisation et débouchant sur un renard hydraulique.



Figure 5.6. Renard autour d'une canalisation traversant la digue

Pour les crues du Rhône de 1993 et 1994, les mécanismes d'érosion interne sont à l'origine de la totalité des seize brèches constatées sur les digues de Camargue. Parmi celles-ci, treize sont dus à des terriers d'animaux et trois à des canalisations traversant la digue.

5.4. Les mécanismes d'érosion externe

5.4.1. Description du mécanisme

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.

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.

On distingue deux mécanismes d'érosion externe :

- le mécanisme d'affouillement ;
- le mécanisme d'érosion externe lié au courant et aux chocs d'embâcles.

5.4.1.1. L'affouillement

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. C'est la vitesse importante de l'eau (aggravée éventuellement par la fragilité des berges, l'absence de protection ou d'ancrage des berges) qui provoquent l'érosion en pied. 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 (Fig. 5.7).

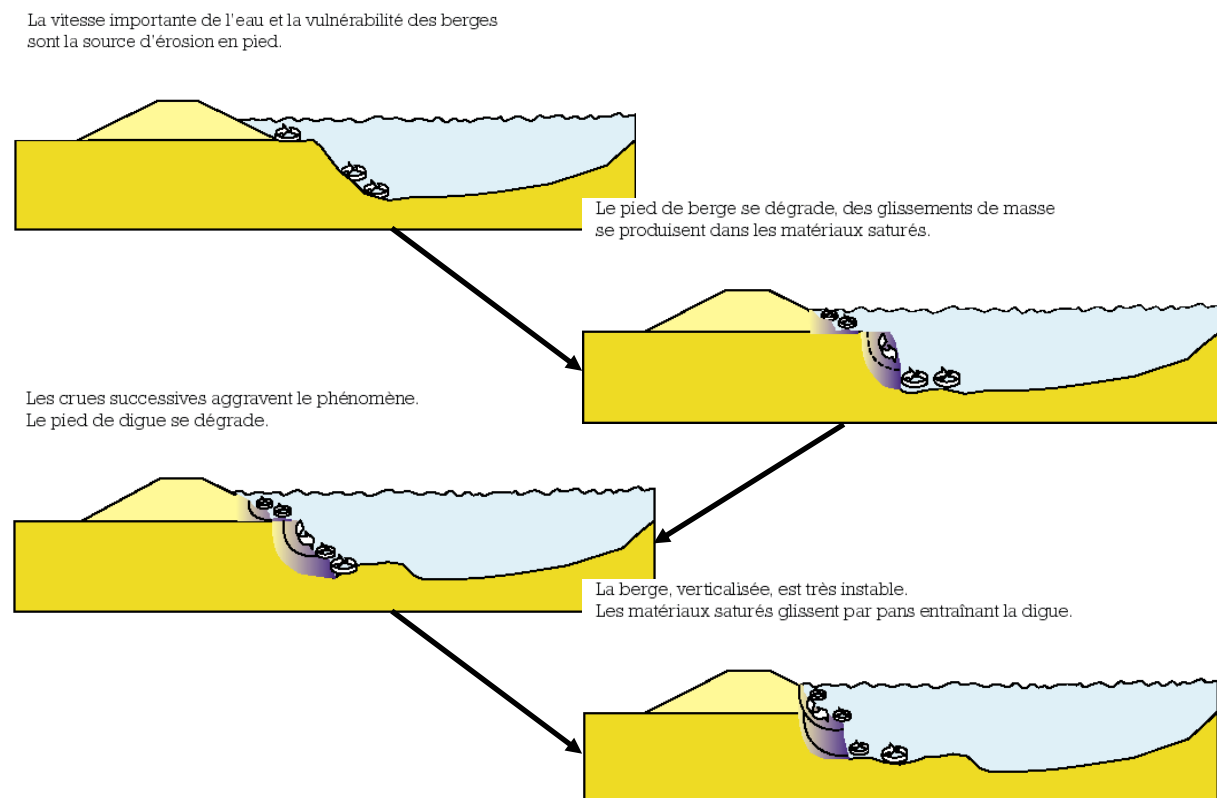


Figure 5.7. Le mécanisme de l'affouillement (Mériaux *et al.*, 2001)

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

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 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.

5.4.1.2. Courant et chocs de corps flottants

Les digues de protection contre les inondations sont rarement en eau et par conséquent le mécanisme d'érosion externe lié au courant et aux chocs de corps flottants est peu fréquent. Toutefois lors des crues, elle est susceptible d'être érodée par ce mécanisme, et ce même si la digue est éloignée de la rivière (Degoutte, 2003).

Si le talus côté fleuve de la digue est boisé, l'érosion externe est possible par des tourbillons autour des troncs d'arbres, favorisant alors le mécanisme de glissement ou le développement d'un renard hydraulique.

En période de crue, la rivière charrie de nombreux corps flottants, comme des troncs d'arbres par exemple. Ces corps flottants peuvent heurter les digues et causer des désordres significatifs pouvant entraîner la rupture de la digue.

5.4.2. Exemple de cas de rupture par érosion externe

On peut illustrer ce mécanisme à travers la rupture d'une digue du fleuve côtier Var, dans les Alpes Maritimes, en novembre 1994 (Fig. 5.8).

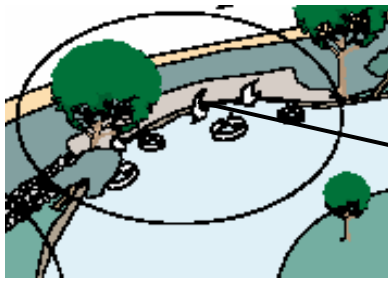


Figure 5.8. Rupture par érosion externe d'une digue du fleuve côtier Var

Dans cet exemple, la rupture de la digue par mécanisme d'érosion externe est due à la vitesse de l'écoulement et a conduit à la formation d'un méandre avec érosion des terrains protégés initialement par la digue.

5.5. Le mécanisme de glissement

5.5.1. Description du mécanisme

Il existe deux mécanismes de glissement :

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

5.5.1.1. Le glissement côté val en situation de crue

Ce mécanisme se produit 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 5.9 illustre ce mécanisme :

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

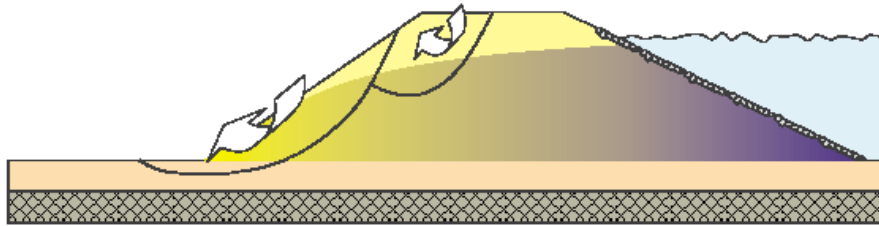


Figure 5.9. Le mécanisme de glissement côté val en situation de crue (Mériaux *et al.*, 2001)

5.5.1.2. Le glissement côté fleuve lors de la décrue

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). La figure 5.10 illustre ce mécanisme :

Mécanisme de la rupture.

Avec l'augmentation du niveau d'eau amont, et son maintien à une cote élevée lors d'une longue crue, le remblai se sature progressivement.

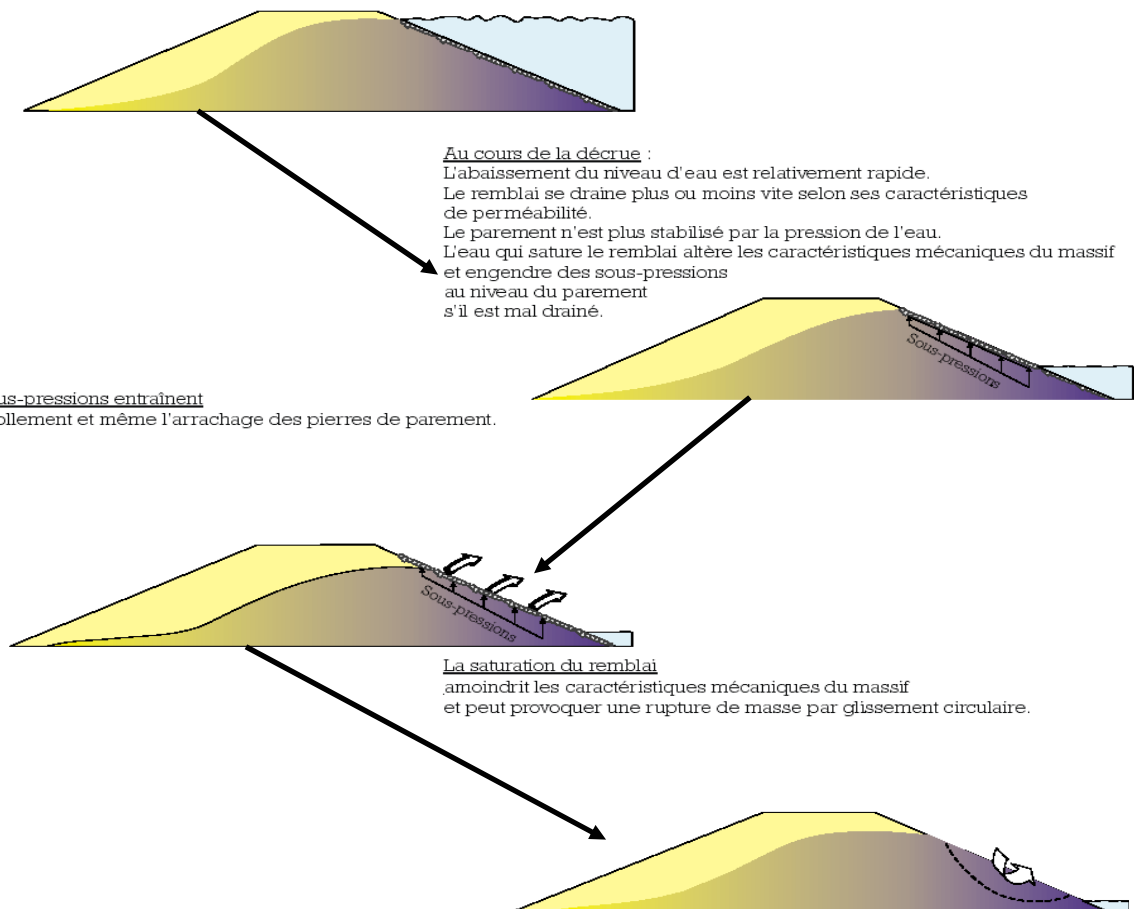


Figure 5.10. Le mécanisme de glissement côté fleuve lors de la décrue (Mériaux et al., 2001)

5.5.2. Exemple de cas de rupture par glissement

Le plus souvent, ce mécanisme ne provoque pas une brèche complète de la digue. On observe plutôt des désordres importants (lentilles de glissement), faisant que la digue ne pourrait pas résister à la crue suivante si elle n'était pas réparée.

Il existe de très nombreux exemples de glissements, notamment lors des décrues en Camargue durant l'hiver 1993/1994. La figure 5.11 illustre les deux mécanismes de glissement :



Figure 5.11. Glissements côté val en crue (photo à gauche) puis côté fleuve à la décrue (photo à droite)

5.6. Synthèse

Nous nous sommes efforcés dans ce chapitre de définir précisément la terminologie relative aux mécanismes de rupture affectant les digues. Par ailleurs, nous avons présenté les mécanismes de rupture que peuvent subir les digues de protection contre les inondations.

Nous avons vu que les digues subissent des mécanismes de rupture similaires aux autres ouvrages hydrauliques en remblai. Les mécanismes qui affectent les digues de protection contre les inondations sont toutefois moins nombreux car ces ouvrages ne sont pas en charge en permanence.

Il existe quatre mécanismes de rupture des digues de protection contre les inondations : la surverse, l'érosion interne, l'érosion externe et le glissement. Parmi ces mécanismes, la surverse et l'érosion interne sont les mécanismes les plus fréquemment observés et présentant des cinétiques rapides.

Chapitre 6 : Proposition d'un modèle fonctionnel de rupture des digues

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle de fonctionnement des digues et de leurs mécanismes de rupture. En première et deuxième parties, nous présentons succinctement les méthodes disponibles pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes : les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement et les modèles issus du raisonnement qualitatif. En troisième partie, nous adaptons ces méthodes au contexte des digues et nous développons un modèle fonctionnel pour représenter les mécanismes de rupture.

6.1. 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 (Simon, 1991) et dans lequel les relations de cause à effet ne sont pas toujours établies scientifiquement et nécessitent une part d'intuitif.

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 très difficile, voire impossible, de produire un modèle de fonctionnement par des approches physiques classiques (Villemeur, 1988).

Dans le cas des digues, nous sommes face à un système complexe puisque nous sommes confrontés à des processus physiques complexes, redondants, progressifs et faisant intervenir de nombreuses interactions avec le milieu extérieur.

Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement apparaissent alors bien adaptées pour la modélisation des mécanismes de rupture des digues.

6.1.1. 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.

Définissons tout d'abord la notion de fonction. 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 (Fig. 6.1) 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.

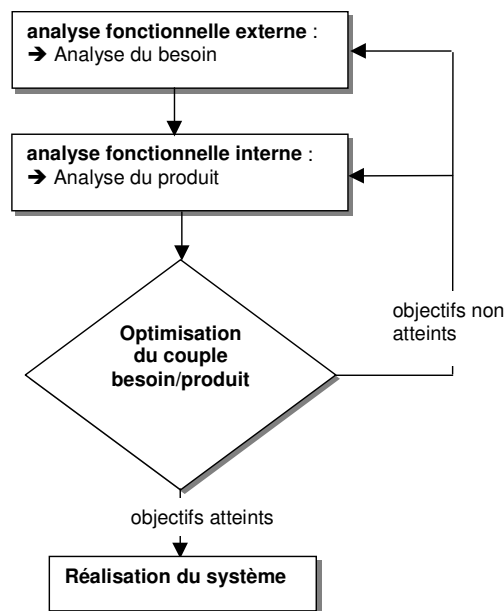


Figure 6.1. Démarche générale de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)

On distingue trois familles (Zwingelstein, 1996) :

- l'analyse fonctionnelle tirée des techniques d'analyse de la valeur : normes NF X50-150 à X50-153 ; Reliasep ; méthodes FAST, Den, APTE ;
- l'analyse fonctionnelle appliquée à l'informatique et aux logiciels : SADT et IDEF-0 ;
- l'analyse fonctionnelle appliquée aux organisations : méthode MERISE.

Dans le domaine des systèmes mécaniques (tels les digues), l'expérience tirée de l'utilisation des différentes méthodes a montré que les méthodes d'analyse de la valeur, bien que

d'application générale, sont particulièrement adaptées (Peyras, 2003). Elles ont comme applications récentes :

- les produits de construction du bâtiment (Lair, 2000) ;
- les barrages (Peyras, 2003) ;
- les routes (Valadas, 2003) ;
- les installations d'eau à l'intérieur des bâtiments (Correc, 2005).

Parmi celles ci, la méthode APTE (APplication des Techniques d'Entreprises), développée par le cabinet conseil APTE, est une méthode d'analyse de la valeur appliquée à l'organisation des entreprises, au calcul et à la présentation des frais généraux. Elle est également l'une des plus utilisées en Sûreté de Fonctionnement, généralement employée en vue d'une analyse des modes de défaillance ultérieure. Elle présente l'originalité d'effectuer simultanément deux analyses dépendantes l'une de l'autre : une analyse structurelle et une analyse fonctionnelle (Zwingelstein, 1996).

Nous proposons d'appliquer une démarche d'analyse fonctionnelle basée sur la méthode APTE, qui semble être la mieux adaptée au contexte du génie civil (ISDF). Cette analyse se décompose en deux parties principales (Fig. 6.2) :

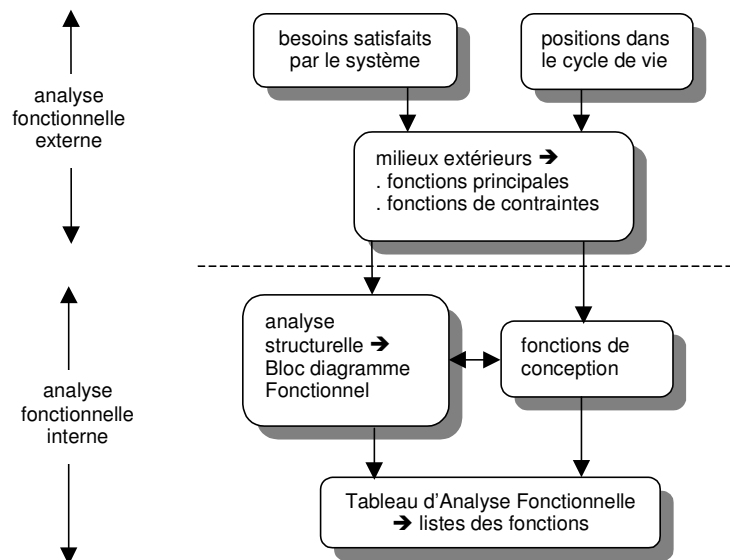


Figure 6.2. Processus de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)

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).

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).

La méthode APTE met en œuvre des outils puissants de l'analyse fonctionnelle : le Bloc-diagramme Fonctionnel et le Tableau d'Analyse Fonctionnelle (Zwingelstein, 1996).

Le Bloc diagramme Fonctionnel (BdF) est une représentation du système et des milieux extérieurs qui met en évidence (Fig. 6.3) :

- 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.

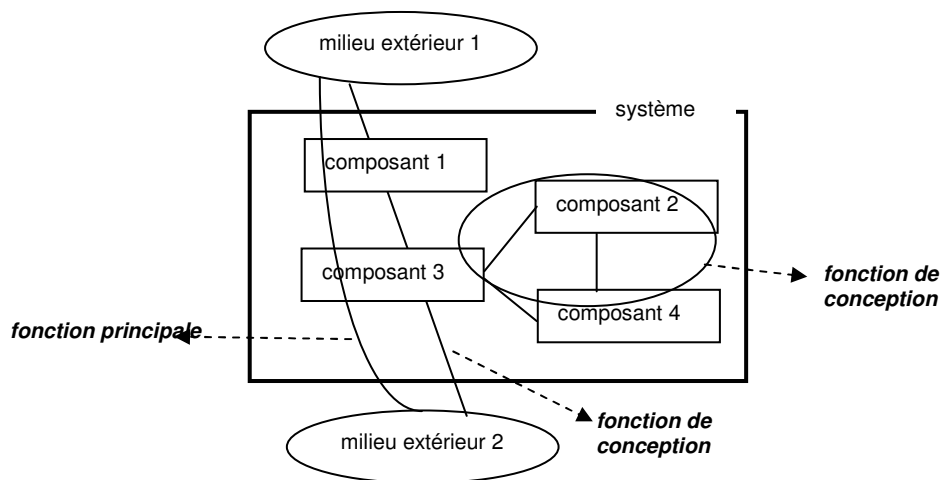


Figure 6.3. BdF appliqué à un système de quatre composants (Zwingelstein, 1996)

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* des composants en examinant les interactions entre les composants du système et les milieux extérieurs.

Le Tableau d'Analyse Fonctionnelle (TAF) découle de l'analyse du BdF. Il rassemble, d'une part, les fonctions principales du système, d'autre part, les composants et leurs fonctions de conception (Tab. 6.1).

		Fonction principale	Fonction de conception
Composants du système	n°1		
	n°2		
	...		
	n°N		

Tableau 6.1. Structure d'un Tableau d'Analyse Fonctionnelle (Zwingelstein, 1996)

L'analyse fonctionnelle est essentielle à l'application d'une méthode d'analyse des modes de défaillance puisqu'elle recense de manière exhaustive tous les éléments du système (analyse structurelle), les interactions du système avec le milieu extérieur (analyse fonctionnelle externe) et les interactions de chaque composant du système avec l'environnement extérieur (analyse fonctionnelle interne). Elle aboutit à la liste des fonctions principales du système et aux fonctions de conception des composants.

6.1.2. L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

6.1.2.1. Les principes de l'AMDE

L'AMDE est apparue dans les années 1960 dans l'aéronautique et est actuellement une des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement la plus 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.

C'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 : non fonctionnement, perte ou dégradation d'une fonction, fonction intempestive, et leurs effets) (ISDF).

Le déroulement d'une AMDE la recherche systématique des modes de défaillance, de leurs causes et de leurs effets (Villemeur, 1988). Les résultats des analyses AMDE sont présentés sous forme de tableaux, spécialement conçus pour le type de système étudié (Tab 6.2).

Elément	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets
Disjoncteur	Interrupteur	Refus d'ouverture	Collage	Non délestage
«	«	Refus de fermeture	Mécanique	Non alimentation
«	Protection sur court-circuit	Refus d'ouverture	Collage	Non protection
«	Passage du courant	Ouverture intempestive	Mauvais réglage	Coupure d'alimentation
«	«	Echauffement	Contacts défectueux	Détérioration électronique

Tableau 6.2. AMDE appliquée à un disjoncteur électrique

La chronologie des analyses d'une étude 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 (Fig. 6.4) (ISDF) :

- *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 ;
- *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 ;
- *l'AMDE Moyen* est plus rarement réalisée pour rechercher les moyens à mettre en œuvre.

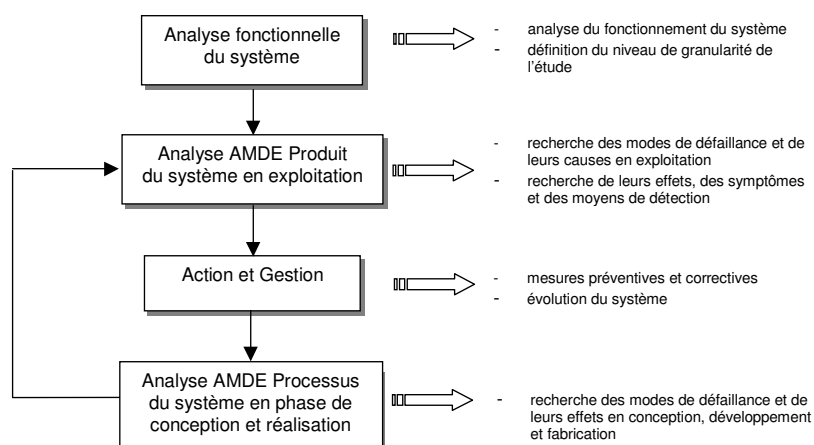


Figure 6.4. Processus général de l'AMDE (Peyras, 2003)

6.1.2.2. Les applications récentes de l'AMDE en génie civil

L'AMDE a été utilisée depuis la fin des années 1990 dans différents domaines du génie civil : les bâtiments, les routes, les barrages, les digues de canaux et les digues aux Pays-Bas.

Dans le domaine du bâtiment, et plus particulièrement de ses produits de construction, (Lair, 2000) propose une démarche reposant sur l'utilisation de l'analyse fonctionnelle couplée à une AMDE pour caractériser la durabilité des produits de construction. Cette étude est une des premières dans le domaine du génie-civil à utiliser des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement telles l'Analyse Fonctionnelle et l'AMDE. Elle comporte les étapes suivantes (Fig. 6.5) :

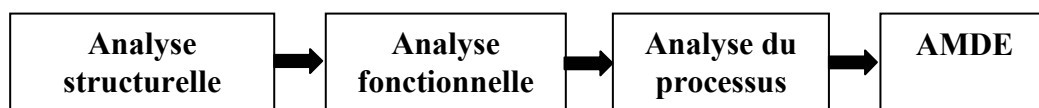


Figure 6.5. Evaluation de la durabilité – Approche fondée sur l'AMDE (Lair, 2003)

- définition du produit et de ses éléments (éléments et matériaux composant le produit, relations entre éléments, avec les produits voisins...) ;
- identification des fonctions assurées par le produit et le rôle de chacun de ses éléments ;
- identification des défaillances pour chacune des étapes du processus de construction (conception, fabrication, transport, stockage, mise en œuvre, maintenance) qui pourront avoir une influence sur le comportement futur du produit ;
- recherche des différents scénarios conduisant à la défaillance, c'est à dire les différents enchaînements d'événements qui vont conduire à une défaillance du produit.

Dans le domaine des routes, une démarche utilisant les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement (analyse fonctionnelle, AMDE) a été mise en oeuvre (Valadas, 2003). Cette approche a abouti à la construction de scénarios de dégradation des chaussées.

Dans le domaine du diagnostic des installations d'eau à l'intérieur des bâtiments, le démarche proposée par (Correc, 2005) a permis de décomposer le système et d'associer par la suite des observations et des informations qualitatives afin d'établir des scénarios de dégradation des installation liés à la corrosion.

Dans le domaine des barrages, les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement (analyse fonctionnelle, AMDE) ont été mises en oeuvre (Peyras, 2003). Ces travaux ont été complétés

par des applications aux barrages poids (Pomero, 2001) et aux barrages en remblais (Figeac, 2003) (Fig. 6.6).

N°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	MOTEN DE DETECTION
3	Noyau étanche						
		1 - résister aux sollicitations mécaniques	la fonction.	"Pracoeur conception-réelisation"	"Etat intrinsèque du composant"		
		1. résister à la poussée hydraulique transmise par le remblai amont	"résister aux sollicitations mécaniques"	. compaction	. fissuration	. piézomètre	. piézomètre
		2. résister aux rous-prossions dans les fondations amont	art de qre d'écou au art de défailante	"Etat intrinsèque du composant"	. déformation		. cellule de pression interstitielle
		3. résister aux rous-prossions dans les fondations aval		. déformation			
		4. résister à la poussée du remblai amont		"Flux de charges"			
		5. résister à la poussée du remblai aval		. rous-prossions dans le noyau étanche			
		6. résister au poids de la crête					
		7. résister au poids propre de l'ouvrage					
		8. résister aux charges d'exploitation transmises par la crête					
		2 - limiter les flux hydrauliques	la fonction.	"Etat intrinsèque du composant"	"Flux hydrauliques"		
		1. limiter les infiltrations provenant du remblai amont	"limiter les flux hydrauliques"	. fissuration	. eaus d'infiltration dans le noyau étanche		
		2. limiter les infiltrations provenant de la fondation amont	art de qre d'écou au art de défailante	. érosion	. eaus d'infiltration dans le dispositif de drainage vertical		
		3. limiter les infiltrations provenant de la fondation aval		. dissolution			
		4. limiter les infiltrations d'eau de pluie provenant de la crête		. desiccation			
				"Flux hydrauliques"	"Flux de charges"		
				. eaus d'infiltration dans le remblai amont	. rous-prossions dans le noyau étanche	. piézomètre	. piézomètre
				. eaus d'infiltration dans la fondation			. cellule de pression interstitielle
				"Pracoeur conception-réelisation"			
				. compaction			
		3 - préparer les surfaces de contact	la fonction.	"Etat intrinsèque du composant"	"Contact"		
		1. préparer la surface de contact avec la crête	"préparer les surfaces de contact"	. déformation	. Déformation de la crête	. mesures du tassement	. mesures topographiques
		2. préparer la surface de contact de l'ouvrage de crue	art de qre d'écou au art de défailante				. planimétrie
		3. préparer la surface de contact du dispositif de drainage					. nivellement
		4. servir d'appui à la galerie			"Etat intrinsèque du composant"	. fissures	. observation visuelle
					. fissuration		
		4 - résister aux sollicitations hydromécaniques	la fonction.	"Pracoeur conception-réelisation"	"Etat intrinsèque du composant"		
		1. résister aux phénomènes d'érosion interne du aux eaus d'infiltration provenant du remblai	"résister aux sollicitations hydromécaniques"	. compaction	. érosion	. observation de particulier dans les eaus de fuite	. observation visuelle
		2. résister aux phénomènes d'érosion interne du aux eaus d'infiltration provenant de la fondation	art de qre d'écou au art de défailante	"Flux hydrauliques"		. mesures du débit de drainage	. empiètement - écoulement - débitmètre
		3. résister aux phénomènes d'érosion interne du aux eaus d'infiltration provenant de la fondation aval		. eaus d'infiltration dans le noyau étanche			
		4. résister aux phénomènes de desiccation		"Etat intrinsèque du composant"			
				. dissolution			
				. fissuration			

Figure 6.6. AMDE du noyau étanche d'un barrage en remblai (Figeac, 2003)

6.1.2.3. Les applications de l'AMDE aux digues

Dans le domaine des digues, quelques références bibliographiques introduisent des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement. C'est notamment le cas aux Pays-Bas pour les digues de protection de polder. En 1998, (Pilarczyk, 1998) analyse la digue comme un système composé de plusieurs éléments, chacun devant assumer des fonction bien précises. Dans les études de (Klein Breteler *et al.*, 2000), (Pilarczyk, 2003) et (Coeveld *et al.*, 2004) l'analyse structurelle des digues est réalisée. Enfin, les modes de dégradation de ces éléments sont recensés dans (Pilarczyk, 1998).

En France, pour les digues en charge en permanence, (Lepetit, 2002) a adopté une démarche fondée sur les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement (analyse fonctionnelle et AMDE) (Tab. 6.3).

A partir de la méthode AMDE, il a dégagé les principaux scénarios de rupture afin de proposer les méthodes et techniques de reconnaissance les plus adaptées.

Fonction	Elément	Mode	Cause	Effet direct	Effet indirect	Symptôme	Détection
Stabilité	Remblai	Séisme	liquéfaction	Ecoulement	Effondrement Propagation	Zone sismique Granulométrie	Essais

Tableau 6.3. AMDE appliquée aux digues en charge en permanence –extrait (Lepetit, 2002)

6.1.2.4. Synthèse de l'AMDE

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.

La recherche bibliographique a montré des applications intéressantes en génie civil, notamment dans le domaine des barrages (Peyras, 2003). Pour les digues de protection contre les inondations, aucune recherche remarquable n'a été mise en évidence.

6.1.3. Autres méthodes qualitatives de la Sûreté de Fonctionnement

A côté de l'AMDE, il existe d'autres méthodes qualitatives de Sûreté de Fonctionnement parmi lesquelles nous recensons l'Analyse Préliminaire des Dangers (APD) et la Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR) :

- *l'Analyse Préliminaire des Dangers* est utilisée dans les premières phases de conception d'un système et constitue un premier outil d'identification des risques potentiels (Villemeur, 1988). Cette méthode ne présente pas d'intérêt pour les digues car les mécanismes 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 ;
- la *Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées* qui a pour objet de prendre en compte la combinaison des modes de défaillance, après une étude AMDE.

Ces méthodes ont été analysées et décrites dans deux thèses (Lair, 2000) puis (Peyras, 2003). Dans ce cadre, l'intérêt de telles méthodes pour des applications en génie civil a été examiné.

Une synthèse de ces travaux est reportée en annexe 1 vers laquelle nous renvoyons le lecteur intéressé.

6.1.4. Les méthodes quantitatives de la Sûreté de fonctionnement

Ces méthodes visent, outre l'identification des risques, à produire des mesures de la sûreté de fonctionnement. Les principales sont la Méthode de l'Arbre des Causes (MAC) et la Méthode des Arbres d'Événements (MAE). D'autres méthodes sont destinées à simuler le fonctionnement dynamique d'un système : la Méthode de l'Espace des Etats, les réseaux de Petri stochastiques et les simulations de Monte Carlo.

6.1.4.1. La Méthode des Arbres des Défaillances

La *Méthode des Arbres des Défaillances*, parfois appelée la méthode de l'Arbre des Causes, est une méthode déductive : l'événement indésirable situé au sommet de l'arbre et on déduit les événements intermédiaires et de base (Fig. 6.7). Chaque niveau d'événements est relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à des opérateurs qualitatifs (max, et, ou, si...) (Villemeur, 1988).

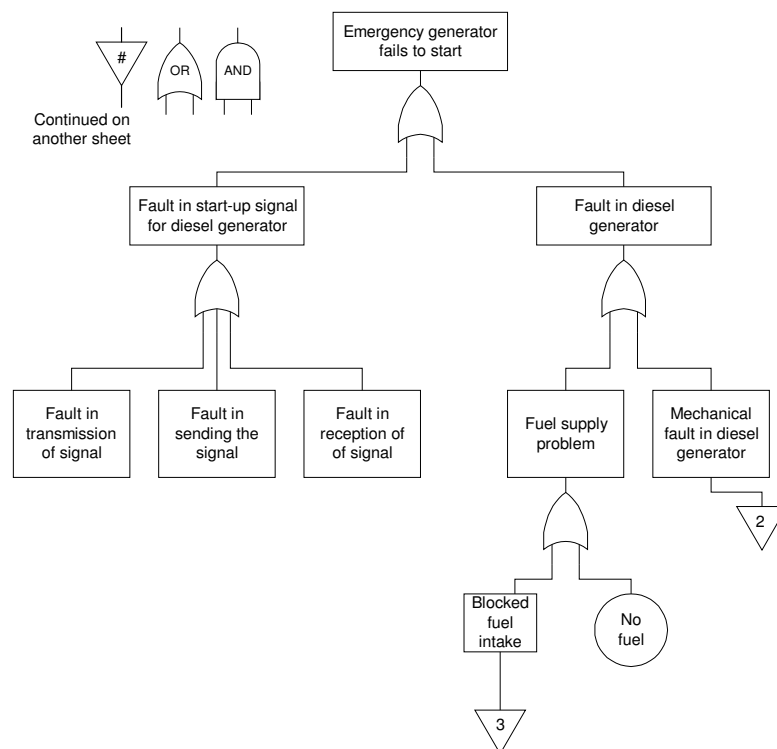


Figure 6.7. Arbre des causes appliqué à un générateur de secours (CEA, 2000)

Les arbres de défaillances sont utilisés dans le domaine du génie civil. Dans le domaine des ponts, (Sianipar *et al.*, 1997) a utilisé des arbres de défaillance pour montrer l'influence de la dégradation d'un composant du pont sur ses autres composants et (Johnson, 1999) a utilisé des arbres de défaillance pour déterminer les probabilités de rupture de ces ouvrages.

La méthode des arbres des causes apparaît, à travers son mode de construction et son application en génie civil, bien adaptée à la représentation des mécanismes de rupture des digues.

6.1.4.2. La Méthode des Arbres d'Événements

La *Méthode des Arbres d'Événements (MAE)*, appelée parfois la Méthode de l'Arbre des Conséquences, est issue de l'industrie nucléaire (Fig.6.8). 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) (Villemeur, 1988).

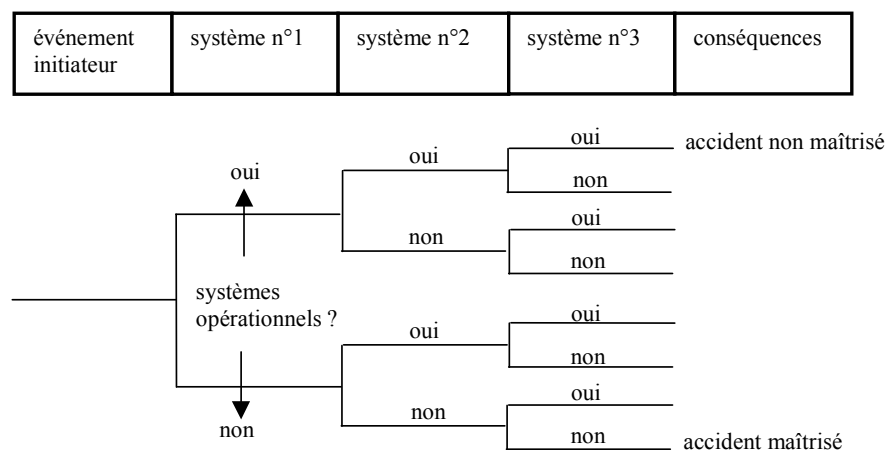


Figure 6.8. Structure d'un arbre d'événements (Zwingelstein, 1996)

La MAE présente des inconvénients pour une utilisation dans le contexte du génie civil : les défaillances des ouvrages et de leurs composants sont rarement binaires ni chronologiques, mais plutôt progressives, bouclées et redondantes (Peyras, 2003). Ainsi, leur mise œuvre sur les digues nécessiterait des adaptations aux particularités des mécanismes de ces ouvrages.

6.1.4.3. Autres méthodes quantitatives

La *Méthode de l'Espace des Etats (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.

Pour un ouvrage de génie civil, tel que les digues, constitué de nombreux composants susceptibles de connaître plusieurs états de dégradation progressifs, les transitions à étudier deviennent rapidement très importantes, rendant la méthode inutilisable (données disponibles insuffisantes, complexité des mécanismes en jeu).

Les réseaux de Petri stochastiques 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).

Les limites de la méthode apparaissent dès lors que le système à étudier est complexe et qu'on envisage plusieurs états de dégradation. De plus, dans le contexte du génie civil, cette méthode nécessite des informations particulièrement difficiles à obtenir, voire impossible (lois de variables, modèle de comportement).

Les simulations de Monte Carlo sont utilisées lorsque le système à étudier est trop complexe. Dans ce cas, 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 :

- disposer d'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. Ces modèles sont souvent connus d'une manière déterministe pour les systèmes mécaniques simples. Ceci n'est pas le cas pour les digues.
- disposer d'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.

Ces méthodes ont également été analysées et décrites (Lair, 2000) et (Peyras, 2003). Nous renvoyons le lecteur intéressé vers l'annexe 1.

6.1.5. Synthèse

Les digues sont des systèmes complexes du fait essentiellement de leurs mécanismes de rupture. Pour modéliser le fonctionnement et les défaillances des digues, nous proposons d'utiliser les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement qui sont bien adaptées pour de tels systèmes.

Ces méthodes permettent l'identification des risques et l'analyse du comportement et des défaillances. Elles sont qualitatives (APD, AMDE, MCPR) ou quantitatives (MAC, MAE...), fondées sur la construction de graphes d'états (MEE, réseaux de Petri stochastiques), fondées sur la simulation (simulation de Monte-Carlo).

Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement concernent de plus en plus le domaine du génie civil. Les exemples développés montrent des applications récentes de l'analyse fonctionnelle et de l'AMDE aux domaines du bâtiment, des routes, des barrages. Nous proposons d'utiliser l'Analyse Fonctionnelle et l'AMDE à notre contexte des digues.

L'analyse fonctionnelle va permettre d'analyser le fonctionnement des digues au sein de leur environnement et les interactions de leurs composants au sein de la structure. Elle est essentielle avant l'application d'une AMDE. Il existe différentes techniques d'analyse fonctionnelle et nous proposons d'utiliser la méthode APTE qui est bien adaptée aux ouvrages de génie civil.

La méthode AMDE répond à nos objectifs. 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 aux dégradations des digues. Nous proposons donc d'adapter cette technique aux digues de protection contre les inondations.

Enfin, la méthode des arbres de défaillance est intéressante pour la représentation des mécanismes de rupture des digues. Sur la base de l'AMDE, elle permet d'enchaîner de façon inductive les défaillances s'opérant sur les composants des digues.

6.2. Les modèles issus du raisonnement qualitatif

6.2.1. Principes 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 *et al.*, 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.

Il existe de nombreuses techniques pour représenter et manipuler les données qualitatives :

- l'algèbre des signes ;
- le raisonnement sur les ordres de grandeur ;
- le raisonnement sur les intervalles ;
- le raisonnement asymptotique par les ordres de croissance ;
- les ensembles flous et la théorie des possibilités.

Nous ne développons pas ces différents outils et nous renvoyons le lecteur à (Travé-Massuyès *et al.*, 1997).

6.2.2. Les modèles du raisonnement qualitatif

Le raisonnement à base de modèles (Model Based Reasoning) est un processus déductif mettant en œuvre des modèles qualitatifs. Il est utilisé pour prévoir, simuler et expliquer le comportement d'un système complexe, à partir du comportement et du fonctionnement de ses composants.

Deux situations peuvent conduire à préférer les modèles qualitatifs par rapport aux modèles traditionnels numériques :

- lorsqu'on peut se satisfaire de résultats approchés (par exemple, caractériser un processus physique sans en donner les paramètres exacts) ;
- lorsque les connaissances sur le système sont imprécises ou intrinsèquement qualitatives.

En effet, c'est de plus en plus le cas des gestionnaires de patrimoine qui sont confrontés d'un côté à des incomplétudes, imprécisions, voire indisponibilité des données, et de l'autre à des choix budgétaires. Les modèles qualitatifs trouvent donc naturellement leur utilité pour servir de support à des tâches ne requérant pas une forte précision, pour lesquelles les considérations quantitatives sont peu utiles (Travé-Massuyès *et al.*, 1997).

Les applications principales des modèles qualitatifs sont les suivantes :

- le diagnostic à base de modèle des systèmes ;

- la simulation qualitative du comportement des systèmes ;
- des applications plus diverses comme la production, la recherche des défaillances...

On distingue deux classifications pour les modèles qualitatifs (Travé-Massuyès *et al.*, 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, au moyen d'un graphe orienté ; ils permettent donc de prendre en compte les liens de cause à effet.

Dressons un rapide panorama des modèles du raisonnement qualitatif susceptibles d'intéresser notre contexte (Travé-Massuyès *et al.*, 1997).

6.2.2.1. Modèles qualitatifs statiques

Les modèles causaux (c'est-à-dire les modèles statiques avec causalité explicite) reposent sur l'élaboration d'un graphe causal, dont les nœuds sont des variables et dont les arcs traduisent les influences entre ces variables.

Parmi ces modèles, les plus simples se contentent d'identifier les relations entre les variables sans les qualifier.

Dans les graphes orientés signés, les nœuds et les variables sont affectés d'un signe (+, -, 0) et les arcs d'un signe (+, -). La figure 6.9 donne l'exemple d'un système simple comprenant un réacteur et une boucle de recyclage et son graphe orienté signé.

Les graphes de propagation de valeurs symboliques (type modèle de Simao) sont des graphes causaux plus sophistiqués, où les variables d'entrée prennent des valeurs qualitatives dans un espace fermé, et incluant des règles de transfert et d'opération des valeurs qualitatives.

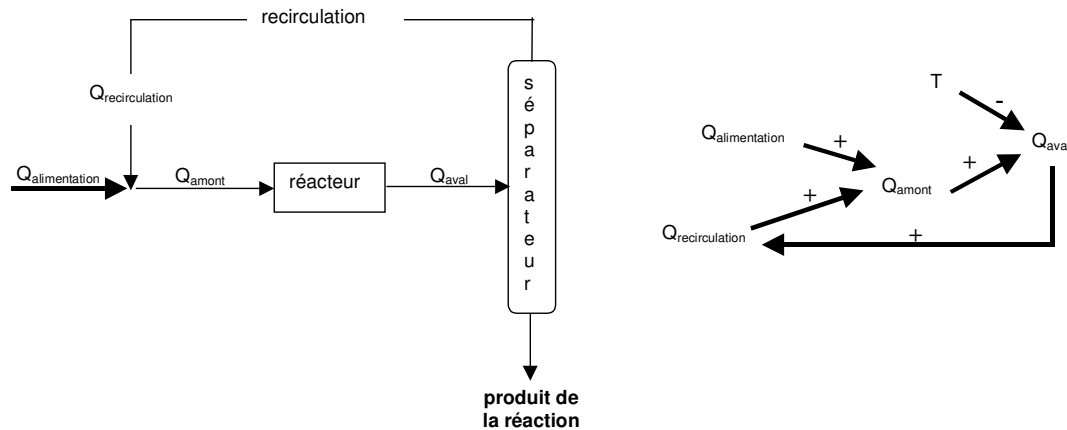


Figure 6.9. Boucle de recyclage et son graphe orienté signé (Travé-Massuyès et al., 1997)

6.2.2.2. Modèle qualitatif dynamique

L'objectif des modèles qualitatifs dynamiques est de représenter l'évolution du système entre deux états d'équilibre et la description globale du comportement dans le temps.

Leur principe est de reproduire le comportement des systèmes à partir des relations de cause à effet : tout événement affectant une variable est propagé sur les autres variables, qui lui sont causalement dépendantes, par l'intermédiaire de chemins causaux (arcs).

La propagation peut être simulée par des fonctions de transfert qualitatives et dynamiques prenant le temps comme paramètre (Fig. 6.10).

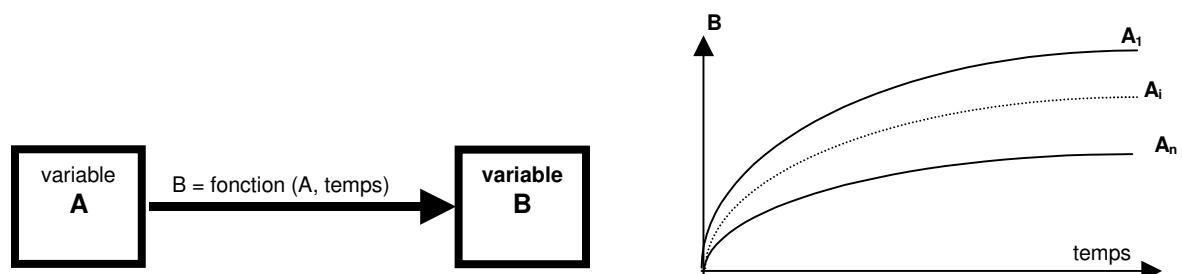


Figure 6.10. Graphe causal dynamique

Dans le domaine de la Sûreté de Fonctionnement, et notamment lors de l'utilisation de l'AMDE on raisonne en terme de mode de défaillance. A chaque défaillance, une cause est

associée à un effet : le raisonnement est donc causal. Cet aspect conduit quasiment naturellement à l'utilisation de graphes causaux (Travé-Massuyès *et al.*, 1997).

6.2.3. Synthèse

Les modèles qualitatifs semblent pouvoir offrir un excellent support pour la représentation des scénarios de rupture des digues. En effet, ils s'adaptent à la complexité du système digues et à la qualité des informations disponibles.

Nous préférons les graphes causaux 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.

6.3. Modèle fonctionnel pour les mécanismes de rupture des digues

6.3.1. L'analyse fonctionnelle des digues

Nous recherchons ici le rôle et la participation des composants de la digue, chacun d'entre eux assurant des fonctions contribuant au fonctionnement global de la digue : ce sont les fonctions de conception.

Notre démarche pour l'analyse fonctionnelle est présentée à la figure 6.11 :

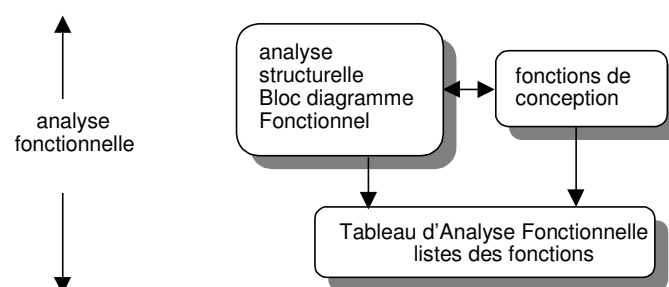


Figure 6.11. Démarche de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)

Les développements méthodologiques présentés ici sont appliqués à un profil type particulier de digue : les digues à étanchéité amont.

6.3.1.1. Choix de la granularité spatiale

La granularité est la finesse d'un grain d'un modèle. La granularité spatiale correspond donc à l'échelle spatiale de description d'un système (Peyras, 2003).

En préliminaire à l'analyse structurelle 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 effets des défaillances sur la globalité de l'ouvrage (la digue) ;
- la granularité intermédiaire, qui découpe le système en composants distincts ;
- la granularité inférieure, qui s'intéresse aux sous-composants et aux matériaux des composants de granularité intermédiaire.

Bien entendu, des analyses plus précises pourraient être réalisées selon les besoins à des granularités plus fines (au sein des matériaux) ou plus larges (à l'échelle d'un bassin hydro-géographique).

Dans l'application aux digues, nous souhaitons une description précise des mécanismes physiques s'opérant dans les structures permettant de prendre en compte :

- les défaillances des différents composants constituant la digue ;
- les mécanismes de rupture à l'échelle des composants ;
- les effets des défaillances des composants sur le système global (la digue).

Notre objectif étant une description fine des digues et de leurs mécanismes, nous réalisons l'analyse fonctionnelle à l'échelle spatiale du composant. Nous nous intéresserons donc aux fonctions accomplies par les composants des digues.

6.3.1.2. L'analyse structurelle des digues

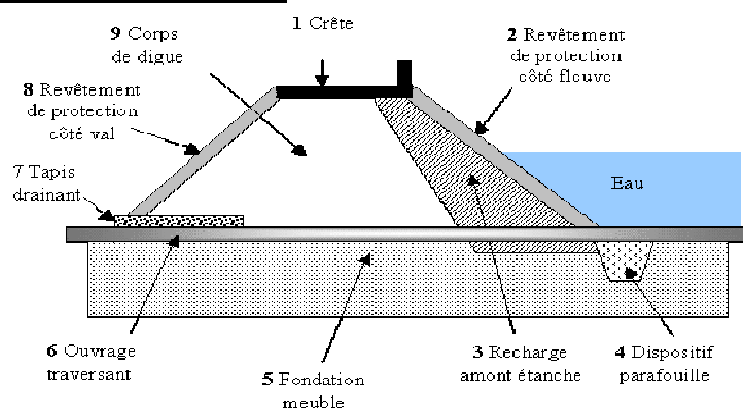
L'analyse structurelle permet de lister tous les composants constitutifs du système, de repérer leur position physique au sein de l'ouvrage et de déterminer les interactions avec les autres composants.

Elle consiste à découper l'ouvrage, selon les 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 (cf. annexe 2).

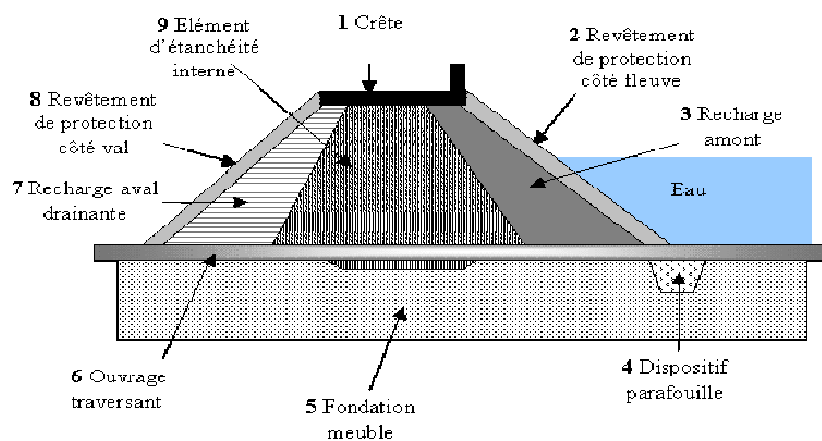
On procède à l'analyse structurelle des différentes catégories de digues. Nous avons examiné des profils de digues types, telles qu'elles sont observées en situation réelle, et décrit avec tous les composants et équipements afin d'adapter la décomposition structurelle au maximum d'ouvrages existants. Cette analyse a conduit à retenir trois profils en travers types couvrant l'ensemble des digues de protection contre les inondations rencontrés dans le parc français (Fig. 6.12) :

- les digues à étanchéité amont ;
- les digues à étanchéité interne ;
- les digues en maçonnerie.

Digue à étanchéité amont :



Digue à étanchéité interne :



Digue en maçonnerie :

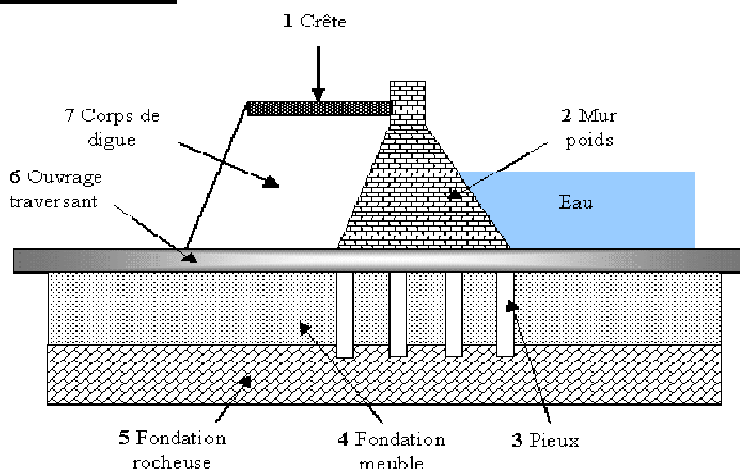


Figure 6.12. Les trois profils structurels de digues représentatif du parc de digue français

A partir de l'analyse structurelle, nous déterminons l'ensemble des composants, regroupés dans un tableau (Tab. 6.4) :

Numéro	Composant	Nature possible
1	Crête	Granulats Terre
2	Revêtement de protection côté fleuve	Terre végétale Terre végétale et grillage anti-fouisseur Perré Perré et terre végétale Enrochements Enrochements et terre végétale
3	Recharge amont étanche	Argiles compactées Géomembrane
4	Dispositif para fouille	Enrochements Enrochements et rideau (palplanches ou pieux) Rideau (palplanches ou pieux) Maçonnerie Béton
5	Fondation meuble	Sol
6	Ouvrage traversant	Béton Métal Fonte Plastique Bois
7	Tapis drainant	Géotextile Granulats
8	Revêtement de protection côté val	Terre végétale Terre végétale et grillage anti-fouisseur Perré Perré et terre végétale
9	Corps de digue	Matériaux disponibles sur place
10	Dissipateur d'énergie	Béton Enrochements
11	Déversoir	Béton Perré

Tableau 6.4. Les composants des digues en remblai à étanchéité amont

Nous obtenons onze composants pour le profil des digues en remblai à étanchéité amont. A chacun d'entre eux sont associés un numéro de nomenclature et une description de la nature des matériaux pouvant rentrer dans la constitution des composants.

6.3.1.3. Les fonctions de conception des digues

Les fonctions de conception que réalisent les composants du système sous-entendent des fonctions de contact et de flux. Elles expriment les interactions des composants entre eux, mais aussi entre les composants et les milieux extérieurs.

Les interactions des composants entre eux et avec les milieux extérieurs sont matérialisées au moyen de schémas : les Blocs diagrammes Fonctionnels (BdF) établis à l'échelle du composant (Fig. 6.13). Nous étudions les interactions liées aux contacts, aux sollicitations mécaniques et aux écoulements (flux hydrauliques et flux hydrodynamiques).

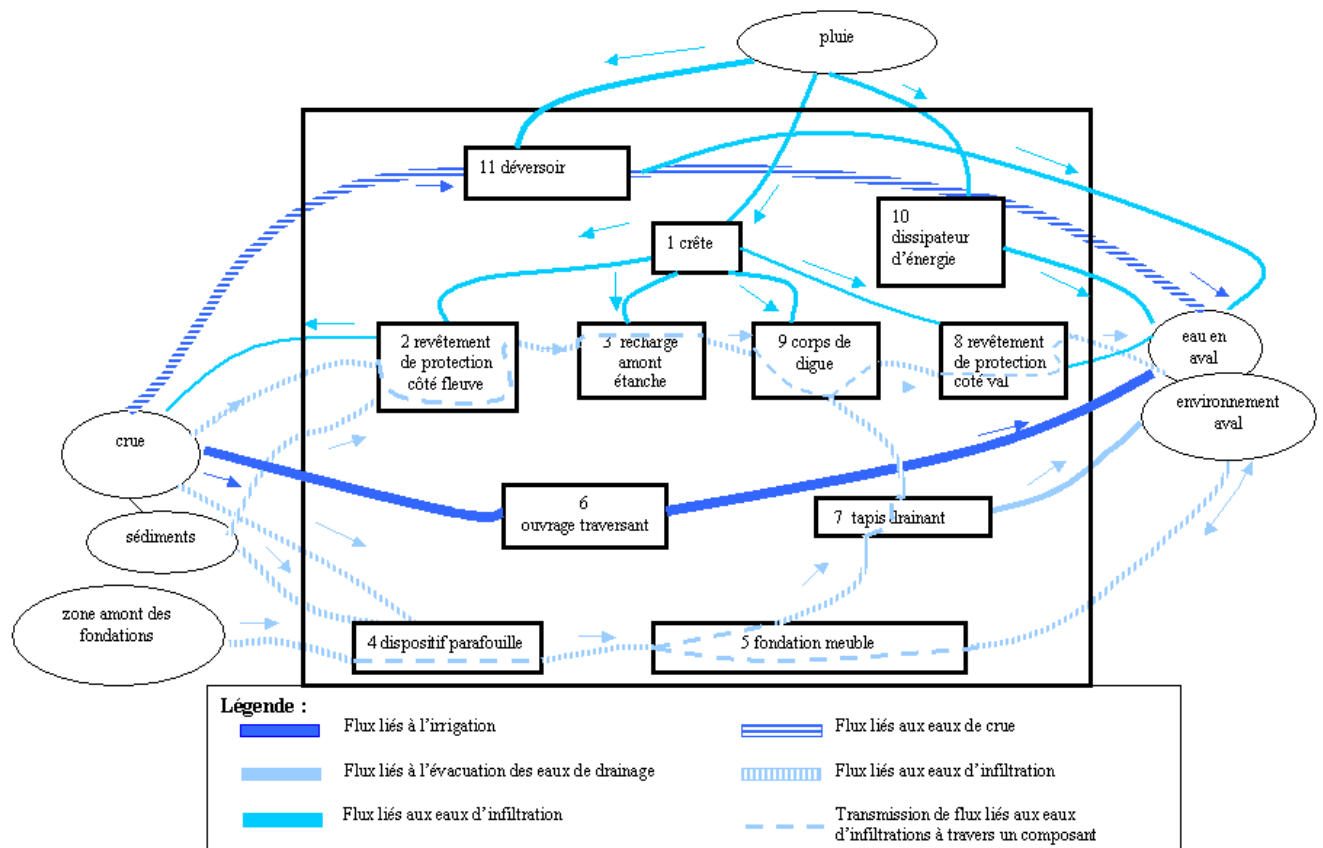


Figure 6.13. Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux interactions de flux hydrauliques dans une digue à étanchéité amont

Pour chaque profil structurel, nous avons construit quatre Blocs diagrammes Fonctionnels différents représentant quatre types de relations possibles :

- 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).

Les trois autres Blocs diagrammes Fonctionnels sont présentés en annexe 3.

L'analyse des Blocs diagrammes Fonctionnels permet d'obtenir les fonctions de conception des composants, regroupées dans les tableaux d'analyse fonctionnelle (Tab. 6.5) et classées selon l'origine de l'interaction (contacts, sollicitations mécaniques, flux hydrauliques...).

Numéro	Composant	Classification de la fonction	Fonctions de conception
1	Crête	Flux hydrauliques	- limiter l'infiltration d'eau de pluie - évacuer l'eau de ruissellement vers le revêtement de protection côté val - résister à l'érosion externe provenant des eaux de ruissellement - résister à l'érosion externe au cours d'une crue
		Sollicitations mécaniques	- résister aux charges dues à la circulation - résister aux développements des racines

Tableau 6.5. Tableau d'analyse fonctionnelle - Extrait pour les digues à étanchéité amont (Serre et al.)

Au final, ces tableaux synthétisent l'analyse fonctionnelle des digues et récapitulent, pour chaque composant, les fonctions de conception accomplies par les composants, classés selon leurs origines : hydraulique, hydromécanique et des flux de charge (cf. Annexe 4).

6.3.2. L'AMDE appliquée aux digues

6.3.2.1. Démarche générale

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets détermine, pour chaque fonction accomplie par les composants de la digue, leurs modes de défaillance susceptibles d'apparaître aux différents cycles de la vie de l'ouvrage, leurs causes et leurs effets. Outre la connaissance précise des séquences de défaillance, l'AMDE va alors nous permettre de structurer les informations relatives aux ruptures des digues.

Pour l'application aux digues, nous simplifions la démarche générale de l'AMDE proposée dans l'industrie (Fig. 6.4) et nous réalisons qu'une AMDE Produit, sur un ouvrage qui sera de qualité variable en fonction de sa conception et réalisation. L'AMDE Produit vise à déterminer les défaillances des digues en phase d'exploitation, éventuellement liées au processus de conception et de réalisation des ouvrages.

Cette simplification (Fig. 6.14) conduit à ne pas produire d'AMDE Processus, qui dans le cas des digues, ne présente pas d'intérêt. En effet, les digues de protection contre les inondations sont des ouvrages généralement anciens pour lesquels on ne dispose que de peu

d'informations relatives au processus de conception et de réalisation, et pour lesquels on ne vise pas dans notre travail à améliorer ce processus.

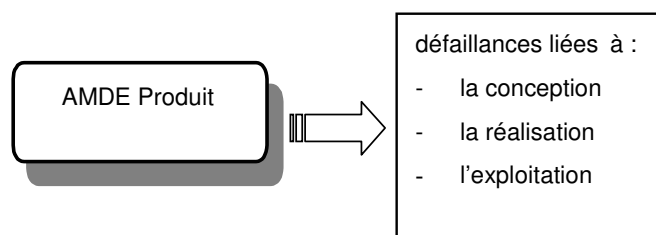


Figure 6.14. Démarche AMDE utilisée pour les digues

6.3.2.2. L'AMDE adaptée aux digues

Nous recherchons avec l'AMDE (Produit) les différents modes de défaillance de l'ouvrage en service, liés au processus de conception et réalisation mais aussi aux aléas pouvant apparaître lors de son exploitation. L'analyse adoptée est similaire à celle utilisée sur les barrages (Peyras, 2003).

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 (Tab. 6.6).

n°	composant	fonction	mode de défaillance	cause possible de la défaillance	effet possible de la défaillance	Indicateur de la défaillance	moyen de détection
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧

Tableau 6.6. Structure de l'AMDE adaptée aux digues

Les colonnes 1 et 2 correspondent respectivement au numéro du composant et à son nom déterminés lors de la décomposition structurelle à la granularité intermédiaire.

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. Nous distinguons deux types de mode de défaillance :

- la défaillance (totale) d'une fonction, pouvant correspondre, d'une part, à une fonction qui était réalisée et qui ne l'est plus, d'autre part, à une fonction qui n'a jamais été réalisée ;
- la dégradation d'une fonction, qui correspond à une fonction partiellement ou mal réalisée.

La colonne 5 liste les causes possibles de la défaillance. Nous obtenons les causes d'une défaillance d'un composant à partir des Blocs diagrammes Fonctionnels. Elles ont donc 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 BdF 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.

Les colonnes 7 et 8 présentent respectivement les indicateurs et leurs moyens de détection. Les effets des défaillances se manifestent par des indicateurs, qui sont détectés par différents moyens de détection associés aux indicateurs.

Remarquons les principales adaptations par rapport aux pratiques rencontrées (Lair, 2000), (ISDF), (Zwingelstein, 1995), (Villemeur, 1988) :

- nous avons pris soin de ne jamais mélanger les granulométries d'analyse des défaillances. Nous focalisons notre recherche à une granularité unique, à l'échelle du composant, et nous verrons par la suite comment examiner les répercussions sur le système global. Nous obtenons ainsi une analyse homogène des paramètres ;
- nous recherchons les causes des défaillances avec la même rigueur que leurs effets : cela nous permettra d'enchaîner par la suite des séquences consécutives de modes de défaillance ;
- nous groupons tous les effets dans une seule catégorie, tous étant susceptibles de produire de nouveaux modes de défaillance. Cela évite de distinguer les effets directs ou indirects, locaux ou globaux... ou d'autres nuances que l'on trouve dans la littérature, mais qui sont en pratique difficiles à mettre en œuvre ;

- nous introduisons un élément nouveau, les indicateurs, qui n'existent pas dans les AMDE traditionnelles.

Nous présentons (Tab. 6.7) un extrait d'AMDE réalisée pour les digues en remblai à étanchéité interne. Les tableaux complets, reportés en annexe 5, analysent successivement les 11 composants du profil transversal type.

1 N°	2 Composant	3 Fonctions	4 Mode de défaillance	5 Causes possibles de la défaillance	6 Effets possibles de la défaillance	7 Indicateurs	8 Moyens de détection
1	Crête	1 - limiter les flux hydrauliques	la fonction	~ Processus conception-réalisation :	~ Flux hydrauliques		
		.1 limiter les infiltrations d'eau de pluie	" limiter les infiltrations d'eau de pluie"	. composition	. eaux d'infiltration dans le corps de digue	. fuites sur le parement aval	. observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante		. eaux d'infiltration dans la recharge amont étanche		
				~ Etat intrinsèque du composant	~ Flux de charges		
				. fissuration	. sous-pressions dans le corps de digue	. piézométrie	. piézomètres

Tableau 6.7. L'AMDE adaptée aux digues (extrait du composant crête)

Il faut mentionner ici la difficulté, voire l'impossibilité de recenser exhaustivement tous les causes et effets possibles des modes de défaillance. En effet, une démarche systématique et itérative donne des causes et effets très nombreux et divers. Il est donc nécessaire d'intégrer une part d'expertise et d'établir un tri des informations obtenues. Notre constat rejoint l'opinion émise dans (Villemeur, 1988) sur l'exhaustivité des causes des modes de défaillance.

Ainsi, si nous pouvons considérer que l'ensemble des modes de défaillance a été envisagé (dans les limites 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 vieillissement.

6.3.3. Modèle qualitatif de scénario de rupture de digue

A partir de l'AMDE, nous avons organisé l'information relative aux mécanismes de rupture des digues. Sur ces bases, les modèles du raisonnement qualitatif nous permettent de proposer un modèle pour la représentation des mécanismes sous la forme de scénarios (Fig. 6.15).

Pour ce faire, et à l'instar du modèle proposé dans (Peyras, 2003), nous utilisons les graphes causaux pour représenter les scénarios : chaque mécanisme est modélisé dans un graphe décrivant les processus fonctionnels des défaillances.

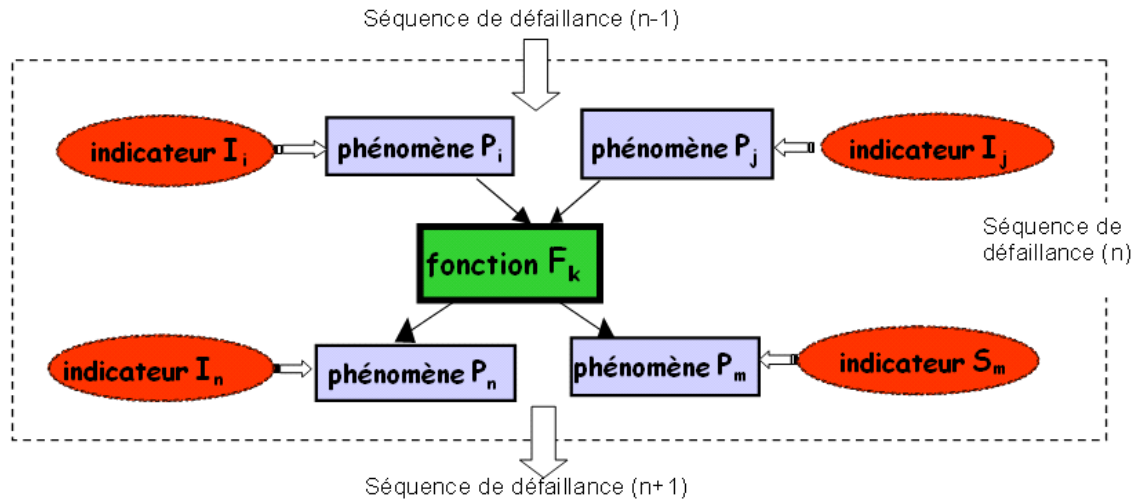


Figure 6.15. Schéma conceptuel pour l'écriture des scénarios de rupture

Le modèle proposé consiste à construire les scénarios de rupture des digues en enchaînant les causes aux modes de défaillance, puis aux effets, ces derniers se traduisant par des indicateurs.

Les scénarios de rupture des digues ainsi modélisés enchaînent des séquences chronologiques de défaillance, représentant les mécanismes physiques se produisant au sein du système et conduisant 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.

Le 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 (Fig. 6.16). Il sera appliqué pour le scénario de rupture par érosion interne d'une digue à étanchéité amont sur la figure 7.2.

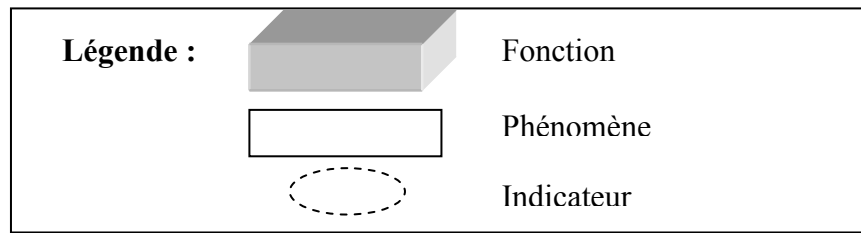


Figure 6.16. Représentation des variables dans le graphe causal

Les variables « phénomène » sont renseignées par les variables « indicateur », qui traduisent la manifestation des mécanismes (indicateur $\Rightarrow$ phénomène). Les combinaisons de variables « phénomène » vont conduire à la dégradation d'une (ou des) variable(s) « fonction », la perte de performance de cette dernière produisant à nouveau une nouvelle séquence de phénomènes (phénomènes $\Rightarrow$ fonction $\Rightarrow$ phénomènes). 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.

Un tel modèle présente de nombreux avantages : il structure la connaissance experte sous forme de scénarios fonctionnels, il organise l'information liée au mécanisme autour de trois catégories de variables (fonction, phénomène et indicateur) et il permet de prendre en compte les dégradations partielles et progressives des variables et les mécanismes non chronologiques (Peyras, 2003).

Les phénomènes (les causes et effets des modes de défaillance) intervenant dans les mécanismes de rupture des digues sont répertoriés et classés selon l'origine :

- état intrinsèque du composant : déformation, fissuration, érosion, colmatage, composition ;
- flux hydraulique : eau de crue, eau d'infiltration, eau d'irrigation par canalisation traversante, eau de drainage ;
- les sollicitations mécaniques : poussée hydrostatique, forces de pesanteur et sous pressions ;
- les sollicitations hydromécaniques : érosion interne, érosion externe, colmatage ;
- la conception et la réalisation : perméabilité, drainage, composition.

Nous distinguons trois catégories d'indicateurs (les indicateurs traduisent les phénomènes dans les mécanismes) :

- les indicateurs visuels sont détectés par l'observation visuelle d'un garde-digue ou d'un expert : érosion, végétations, ouvrages singuliers, désordres ;
- les indicateurs mesurés sont issus d'une mesure d'auscultation ou d'un essai in situ ou au laboratoire : piézométrie, débit, déformations ;
- les indicateurs calculés sont obtenus à partir d'un calcul faisant intervenir des indicateurs auscultés et correspondent aux facteurs de stabilité intervenant dans les conditions d'états-limites des digues : gradient hydraulique, charge hydraulique, coefficients de sécurité au glissement.

6.4. Synthèse

A partir de l'Analyse Fonctionnelle, nous disposons d'une description précise des digues, de leurs composants et des liens entre les composants entre eux et avec leur environnement. Les informations obtenues par l'analyse fonctionnelle servent de base à l'application de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets. L'AMDE nous fournit une liste exhaustive des modes de défaillance des composants des digues et de l'essentiel de leurs causes, effets et indicateurs associés.

A partir de ces résultats et en utilisant une représentation au moyen de graphes causaux, nous disposons d'un modèle fonctionnel pour représenter les mécanismes de rupture des digues sous la forme de scénarios.

A ce stade, il nous reste à modéliser les différents mécanismes de rupture des digues à partir du modèle fonctionnel que nous avons proposé. Ce développement fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 7 : Modélisation des mécanismes de rupture de digue

Ce chapitre présente la modélisation des mécanismes de rupture des digues sous la forme de scénarios. La base de ce travail est la connaissance experte et nous insistons tout d'abord sur le rôle important des experts lors de cette étape. Ensuite, nous appliquons le modèle fonctionnel proposé pour les mécanismes de rupture des digues et un exemple est présenté : l'érosion interne des digues à étanchéité amont. Enfin, nous proposons une forme simplifiée du modèle fonctionnel de rupture de digue à partir duquel reposera la méthodologie d'évaluation de la performance des digues.

7.1. L'apport de l'expérience

Dans le domaine industriel, les scénarios de défaillance sont construits directement à partir de l'AMDE. Les industriels peuvent utiliser des programmes informatiques qui leur permettent d'être complètement exhaustifs et de construire tous les scénarios possibles.

Mais parfois, les résultats perdent en lisibilité et deviennent trop difficiles à interpréter. En effet, considérer l'ensemble des dégradations est de l'ordre de l'impraticable, ne serait-ce que pour un système ne comprenant que quelques éléments (Price *et al.*, 2001).

(Lannoy *et al.*, 2005) montre toute l'importance en Sécurité de Fonctionnement, d'être en parfaite corrélation avec « l'expérience » acquise lors de la vie du système, pour assurer de manière efficace un fonctionnement sûr de ce système. C'est pourquoi il est primordial d'intégrer à nos méthodes la connaissance experte.

Dans notre contexte, nous sollicitons les experts sur la base de l'analyse AMDE et à partir du modèle fonctionnel de représentation des mécanismes, pour modéliser les scénarios pertinents, ceux décrits dans la littérature technique et connus des experts. Les scénarios de rupture de digue sont donc construits sur le principe suivant (Fig. 7.1) :

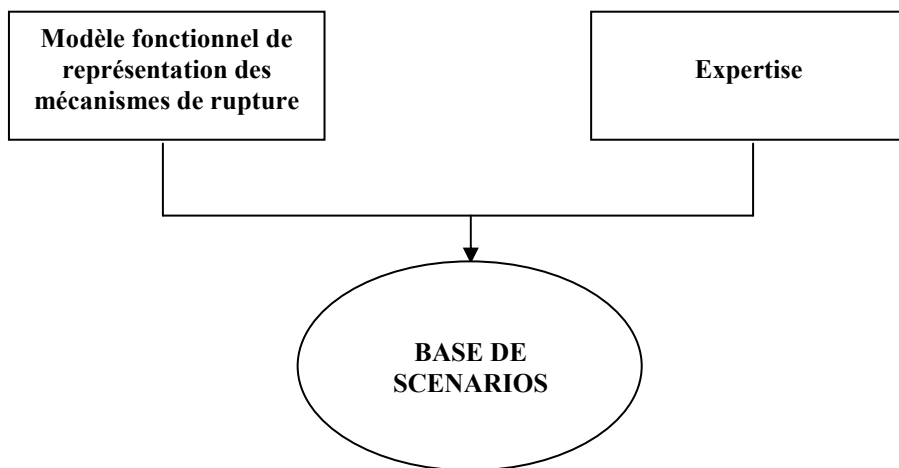


Figure 7.1. Démarche pour la modélisation des scénarios

7.2. Présentation de la modélisation d'un mécanisme

Le mécanisme d'érosion interne (Cf. Chapitre 5) comporte trois séquences de défaillance successives : la dégradation mécanique du revêtement de protection côté fleuve, conduisant à la perte d'étanchéité de la recharge amont, elle-même conduisant à des processus d'érosion interne dans le corps de digue. L'application du modèle fonctionnel de représentation des mécanismes de rupture à l'érosion interne d'une digue à étanchéité amont conduit au graphe causal suivant (Fig. 7.2).

- **Séquence 1 : dégradation mécanique du revêtement de protection côté fleuve**

Dans une première séquence de défaillance, plusieurs phénomènes sont susceptibles de dégrader la performance de la fonction « le revêtement de protection côté fleuve résiste aux sollicitations mécaniques ». Il s'agit des phénomènes « végétation », « animaux fouisseurs », « chocs d'embâcles », « hydrogéomorphologie de la rivière » et/ou « composition du revêtement de protection côté fleuve ».

- **Séquence 2 : perte d'étanchéité de la recharge amont**

Lors de la deuxième séquence de défaillance, sous l'effets de phénomènes tels que les « racines dans la recharge amont étanche », « trous d'animaux fouisseurs dans la recharge amont étanche », « érosion de la recharge amont étanche », « composition de la recharge amont étanche » et/ou « ouvrages traversants dans la digue », la fonction « la recharge amont étanche limite les flux hydrauliques » va se dégrader, conduisant à des infiltrations d'eau dans le corps de digue.

- **Séquence 3 : perte de résistance du corps de digue**

La troisième séquence de défaillance concerne le corps de digue. La fonction « le corps de digue résiste à l'érosion interne » peut être affectée par les phénomènes « racines dans le corps de digue », « trous d'animaux fouisseurs dans le corps de digue », « composition du corps de digue », « eau d'infiltration dans le corps de digue » et/ou « ouvrages traversants dans la digue ». Les effets de la perte de performance de cette fonction sont des phénomènes d'érosion interne dans le corps de digue, susceptibles de conduire à la rupture du tronçon.

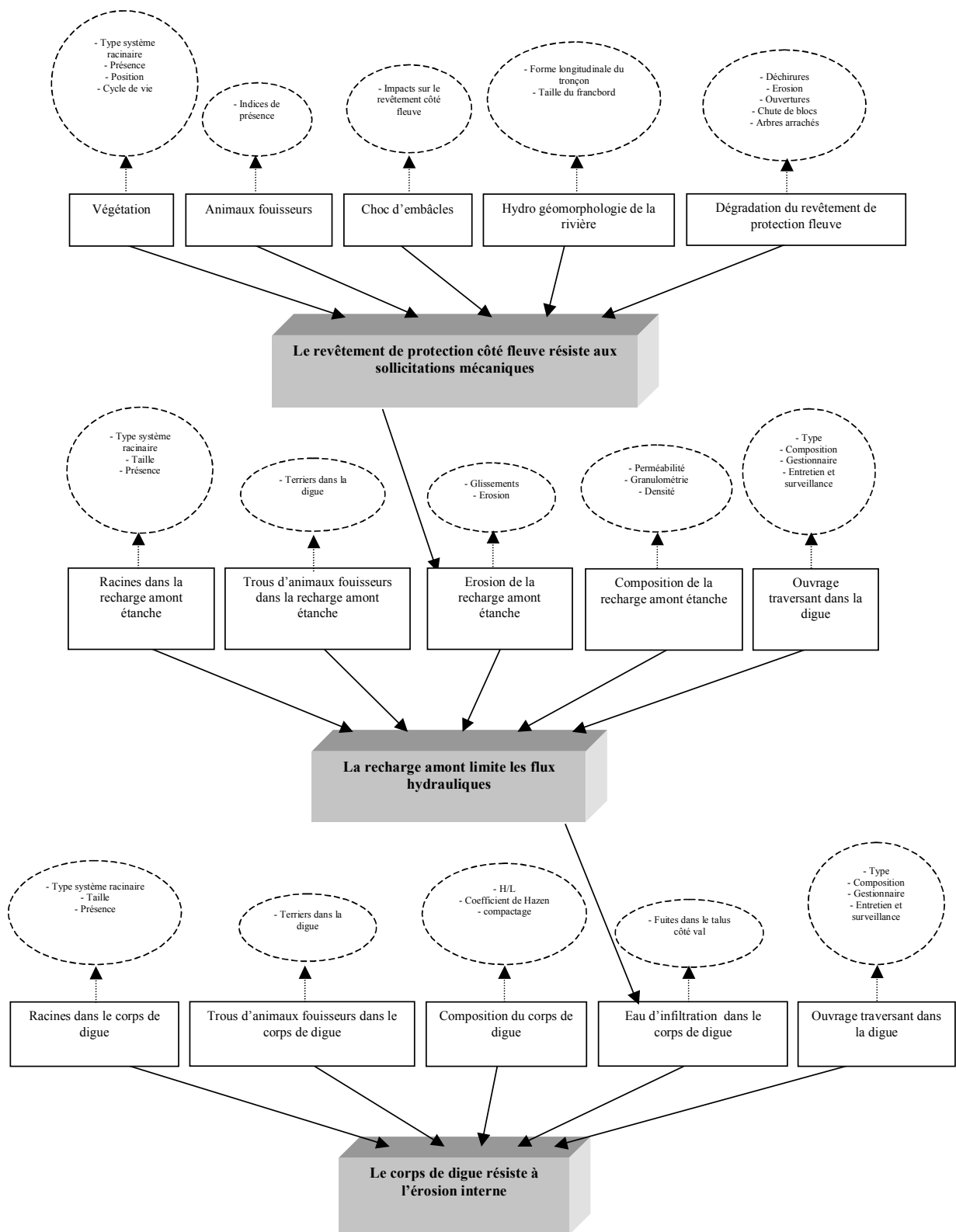


Figure 7.2. Scénario de rupture par érosion interne d'une digue à étanchéité amont

Par l'analyse des processus physiques s'opérant dans les ouvrages et à chaque niveau de défaillance, nous avons recensé les fonctions de conception des composants qui vont se dégrader, les phénomènes conduisant et résultant de ces modes de défaillance et leurs

indicateurs associés. Nous disposons donc de toutes les informations pour construire le graphe causal correspondant au scénario de perte d'étanchéité des digues à étanchéité amont.

Nous avons réalisé ce travail de modélisation de la connaissance experte sur l'ensemble des scénarios de rupture de digue. Ce sont au total 6 scénarios que nous avons modélisés (Tab. 7.1) pour les digues à étanchéité amont. Ils sont reportés en annexe 6.

Numéro	Nom	Condition hydraulique
1	Surverse	crue
2	Affouillement côté fleuve	crue ou régime normal de la rivière
3	Erosion interne en fondation	crue ou régime normal de la rivière
4	Erosion interne dans le corps de digue	crue
5	Glissement côté fleuve	décru
6	Glissement côté val	crue

Tableau 7.1. Scénarios de rupture des digues

7.3. Une représentation des scénarios sous forme d'arbres de défaillance

Nous avons vu que la méthode des arbres de défaillance, permet, après l'application d'une AMDE, de représenter les séquences de défaillances dans une structure (Millet *et al.*, 1999).

Nous proposons donc de bâtir, sous la forme d'arbres de défaillances, les différents scénarios. Cette représentation permet de montrer, à partir de l'événement redouté et de façon déductive les phénomènes aux différentes séquences de défaillance qui contribuent à provoquer l'événement redouté.

A titre d'illustration, nous appliquons la méthode des arbres de défaillances au scénario d'érosion interne (Fig. 7.3).

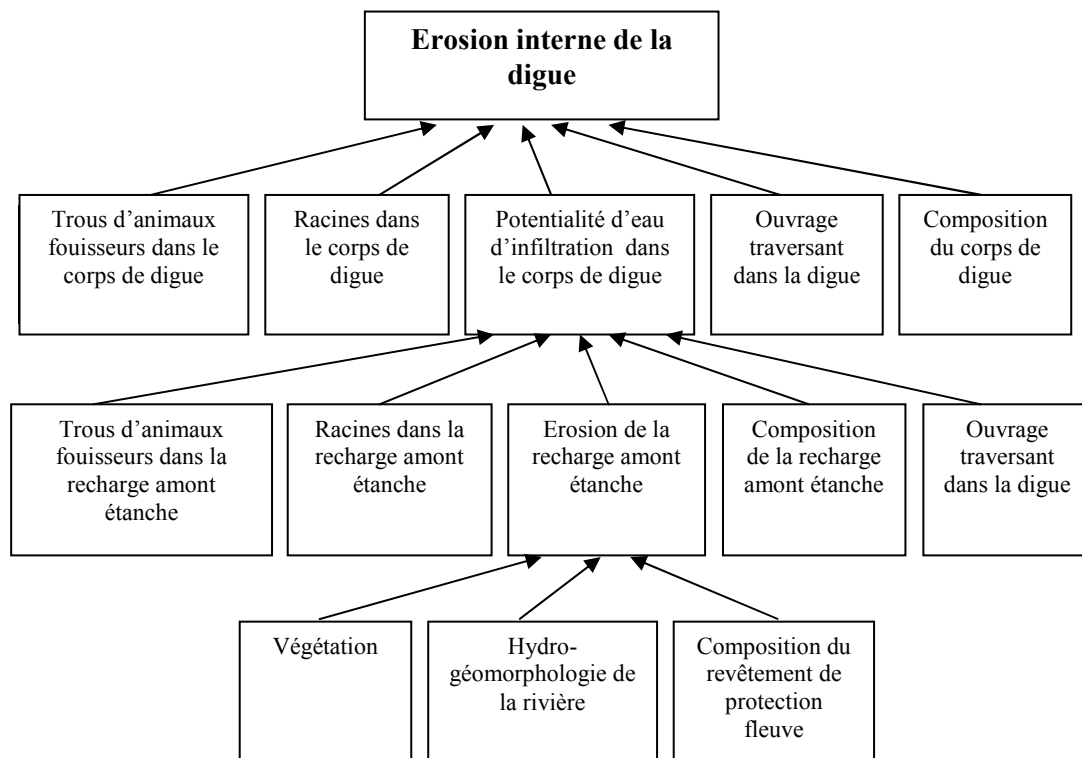


Figure 7.3. Arbre de défaillance relatif au mécanisme d'érosion interne de la digue

Cet arbre de défaillance offre une vision plus claire des phénomènes en jeu conduisant à l'érosion interne d'une digue à étanchéité amont. Cette représentation des mécanismes sous forme d'arbre de défaillance sert de support aux experts pour évaluer la performance des digues.

7.4. Synthèse

Pour concentrer notre recherche sur les scénarios de rupture de digue les plus réalistes, nous avons intégré aux résultats fournis par l'AMDE de la connaissance experte. Cette connaissance experte est primordiale en Sûreté de Fonctionnement pour corréler les méthodes au fonctionnement réel du système étudié.

Ainsi, en combinant les résultats de l'AMDE et de l'expertise, nous avons construit l'ensemble des scénarios de rupture des digues en remblai, soit 6 scénarios pour les digues à

étanchéité amont (cf. annexe 6). Ces scénarios sont représentés à partir du modèle fonctionnel proposé pour les mécanismes de rupture des digues.

Au final, nous proposons une représentation des scénarios de rupture de digue sous forme d'arbres de défaillances. Ces arbres présentent l'avantage de proposer une vision synthétique des mécanismes et de leurs séquences de défaillance.

Ils vont servir de base à la collecte d'informations expertes destinées à l'évaluation de la performance des digues.

* * *

*

Troisième partie

Evaluation de la performance des digues

Chapitre 8 : Indicateurs d'état et critères pour l'évaluation de la performance des digues

Dans ce chapitre, nous proposons en première partie, des définitions générales relatives aux indicateurs, puis nous présentons les avantages que procurent l'utilisation des indicateurs de performance pour une meilleure gestion d'un patrimoine de génie civil. Dans une deuxième partie, nous présentons les principes d'utilisation des indicateurs de performance : une méthode de construction est proposée et des exemples issus du génie civil sont donnés en illustration. En troisième partie, nous proposons la construction des indicateurs d'état et des critères des digues. Ils permettront ensuite au chapitre 9 d'obtenir les indicateurs de performance des digues.

8.1. Définitions et intérêt des indicateurs de performance

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 particulières. 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.

Un *indicateur* fournit donc une donnée objective quantitative constatant un résultat, dont l'exploitation permet de faire le point par rapport à un objectif prédéterminé (Lajzerowicz *et al.*, 1998).

Nous retenons de ces notions qu'un *indicateur* peut être un *paramètre* ou être construit à partir de *plusieurs paramètres*. Un indicateur porte une information synthétique d'un

ensemble d'informations plus important. Enfin, un indicateur permet de se positionner par rapport à un objectif et constitue en cela un outil d'aide à la décision.

Nous avons vu qu'un indicateur est constitué à partir d'un ou plusieurs paramètres. Un *paramètre* est une propriété mesurée, observée ou calculée (OCDE, 1993).

Les indicateurs peuvent ensuite être agrégés pour évaluer un critère. Un *critère* est défini :

- comme un facteur de jugement sur la base duquel on mesure et on évalue un objet (Laaribi, 2000) ;
- comme 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).

Un *indice* est un ensemble de paramètres ou d'indicateurs agrégés ou pondérés décrivant une situation (OCDE, 1993). On peut, à ce titre, considérer un indice comme un critère : un critère agrège également plusieurs indicateurs.

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 al.*, 2001). Cette définition montre l'intérêt de tels indicateurs, en terme d'évaluation et d'aide à la décision.

Evaluer la performance d'une politique économique (OCDE, 1997), d'un ouvrage de génie civil (Rens *et al.*, 2005) ou de la qualité environnementale (Bonierbale, 2004), est devenu fondamental, notamment dans le contexte du développement durable. Les indicateurs de performances sont des outils incontournables pour optimiser la connaissance et la prise de décision. Dans tous les domaines, il est possible de construire des systèmes d'indicateurs de performance : ils permettent d'aider à diriger, à piloter, à évaluer et à prendre des décisions.

Les *indicateurs de performance* sont de plus en plus utilisés dans le domaine du génie civil. 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.

8.2. Construction des indicateurs de performance

8.2.1. Principes et méthodologie de construction des indicateurs de performance

L'indicateur de performance n'a d'utilité que par rapport à une action à piloter. Il doit avoir une pertinence opérationnelle (Bonnefous *et al.*, 2001) et correspondre à un objectif : soit il en mesure l'atteinte (indicateur de résultat), soit il informe sur le bon déroulement d'une action en vue d'atteindre l'objectif (indicateur de pilotage). L'indicateur de performance est destiné à être utilisé par des acteurs précis. Ces notions sont résumées sur la figure suivante (Fig.8.1) :

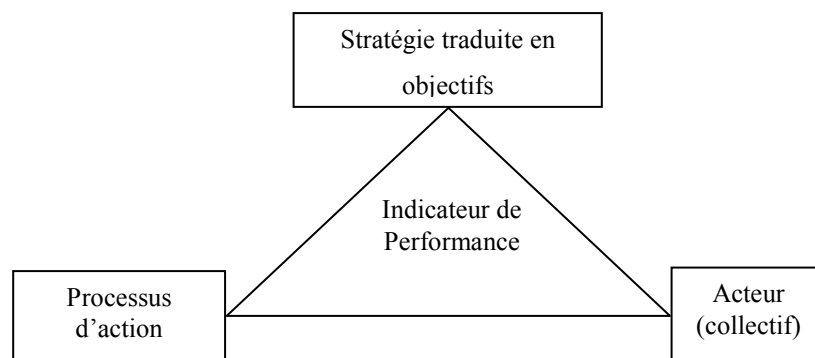


Figure 8.1. L'indicateur de performance au centre du triangle « stratégie/acteur/processus d'action » (Bonnefous *et al.*, 2001)

Sur ces bases, la méthode de construction des indicateurs se déroule en 6 étapes (Lajzerowicz *et al.*, 1998) :

- définition du champ de mesure (ou domaine d'intervention), correspondant à un secteur ou à un processus qu'on souhaite améliorer ;
- détermination des objectifs : cette étape est révélatrice de ce qu'on cherche à faire en engageant des actions, c'est à dire déterminer les objectifs en terme d'amélioration ;
- identification des variables : cela permet de mettre en évidence les éléments constitutifs du champ ayant un impact sur l'objectif et qui soient quantifiables. Cela permet de répertorier les variables qui permettent de faire le point par rapport à l'objectif en suivant son

évolution. Il s'agit des points critiques qui entraînent le plus de risques de ne pas atteindre l'objectif ;

- paramètres utilisables pour quantifier les variables retenues : il est important de mettre en valeur les paramètres mesurables pour ces variables et de s'assurer que le recueil des données sur le terrain est possible ;
- construction des indicateurs : ils sont bâtis en combinant les paramètres. Le plus souvent il en résulte des taux, des ratios, des degrés... Un paramètre peut parfois être considéré comme un indicateur ;
- validation de l'indicateur : cette étape est incontournable pour s'assurer que l'indicateur est pertinent.

Outre la méthode énoncée, un indicateur doit répondre à un certain nombre de qualités (Lajzerowicz *et al.*, 1998) :

- il doit être spécifique en étant relié à un objectif unique ;
- il faut qu'il soit sensible, c'est à dire qu'il doit refléter la moindre variation du phénomène étudié ;
- il est nécessaire qu'il soit explicite, tant dans sa définition que dans sa présentation ;
- il doit être quantifié en liaison avec l'objectif ;
- enfin, il doit être accepté et devenir un élément de dialogue entre le niveau de pilotage et le niveau des acteurs.

Lorsque l'indicateur est construit, il devra être utilisé. Au cours de son existence il pourra être modifié, contesté et même abandonné. Le devenir de l'indicateur dépend essentiellement de la volonté des acteurs qui l'auront utilisé en le confrontant à la réalité du terrain, par rapport à leurs pratiques (Bonnefous *et al.*, 2001).

En synthèse, il n'y a pas de bons ou de mauvais indicateurs, mais des indicateurs plus ou moins adaptés pour caractériser un phénomène ou un scénario : ils peuvent varier au cours du temps, être adaptés à un moment donné et plus du tout à un autre. La réussite de la méthode proposée dépend essentiellement (Lajzerowicz *et al.*, 1998) :

- ***du choix pertinent des indicateurs ;***
- ***de leur pondération ;***
- ***de l'établissement des valeurs critiques (seuils) ;***

- *du consensus autour de leur définition ;*
- *de l'utilisation collective des indicateurs.*

Nous allons suivre la méthodologie présentée ici pour construire les indicateurs de performance des digues, à partir du modèle de représentation des scénarios de rupture des digues proposé en partie 2.

8.2.2. Exemples dans le domaine du génie civil

En génie civil, de nombreuses recherches sont menées afin de parvenir, à partir de la construction d'indicateurs de performance, à une optimisation de la gestion des ouvrages. C'est particulièrement le cas dans le domaine de la gestion des ouvrages linéaires : leurs gestionnaires ont généralement la charge de plusieurs kilomètres d'ouvrages et disposent de budgets de maintenance limités. D'où l'importance de connaître parfaitement l'état et la performance du réseau pour optimiser la maintenance, en anticipant les risques liés à la dégradation ou à la rupture des ouvrages et en assurant la qualité et la continuité du service. A ce jour, les recherches les plus avancées dans ce domaine concernent les réseaux routiers (El-Assaly *et al.*, 2001), (EPFL, 2001), (VSS, 1996, 2000), les réseaux enterrés d'assainissement (Diab, 2002), (Le Gauffre *et al.*, 2004a) et de distribution d'eau potable (Le Gauffre *et al.*, 2004c).

8.2.2.1. Les routes

Les routes sont des ouvrages à long linéaire qu'il est nécessaire d'entretenir le plus correctement possible, l'enjeu principal étant d'assurer la sécurité des usagers. L'analyse bibliographique réalisée concerne trois pays : le Canada, la France et la Suisse.

Les travaux de recherche menés à Alberta au Canada (El-Assaly *et al.*, 2001) visent à augmenter l'état de service des voies de circulation et de diminuer la vitesse de dégradation des couches de roulement, soit en mettant en place un entretien routinier, soit au contraire en proposant des réhabilitations plus lourdes. Le choix de la méthode se fait d'après la construction d'un *indice*. Selon les valeurs de celui-ci, l'un des deux types d'intervention sera retenu.

L'indice utilisé a été construit en combinant 15 indicateurs. Chacun d'eux évalue la sécurité, le confort de roulement et de la conduite, et la vitesse de détérioration de la surface (Tab. 8.1).

Indicateurs	Score sécurité de conduite	Score dégradation de la chaussée	Score confort de conduite	Score final
Fissure longitudinale	9	8,8	8,4	9
Distorsion	8,2	7,6	8,6	8
Fissure transversale	7,4	8	8,2	8
Orniérage	2	7,6	3	4

Tableau 8.1. Indicateurs utilisés pour le calcul du score final – extrait (El-Assaly et al., 2001)

La note finale obtenue, par une moyenne pondérée, définit le mode d'intervention (Fig. 8.2).

$$\text{Score Indice} = (\text{score relatif à la sécurité de conduite} * 3 + \text{score relatif à la dégradation de la chaussée} * 2 + \text{score relatif au confort de conduite} * 1) / 6$$

Figure 8.2. Calcul de l'indice déterminant l'état des chaussées (El-Assaly et al., 2001)

En Suisse, la construction des indicateurs repose sur des normes précises et validées par les professionnels du domaine (VSS, 1989a, 1989b, 1989c, 1991, 1996, 1997, 2000). Ces normes permettent à tous les gestionnaires d'harmoniser leurs indicateurs. Ainsi à une échelle nationale, la vision de l'état des ouvrages est cohérente et les réseaux routiers locaux peuvent être comparés entre eux. 5 indices d'état des chaussées sont définis (VSS, 1997) :

- indice 1 (I1) : dégradations de surface ;
- indice 2 (I2) : planéité longitudinale ;
- indice 3 (I3) : planéité transversale ;
- indice 4 (I4) : qualité antidérapante ;
- indice 5 (I5) : portance.

A chacun de ces indices (I1 à I5) correspond une dégradation révélée par un symptôme et un moyen de détection associé (Tab. 8.2).

Indices Méthodes	I1	I2	I3	I4	I5
Visuelle	X				
Manuelle			X	X	X
Auscultation		X	X	X	X

Tableau 8.2. Moyens de détection associés à chaque indice (VSS, 1997)

La méthode de relevé des symptômes est défini par des normes (VSS, 1991, 1997). Des seuils sont fixés à chaque désordre pour en évaluer la gravité (classe 1 à 3) et des poids sont attribués à chaque type de désordre pour parvenir à la construction de la note globale par tronçon (Tab. 8.3).

Groupe/ type de dégradation	Occur- rence	Unité d'estima- tion	Etendue relative à unité de relevé		
			A) routes nationales 100 m' B) routes principales, autres routes 50 m'		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3
Polissage	T	m'	< 20 m'	20...100 m'	> 100 m'
Ressuage	C	m ² od. m'	10% ou < 20 m'	10...50% ou 20...100 m'	> 50% ou > 100 m'
Surface glissante					
Usure	T	m'	< 20 m'	20...100 m'	> 100 m'
Désenrobage/sablage	C	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Perte de gravillons	C	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Pelades	T	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Nids de poule	T	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Fissures de joint	C	m'	< 5 m' [< 10 m'] ^{a)}	5...25 m' [10...50 m'] ^{a)}	> 25 m' [> 50 m'] ^{a)}
Fissures transversales	C	nombre	< 2[< 4] ^{a)}	2...7 [4...14] ^{a)}	> 7 [> 14] ^{a)}
Fissures diverses	C	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Dégradations du revête- ment					
Ornières	T	m'	< 20 m'	20...100 m'	> 100 m'
Bourrelets	T	m'	< 10 m'	10...50 m'	> 50 m'
Tôle ondulée	C	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Déformations de poussée	C	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Déformations du revête- ment					
Affaissements/flaches	T/b	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Fissures d'affaissement	b	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Affaissements de bords	b	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Fissures d'épaulement	a	m'	< 10 m'	10...50 m'	> 50 m'
Soulèvements dus au gel	C	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Fissures longitudinales	C	m'	< 5 m' [< 10 m'] ^{a)}	5...25 m' [10...50 m'] ^{a)}	> 25 m' [> 50 m'] ^{a)}
Faïençage	T/C	m ²	< 10%	10...50%	> 50%
Dégradations structu- relles					
Réparations		m ²	< 10%	10...50%	> 50%

T = trace de roue
 C = Chaussée
 a = bord de la voie de circulation
 b = bord de la chaussée

Tableau 8.3. Indicateurs utilisés dans l'évaluation des indices et détermination de la gravité (VSS, 1997)

Ces indicateurs sont agrégés par des méthodes additives pour évaluer chaque indice. Chaque niveau de gravité est déterminé précisément par des valeurs seuils. Ceci permet d'attribuer un score dès le relevé de l'information.

En France, la notation des chaussées est effectuée par rapport à un état de référence : elle est représentative d'un écart entre l'état de référence et l'état constaté. L'état de référence correspond à une chaussée neuve, donc sans dégradation. Un tronçon de route possède en

principe plusieurs notes représentatives d'un état particulier. Il existe une note « patrimoine », représentative de l'état structurel de la chaussée, c'est à dire de ses sous-couches, et une note de surface liée aux défauts de celle-ci (SETRA, 2000b). Ces deux notes sont construites à partir de plusieurs indicateurs relevés visuellement sur l'infrastructure, sensiblement identiques aux indicateurs présentés dans le tableau 8.3 (fissures, déformations...).

A chaque niveau de dégradation (noté de 0 à 20) correspond des travaux spécifiques sensés ramener l'infrastructure à l'état de référence (route neuve). L'intérêt de la méthode repose sur le fait que la note est directement représentative des coûts de financement des travaux de réhabilitation (SETRA, 2000b). En outre, à chaque dégradation correspond une technique de réparation traditionnelle, ce qui permet d'obtenir une certaine stabilité des coûts.

Notons que pour les routes on parle d'indicateurs d'état plutôt que d'indicateur de performance. Cela s'explique par le fait qu'on ne cherche pas à évaluer, par exemple, la capacité de la route à assurer sa fonction de transport des personnes, mais plutôt l'état de la structure. Toutefois, la différence n'est pas significative, l'indicateur d'état étant considéré, comme un « *indicateur de performance de premier ordre* » (Cremona, 2002). Ainsi, du point de vue méthodologique, l'indicateur d'état est construit comme un indicateur de performance.

8.2.2.2. Les réseaux enterrés

Les réseaux enterrés (assainissement, eau pluviale et eau potable) représentent un patrimoine considérable qu'il faut parvenir à gérer de manière efficace pour assurer un service de qualité et rentable d'un point de vue économique.

Le fait que ce réseau soit souterrain, et donc « non visible », a induit jusqu'ici une gestion d'urgence : les réparations sont effectuées au coup par coup, lorsqu'une défaillance significative (non fonctionnement ou rupture) était constatée. Mais ce mode de gestion est coûteux, tant sur le plan financier qu'environnemental et social, et ne répond pas aux exigences de la gestion patrimoniale.

Les recherches en cours dans ce domaine (Diab, 2002) pour les réseaux visitables et (Le Gauffre *et al.*, 2004a, 2004b) pour les réseaux non visitables, montrent que les indicateurs de performance sont des outils d'aide à la gestion efficaces pour évaluer la performance d'un réseau.

Nous présentons ici l'exemple de construction d'indicateurs de performance destinés à l'organisation de la réhabilitation des réseaux d'eau potable (Le Gauffre *et al.*, 2004b). Les critères définis correspondent à la mesure d'un impact de la santé du tronçon sur l'environnement local de la conduite ou de la contribution à la baisse de qualité du service (Tab. 8.4). Ils combinent au moins une mesure de l'aléa (PFR, Predicted Failure Rate, ou PBR, Predicted Burst Rate) et une mesure de la vulnérabilité (des abonnés ou du milieu urbain) :

	Criterion	hazard	vulnerability of the environment
ARC	Annual Repair Costs	PFR	Unit Cost of Repair
WLI	Water Losses Index ($\leftarrow$ CARE-W_PI)	/	
PWI	Predicted Water Interruptions	PBR	NPS, No of People Supplied
PCWI	Predicted Critical Water Interruptions	PBR	SC, Sensitive Customers
PFWI	Predicted Frequency of Water Interruptions	PBR	
HCI	Hydraulic Criticality Index ($\leftarrow$ CARE-W_REL)	/	
DFH	Damages due to Flooding in Housing areas	PBR	IF, Intensity of Flooding, VFH, VFI, Vulnerability of exposed values
DFI	Damages / Flooding in Industrial or Com. areas	PBR	
DSM	Damages due to Soil Movements	PFR	LS, risk of Landslide
DT	Disruptions on Traffic	PBR	ST, Sensitivity of the road
DDI	Damage and/or Disruption on other Infra.	PBR	SI, Sensitive Infrastructure
WQD	Contribution to Water Quality Deficiencies	/	
COS	Co-ordination Score	/	

Tableau 8.4. Critères de décision pour la réhabilitation du réseau d'eau potable (Le Gauffre *et al.*, 2004c)

L'évaluation des critères suppose une bonne connaissance de l'état du réseau et de son environnement immédiat, et par conséquent, le développement de méthodologies facilitant l'acquisition des données, par exemple à l'aide de caméra pour les réseaux non visitables.

Une fois les critères évalués, l'indicateur de performance est construit à l'aide de méthodes multicritères et plusieurs stratégies de maintenance peuvent être préconisées, en fonction du coût de l'intervention et de l'allongement de la durée de vie souhaitée du tronçon (Abraham *et al.*, 1998). Lorsque plusieurs tronçons ont été identifiés comme potentiellement défectueux, donner des priorités aux interventions de maintenance devient essentiel. Ces priorités dépendent tout d'abord du budget du gestionnaire, mais aussi des enjeux qui peuvent être amenés à pondérer les indicateurs de performance.

8.2.3. Synthèse

Dans le contexte des ouvrages de génie civil à grands linéaires, l'utilisation des indicateurs pour évaluer l'état ou la performance est de plus en plus courante, mais elle relève parfois encore du domaine de la recherche. Les gestionnaires de réseaux ont besoin d'indicateurs pour les aider dans leurs choix techniques et budgétaires et les indicateurs de performance permettent de les assister dans leurs prises de décisions.

Les exemples présentés, relatifs à des parcs d'ouvrages à grand linéaire, montrent que les méthodes de construction des indicateurs restent analogues : elles reposent sur la connaissance des mécanismes de dégradation et sur l'identification des désordres. Les indicateurs de performance sont ensuite évalués par des scores ou des notes, dont l'échelle de notation est fixée par les experts du domaine.

Par comparaison à la méthodologie générale présentée au paragraphe 8.2 pour la construction des indicateurs, la démarche utilisée dans les exemples est respectée. Ainsi, les champs de mesures sont fixés, les objectifs déterminés, les variables identifiées, les paramètres quantifiés et combinés, puis l'indicateur est testé et corrigé jusqu'à sa validation. On remarque également que les indices ou critères sont construits à partir de l'agrégation de plusieurs indicateurs d'état.

8.3. Proposition d'indicateurs d'état et de critères pour les digues

8.3.1. Principes de construction des indicateurs de performance des digues

Nous avons modélisé les mécanismes de rupture des digues sous la forme de graphes causaux (chapitre 7). Le modèle repose sur trois variables : les *fonctions*, les *phénomènes* et les *indicateurs*. Nous avons montré les liens existants entre ces trois types de variables dans la partie 2. En particulier, 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.

Si on se réfère aux définitions et aux exemples présentés, on constate que (Fig. 8.3) :

- les *indicateurs* (issus de la modélisation des mécanismes et obtenus par l'AMDE) correspondent aux *indicateurs d'état* au sens de la terminologie d'évaluation de la performance et obtenus par l'AMDE ;
- les *phénomènes* (issus de la modélisation des mécanismes et obtenus par l'AMDE) correspondent aux *critères* au sens de la terminologie d'évaluation de la performance ;
- l'évaluation des *fonctions* (issues de l'analyse fonctionnelle) correspond aux *indicateurs de performance* au sens de la terminologie d'évaluation de la performance.

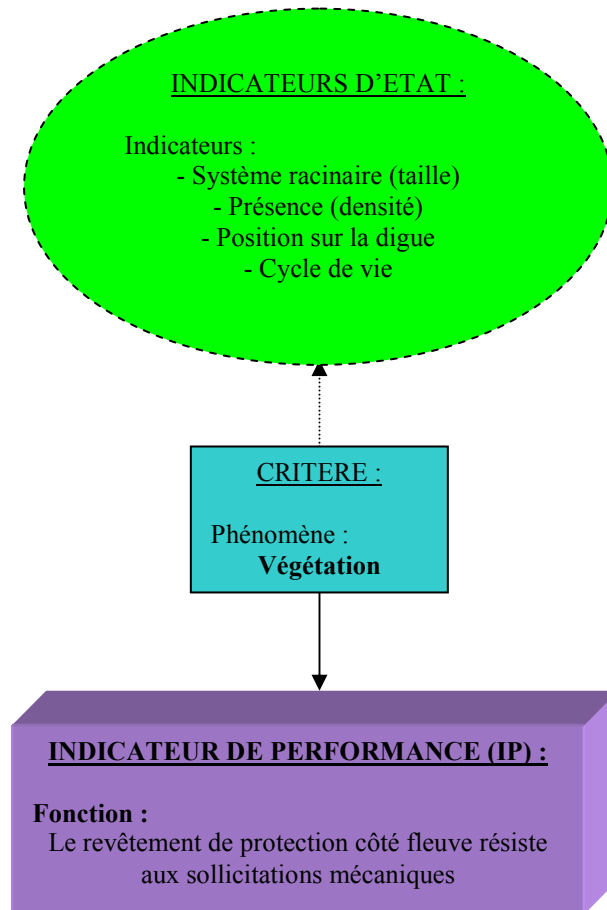


Figure 8.3. Les trois variables destinées à l'évaluation de la performance des digues - exemple

Par la suite, pour construire les indicateurs de performance des digues, nous utiliserons la terminologie suivante illustrée à la figure 8.4 :

- les *indicateurs* révélateurs des observations sur la digue ;
- les *critères* utilisés pour évaluer la *phénomènes* en agrégeant les *indicateurs* ;
- les *indicateurs de performance* (IP) renseignant sur la performance des fonctions et évalués en agrégeant les *critères* ;

Pour résumer, nous avons défini les *indicateurs d'état* et les *critères* permettant de construire les *indicateurs de performance* des digues (IP). Les liens entre les différentes variables sont représentés sur la figure 8.3 :

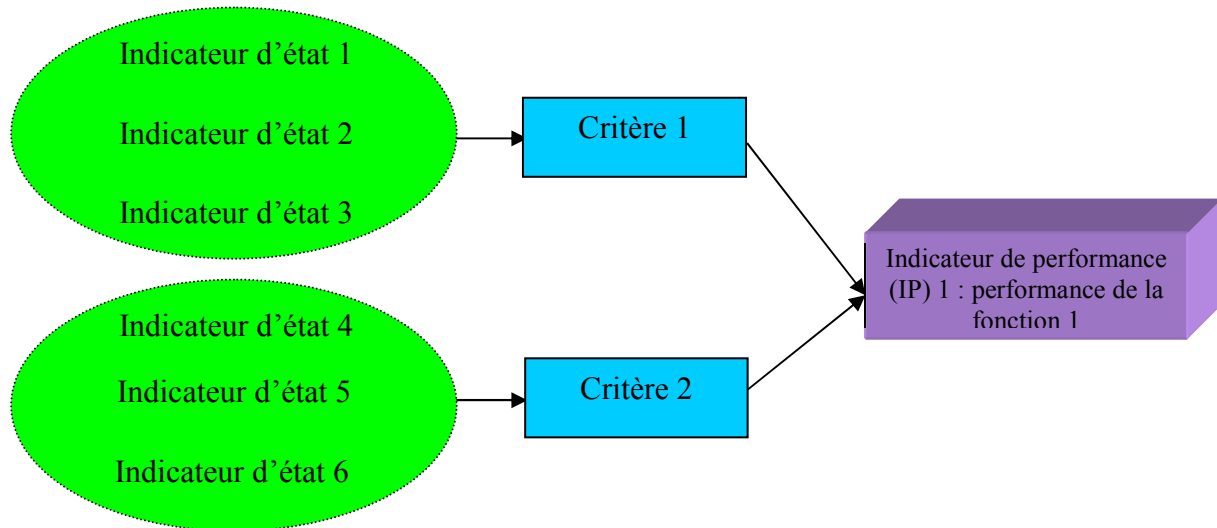


Figure 8.4. Hiérarchisation des trois variables pour l'évaluation de la performance des digues

En synthèse, les indicateurs de performance des digues sont obtenus à partir des critères, eux-mêmes obtenus à partir des indicateurs d'état. Les indicateurs d'état et les critères ont été déterminés par l'AMDE ; les indicateurs de performance sont issus de l'analyse fonctionnelle.

Ces différentes variables (indicateurs d'état, puis critères, puis indicateurs de performance) vont être évalués par les experts des digues d'une manière différente selon chaque scénario de rupture examiné. Les indicateurs d'état, agrégés dans des critères, permettront d'obtenir les indicateurs de performance, c'est à dire le niveau de performance d'une fonction précise d'un composant de la digue. Nous présentons la construction des indicateurs d'état et des critères d'un scénario particulier : l'érosion interne des digue à étanchéité mont..

8.3.2. Construction des indicateurs d'état et des critères pour les digues : application au mécanisme d'érosion interne

La construction des indicateurs de performance des digues étant propre à chaque mécanisme, nous la présentons sur le mécanisme particulier de l'érosion interne des digues à étanchéité amont (Fig. 7.2.).

Le scénario représenté à travers le modèle fonctionnel est synthétisé par un arbre de défaillance (Fig. 7.4). Il comporte treize critères évalués à partir de différents indicateurs d'état provenant de l'AMDE et trois fonctions :

- « le revêtement de protection côté fleuve résiste aux sollicitations mécaniques » ;
- « la recharge amont étanche limite les flux hydrauliques » ;
- « le corps de digue résiste à l'érosion interne ».

Pour chacune de ces fonctions, nous recherchons les indicateurs d'état et les critères dont nous avons besoin pour évaluer la performance des digues par rapport à l'érosion interne. En terme de résultats, nous obtenons treize critères et trente six indicateurs d'état (Tab. 8.5.) :

fonctions	critères	indicateurs d'état
le revêtement de protection côté fleuve résiste aux sollicitations mécaniques	végétation	taille densité
	hydrogéomorphologie	largeur ségonnal évolution
	composition du revêtement de protection côté fleuve	résistance érosion
la recharge amont étanche limite les flux hydrauliques	trous d'animaux fouisseurs dans la recharge amont étanche	type étanchéité profondeur
	racines dans la recharge amont étanche	taille cycle de vie densité position/digue
	érosion de la recharge amont étanche	type érosion profondeur/recharge stabilité recharge
	composition de la recharge amont étanche	respect règles art stab vidange rapide perméabilité épaisseur durée crue
	ouvrage traversant dans la recharge amont étanche	respect règles art type état entretien
	trous d'animaux fouisseurs dans le corps de digue	profondeur largeur corps
	racines dans le corps de digue	taille essence cycle de vie densité position/digue
le corps de digue résiste à l'érosion interne	potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digue	<i>résultat de calcul</i>
	composition du corps de digue	conception réalisation
	Ouvrage traversant dans le corps de digue	respect règles art type état entretien
	Eau claire dans le corps de digue	débit position/hauteur digue
	Eau chargée dans le corps de digue	débit
		position/hauteur digue
	Eau chargée dans le corps de digue	position/hauteur digue débit
		position/hauteur digue

Tableau 8.5. Indicateurs d'état et critères du scénario d'érosion interne

Nous évaluons ces variables par un panel d'experts du domaine des digues. Les séances de travail du panel d'experts ont été menées essentiellement sur la base d'interviews structurées. Nous reportons en annexe 7 la méthodologie de recueil de la connaissance experte mise en œuvre ainsi que les différents comptes-rendus des séances de travail.

En préliminaire, nous avons arrêté une échelle de notation des indicateurs d'état et des critères (Tab. 8.6).

score	qualification	code couleur
0	excellent	
1	bon	
2	bon	
3	passable	
4	passable	
5	médiocre	
6	médiocre	
7	mauvais	
8	mauvais	
9	mauvais	
10	inacceptable	

Tableau 8.6. Echelle des scores des indicateurs d'état et des critères

Nous adoptons une échelle discrète de scores comprise entre de 0 à 10 : 0 correspond à la situation idéale et 10 à la situation la plus critique. Cette échelle unique est utilisée pour l'évaluation de tous les indicateurs et critères. Cela permet d'introduire, dès la mesure, une hiérarchie dans les indicateurs et les critères. Ainsi, certains critères pourront être évalués en utilisant toute la plage de l'échelle (0 à 10), alors que d'autres critères seront évalués sur une plage plus restreinte. A titre d'exemple, sous-critère « buissons » (Tab. 8.7) ne pourra atteindre au maximum que le score de 4 car son rôle dans le mécanisme d'érosion interne est limité.

Ensuite, les experts constituent les règles générales applicables à l'ensemble des indicateurs d'état : les notes 0 et 10 sont fixées, ainsi que les jalons intermédiaires. Pour chacun d'entre eux, nous fixons les règles d'évaluation faisant correspondre aux différents indicateurs d'état des scores dépendant des observations (ou des mesures d'auscultation, des calculs) relevées sur les digues, allant de la condition d'excellence à la condition inacceptable.

Enfin, le groupe d'experts propose une règle d'agrégation des indicateurs d'état pour obtenir une évaluation des critères. Chacun d'entre eux est évalué selon la même échelle que celle utilisée par les indicateurs d'état et présentée au tableau 8.6.

Pour illustrer cette démarche, nous traitons le cas de l'évaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche », qui intervient dans la séquence de défaillance de la fonction d'étanchéité de la recharge amont (Fig. 7.2).

La règle générale proposée par les experts indique que la végétation examinée pour ce critère est celle située sur la digue (talus côté fleuve et crête) et à ses abords (sur une emprise de 2 mètres de part et d'autre de la recharge amont). Pour permettre une plus grande précision dans l'évaluation de ce critère, nous l'évaluons à partir de trois sous-critères relatifs à la taille des arbres : « grands arbres », « petits arbres » et « buissons » (Tab. 8.7).

Chacun de ces sous-critères est renseigné à partir de trois indicateurs : végétation en contact avec le dispositif d'étanchéité (« contact étanchéité »), végétation hors dispositif d'étanchéité (« hors étanchéité ») et « pas de végétation » (Tab. 8.7).

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				
	pas végétation	X										

Tableau 8.7. Scores possibles des indicateurs relatifs au critère « racines dans la recharge amont étanche »

La condition d'excellence (score 0) est obtenue si aucun arbre ou buisson ne se situe sur la digue ou à proximité (sur une emprise de 2 mètres de la digue). La condition inacceptable (score 10) est atteinte dès qu'un seul grand arbre mort est observé au contact de la recharge amont étanche ou à proximité (à moins de 2 mètres de la recharge). Les règles d'affectation de scores sont précisées en détail (Fig. 8.5) :

- le score vaut 9 si un grand arbre (taille) vivant et penché (cycle de vie) est observé côté fleuve (position) ou un ensemble de petits arbres (densité) morts (cycle de vie) côté fleuve (position) ;
- le score vaut 8 si un grand arbre (taille) vivant et droit (cycle de vie) est observé côté fleuve (position) ou un ensemble (densité) de petits arbres (taille) vivants (cycle de vie) côté fleuve (position) ou des petits arbres (taille) morts (cycle de vie) et épars (densité) côté fleuve (position) ;
- le score vaut 7 en présence de petits arbres (taille) sont épars (densité) côté fleuve (position)...

Conditions excellentes :	
0	aucun arbre ou buisson sur la digue ou à moins de 2 mètres
Conditions inacceptables :	
10	grand arbre mort en contact de la recharge amont étanche ou à moins de 2 mètres de la recharge amont étanche
Règles d'évaluation des indicateurs :	
GRANDS ARBRES : (garde digue)	
<i>Côté fleuve et crête en contact avec le dispositif d'étanchéité :</i>	
10	si l'arbre est mort
9	si l'arbre est vivant et penché
8	si l'arbre est vivant et droit
<i>Côté fleuve hors dispositif d'étanchéité :</i>	
6	Une large plage de score est laissée à l'appréciation de l'expert du fait des recherches en cours sur la végétation.
5	
4	
3	
PETITS ARBRES : (garde digue)	
<i>Côté fleuve et crête en contact avec le dispositif d'étanchéité :</i>	
9	si les arbres sont morts et denses (difficilement pénétrable)
8	si les arbres sont vivants et denses (difficilement pénétrable) ou morts et épars (facilement pénétrable)
7	si les arbres sont épars
<i>Côté fleuve hors dispositif d'étanchéité :</i>	
4	cette plage de score est laissée à l'appréciation de l'expert du fait des recherches en cours sur la végétation.
3	
BUISSONS : (garde digue)	
<i>Côté fleuve et crête en contact avec le dispositif d'étanchéité :</i>	
4	cette plage de score est laissée à l'appréciation de l'expert du fait des recherches en cours sur la végétation.
3	
<i>Côté fleuve hors dispositif d'étanchéité :</i>	
3	les buissons gênent l'inspection
2	bosquets diffus

Figure 8.5. Règles d'affectation des scores des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche »

L'agrégation des trois sous-critères pour l'évaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche » est obtenue en adoptant le score le plus défavorable (opérateur MAX). En effet, les experts ont considéré que cet opérateur est le plus représentatif de la réalité : le mauvais score d'un seul des sous-critères suffit à rendre la digue suffisamment sensible au mécanisme de rupture étudié. Ainsi, que plusieurs critères ou seulement l'un d'eux soient mauvais, la fragilité de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne est la

même. L'ensemble des règles d'évaluation des indicateurs d'état du mécanisme d'érosion interne dans le corps de digue est détaillée en annexe 7.

Cet exemple présente certains indicateurs d'état et critères que nous utilisons pour évaluer la performance d'une digue à étanchéité amont vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Une échelle de scores, variant de 0 à 10, commune aux indicateurs d'état et critères, est fixée par les experts du domaine des digues. Les experts déterminent ensuite les règles d'évaluation des indicateurs d'état (seuils et scores) et proposent des règles d'agrégation des indicateurs d'état pour évaluer chaque critère.

8.4. Synthèse

Après avoir énoncé les principes généraux de construction des indicateurs de performance et présenté des exemples dans le domaine des ouvrages de génie civil à grand linéaire, nous avons bâti un système d'indicateurs d'état et de critères pour évaluer la performance des digues.

Les indicateurs d'état utilisés sont déterminés à partir de l'AMDE lors de la construction des scénarios de rupture. Ils sont évalués par les experts du domaine des digues pour chaque scénario de rupture avec une échelle commune de notation allant de 0 à 10.

A partir des scores de chaque indicateur d'état, l'évaluation des critères est obtenue par l'application de l'opérateur MAX appliqué au score des indicateurs d'état sur la même échelle de notation. Il a été parfois nécessaire de faire appel à des sous-critères pour obtenir une évaluation plus précise.

Par la suite, nous aurons besoin d'évaluer la performance de la digue vis-à-vis d'un mécanisme de rupture. Évaluer cette performance revient à construire les indicateurs de performance par agrégation des critères. Dans le chapitre suivant, nous présentons les méthodes permettant l'analyse multicritère et proposons l'utilisation d'une d'entre elles pour l'évaluation de la performance des digues.

Chapitre 9 : L'analyse multicritère pour l'évaluation de la performance des digues

Ce chapitre présente les différentes méthodes multicritères permettant, à partir d'un raisonnement fondé sur plusieurs critères, de proposer des solutions pour obtenir une valeur globale agrégée unique. Nous proposons ensuite d'utiliser une méthode multicritère particulière - la méthode d'affectation à base de règles - pour évaluer la performance des digues vis-à-vis d'un mécanisme à partir d'un *indicateur de performance* unique de synthèse. Nous l'appliquons au mécanisme de l'érosion interne.

Notre étude bibliographique s'appuie essentiellement sur trois références : (Vincke, 1989), (Roy *et al.*, 1993) et (Azibi, 2003).

9.1. Les différentes méthodes multicritères

9.1.1. Contexte de l'aide à la décision multicritère

On définit *l'aide à la décision* de la façon suivante : « *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 ces intervenants se trouvent placés d'autre part* » (Roy *et al.*, 1993).

Il existe des méthodes spécifiques pour fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue doivent être pris en compte : les *méthodes multicritères d'aide à la décision* (Roy *et al.*, 1993), (Vincke, 1989). Ces méthodes ne fournissent pas une solution objectivement meilleure, cette solution n'existant pas, et le mot « aide » prend alors tout son sens. Résoudre un problème multicritère consiste donc à aider le décideur à maîtriser les données de son problème et à progresser vers une solution (Vincke, 1989).

L'aide à la décision multicritère connaît un fort développement depuis 20 ans dans des domaines très divers tels que l'économie, la gestion, l'environnement, le choix de sites... mais aussi en génie civil, et plus particulièrement, dans le domaine des réseaux d'eau pluviale (Azzout, 1996), d'eau potable (Le Gauffre *et al.*, 2004b, 2004c) et d'assainissement (Diab, 2001, 2002, 1999) et (Le Gauffre *et al.*, 2004a, 2002).

Il existe différentes méthodes multicritères utilisables selon chaque problématique de décision. Elles sont classées dans trois grandes familles :

- les méthodes issues de la *théorie de l'utilité multiattribut* : elles sont d'inspiration américaine et consistent à agréger les différents points de vue en une fonction unique qu'il s'agit ensuite d'optimiser. On étudie les conditions mathématiques d'agrégation, les formes particulières de la fonction agrégeante et les méthodes de construction ;
- les *méthodes de surclassement* : d'inspiration française, elles visent à construire une relation de surclassement représentant les préférences du décideur et à exploiter cette relation pour l'aider à résoudre son problème ;
- les *méthodes interactives* : elles alternent des étapes de calcul et des étapes de dialogue. Elles sont le plus souvent développées dans le contexte de la programmation mathématique à objectifs multiples.

9.1.2. Actions, familles de critères et problème multicritère

Le choix de la méthode multicritère dépend de la définition des *actions*, de la *famille de critères* et du *problème multicritère*. (Vincke, 1989)

9.1.2.1. Les actions

La première étape pour résoudre un problème de décision consiste à déterminer les *actions* qu'on souhaite analyser. L'ensemble des *actions*, noté A , est « *l'ensemble des objets, décisions, candidats... qu'on va explorer dans le processus de décision* » (Vincke, 1989).

Dans notre recherche, l'ensemble des actions A correspond aux tronçons de digues.

Un ensemble d'action peut être défini :

- en extension, par énumération de ses éléments lorsqu'il est fini et suffisamment restreint ;
- en compréhension, par une propriété caractéristique ou par des contraintes mathématiques dans le cas contraire.

Il n'est pas rare que l'ensemble des actions A soit redéfini en cours de procédure d'aide à la décision. Ainsi, l'ensemble A peut être :

- stable : défini a priori et non susceptible d'évoluer ;
- évolutif : modifié en cours de procédure (environnement naturel changeant).

On distingue aussi les ensembles d'actions A :

- globalisés : chaque élément de A est exclusif de tout autre ;
- fragmenté : combinaison de plusieurs éléments de A .

Dans notre recherche, l'ensemble d'actions A (les tronçons de digue) est en extension (on peut énumérer les tronçons de digues), évolutif (les tronçons de digues subissent des dégradations au cours du temps) et globalisé (les tronçons sont indépendants entre eux).

9.1.2.2. Famille de critères

Plusieurs familles de critères sont considérées (Roy *et al.*, 1993) :

- le *vrai critère*, que l'on trouve dans le cas d'une structure de préférence de préordre total où les décideurs sont toujours capables de comparer toutes les actions entre elles ;
- le *quasi critère* dans le cas d'un modèle à seuil où la structure de préférence sous-jacente est une structure de quasi-ordre, c'est à dire où le décideur a la possibilité de ne pas se prononcer sur la comparaison d'actions.

Il existe d'autres familles de critères, comme les critères d'intervalle ou les pseudo-critères. La famille de critère dépend de la structure de préférence sous-jacente. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur vers (Roy *et al.*, 1993).

On note généralement les critères : $g_1, g_2, \dots, g_n$, et l'évaluation d'une action (a) selon le critère (j) : $g_j(a)$. Une famille de critères $F = \{g_1 ; \dots ; g_2 ; \dots ; g_n\}$ doit permettre de représenter toutes les facettes du problème multicritère tout en évitant les redondances. On parle alors de famille cohérente de critères.

Dans notre recherche, les critères sont définis lors de la construction des scénarios de rupture des digues et apparaissent dans les arbres de défaillances. Cette famille de critères est cohérente et sa typologie (vrai critère, quasi critère, etc.) dépendra de la méthode que nous retiendrons.

9.1.2.3. Problème multicritère

Un problème (de décision) multicritère est une situation où, ayant défini un ensemble A d'actions et une famille cohérente F de critères sur A, on souhaite :

- soit déterminer un sous-ensemble d'actions considérées comme les meilleures vis-à-vis de F (problème de choix) ;
- soit partitionner A en sous-ensembles suivant des normes préétablies (problème de tri) ;
- soit ranger les actions de A de la meilleure à la moins bonne (problème de rangement) (Roy et al., 1993), (Vincke, 1989).

Dans notre cas, nous souhaitons affecter les tronçons de digues dans des classes prédéfinies (excellent, bon, passable, médiocre, mauvais, inacceptable) : nous sommes donc confrontés à un problème de tri (Fig. 9.1.)

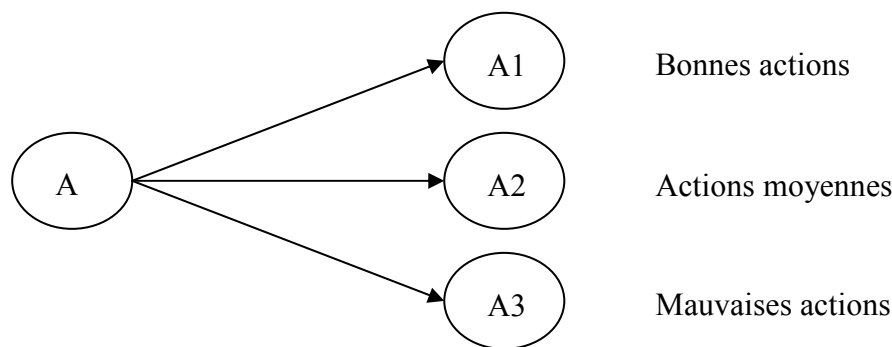


Figure 9.1. Problème de tri (Laaribi, 2000)

9.1.3. Les méthodes issues de la théorie de l'utilité multiattribut

Cette théorie est utilisable dans le cas de vrais critères (cf. 9.1.1), c'est à dire lorsque le décideur est capable de comparer toutes ses actions sans qu'il exprime d'indifférences entre certaines d'entre elles (modèle de préférence traditionnel). Cette théorie repose sur l'axiome fondamental suivant : tout décideur essaye de maximiser une fonction,

$$U=U(g_1, g_2, \dots, g_n),$$

qui agrège tous les points de vue. Autrement dit, si on interroge le décideur sur ses préférences, ses réponses seront en accord avec une certaine fonction U qu'on ne connaît pas. Le rôle du scientifique est d'essayer d'estimer cette fonction.

Deux problèmes se posent alors :

- quelles propriétés doivent posséder les préférences du décideur pour être représentables par une fonction U ayant une forme analytique donnée (additive, multiplicative, mixte...) ?
- comment construire les fonctions et estimer les paramètres intervenant dans la forme analytique choisie ?

La forme additive de la fonction U est la plus utilisée :

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

où les fonctions U_j sont strictement croissantes et à valeurs réelles. Ces fonctions simples servent uniquement à transformer les critères initiaux de manière à ce qu'ils s'expriment tous suivant la même échelle : on évite ainsi les problèmes d'unités et la somme est une opération qui a un sens.

Sur ces bases, il existe plusieurs méthodes issues de la théorie multiattribut.

La **méthode de la moyenne pondérée** adopte une forme additive simple de la fonction U . Elle est basée sur les relations suivantes :

- aPb (a préféré à b) si et seulement si $\sum_{j=1}^n p_j g_j(a) > \sum_{j=1}^n p_j g_j(b)$,
- aIb (a indifférent de b) si et seulement si $\sum_{j=1}^n p_j g_j(a) = \sum_{j=1}^n p_j g_j(b)$

Elle suppose qu'on peut exprimer tous les critères dans les mêmes unités et que les écarts de valeurs sur des critères différents sont comparables et peuvent se compenser. La structure de préférence obtenue par cette méthode est une structure de préordre total, pour autant que les évaluations des critères (g_j) soient de vrais critères. La moyenne pondérée est recommandée quand les critères représentent les différentes facettes d'une même caractéristique globale, exprimée dans les mêmes unités.

Dans notre recherche, ces conditions apparaissent vérifiées : les critères définis pour les digues représentent les différentes facettes du problème multicritère (le tri des tronçons) et les critères sont exprimés avec la même échelle de notation (Tab. 8.7).

La *méthode multiplicative* est utilisée lorsque certaines conditions ne sont pas réunies pour pouvoir utiliser le modèle additif précédent. Nous ne la développerons pas plus ici et nous renvoyons le lecteur vers (Roy *et al.*, 1993) et (Vincke, 1989).

Pour notre étude, nous cherchons à obtenir un critère unique de synthèse représentatif de la performance de chaque tronçon de digue. La théorie de l'utilité multiattribut permet de construire ce critère unique de synthèse. C'est pourquoi nous proposons de tester l'utilisation d'un modèle additif particulier qui semble bien adapté à notre contexte : la méthode de la moyenne pondérée.

9.1.4. Les méthodes de surclassement

Les méthodes de surclassement se sont développées sur les bases des constats suivants :

- la richesse des résultats obtenus par la théorie de l'utilité multiattribut est due aux hypothèses fortes de la théorie (existence de la fonction U, additivité...) et aux nombreuses informations supplémentaires demandées au décideur (intensité de préférence, taux de substitution...);
- dans le cadre de l'aide à la décision, il n'est pas toujours nécessaire d'aller aussi loin. L'idée de base est qu'il vaut mieux se contenter d'un résultat moins riche que celui fourni par la théorie de l'utilité multiattribut, en évitant l'introduction d'hypothèses mathématiques trop fortes et la nécessité de poser au décideur des questions trop difficiles ;
- la relation de dominance est trop pauvre pour être utile.

Les méthodes de surclassement se positionnent donc comme un compromis entre la théorie de l'utilité multiattribut trop riche et la relation de dominance trop pauvre. Nous présentons succinctement les principes et les différentes méthodes de surclassement.

Le concept de base de ces méthodes repose sur la *relation de surclassement*. Elle consiste en « une relation binaire S définie dans A telle que aSb (a surclasse 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 raisons importantes de refuser cette affirmation » (Roy *et al.*, 1993).

Les méthodes de surclassement comportent deux étapes :

- la construction de la relation de surclassement ;
- son exploitation en vue de la problématique choisie.

Les méthodes de surclassement les plus connues sont les méthodes ELECTRE (ELECTRE 1, ELECTRE 2, ELECTRE 3...). Chacune de ces méthodes apporte des solutions adaptées selon la problématique de décision (Roy *et al.*, 1993).

Parmi celles-ci, seule la méthode ELECTRE TRI permet de répondre à une problématique de tri, susceptible d'intéresser notre recherche. Partant d'un ensemble fini d'actions évaluées sur une famille de critères quantitatifs et/ou qualitatifs et d'un ensemble de catégories correspondant à des recommandations prédéfinies (bon, moins bon, ..., mauvais, très mauvais), ELECTRE TRI fournit aux utilisateurs deux procédures différentes qui permettent d'affecter toutes les actions à ces catégories. Contrairement au principe de la somme pondérée, les deux procédures proposées dans la méthode ELECTRE TRI refusent la possibilité de compensation totale entre les performances de l'action selon les différents critères. L'affectation d'une action quelconque est fondée sur la comparaison de l'action et les actions de référence (b^1 et b^2 sur la figure 9.2) au moyen de la relation de surclassement. Ces deux procédures diffèrent par leur comportement (pessimiste ou optimiste) vis-à-vis de certaines actions incomparables avec des actions de référence (Vincke, 1989) (Fig. 9.2).

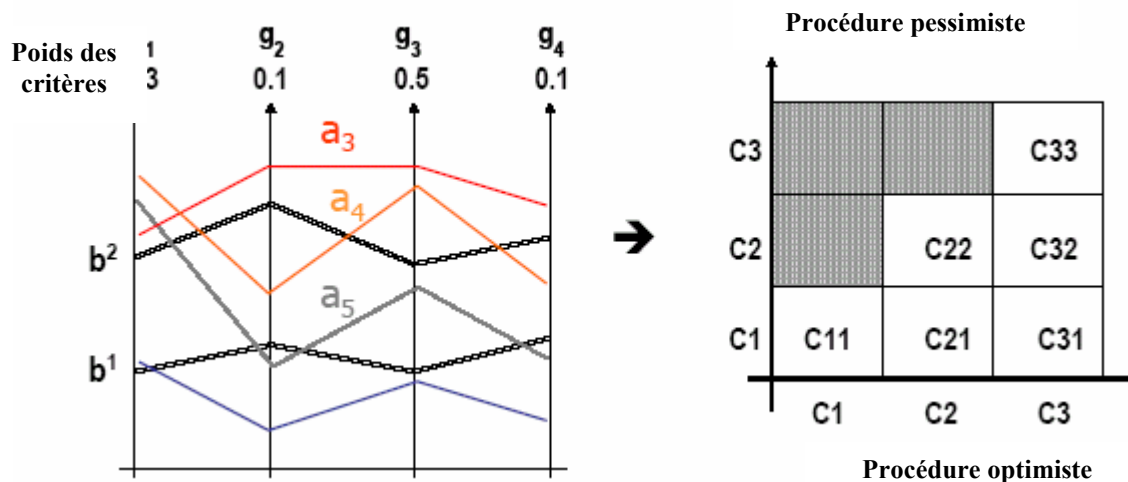


Figure 9.2. Exemple de détermination de catégories dans lesquelles vont être affectées les actions avec la méthode ELECTRE TRI (Le Gauffre et al., 2004c)

Pour l'étude des digues, la méthode de surclassement ELECTRE TRI répond à notre problématique de décision. Toutefois, elle ne permet pas la construction d'un critère unique de synthèse et ne sera donc pas utilisée.

9.1.5. Les méthodes interactives

Les méthodes interactives consistent en une alternance d'étapes de calculs et d'étapes de dialogue avec le décideur. La première étape de calculs fournit une première solution. Celle-ci est présentée au décideur qui réagit en apportant des informations supplémentaires sur ses préférences (étape de dialogue). Cette information est injectée dans le modèle multicritère et permet de construire une nouvelle solution.

Pour que la méthode soit interactive, il est nécessaire que le dialogue soit l'un des outils principaux d'investigation, c'est à dire que le décideur contribue directement à la construction de la solution en intervenant dans la méthode et pas seulement dans la définition du problème.

Ces méthodes représentent un intérêt particulier pour notre recherche puisqu'une grande part de la connaissance relative aux digues est détenue par les experts du domaine. Elles sont susceptibles d'exploiter au mieux la connaissance experte pour aboutir à une évaluation cohérente de la performance des digues.

9.1.5.1. La méthode d'affectation à base de règles

Parmi ces méthodes, *la méthode d'affectation à base de règles* représente une solution intéressante et nous la présentons en détail. Elle a été développée dans le cadre d'une

recherche dans le domaine de l'aide à la décision et porte sur la construction d'un critère de synthèse agrégeant des critères qualitatifs, destiné à palier les limites des méthodes issues de la théorie de l'utilité multiattribut (Azibi, 2003). Cette référence est utilisée ci-après pour la présentation de cette méthode.

La méthode d'affectation à base de règles repose sur l'utilisation de règles d'agrégation de type « si...alors ... » ; la partie « condition » (si) concerne les évaluations de l'action sur un ensemble de critères et la partie « conclusion » (alors) indique l'évaluation globale agrégée. Cette méthode permet de respecter le caractère qualitatif des critères et une démarche itérative est mise en œuvre pour la construction d'une base de règles. Elle vise à enrichir et affiner progressivement la base de règles en vue d'aboutir à un modèle d'affectation cohérent.

Le formalisme de représentation par règles est très ouvert. Il permet de construire aisément une agrégation correspondant aux préférences du décideur, les règles et les principes d'agrégation étant très proches du langage naturel.

On a recours à cette méthode pour représenter des logiques d'agrégation complexes ou multiples difficilement modélisables par les opérateurs analytiques classiques. A titre d'exemple, la méthode d'agrégation à base de règles est pertinente pour modéliser une agrégation traduisant des logiques différentes selon les valeurs prises sur les critères, ou pour une compensation uniquement entre certains échelons, ou encore pour faire jouer des effets d'absorption ou de synergie entre les critères. Les mécanismes d'agrégation par règles permettent alors des démarches de modélisation plus fines et présentent un pouvoir d'expression effective supérieure à celui d'une méthode analytique (multiattribut), ce qui constitue un atout certain en aide à la décision, évitant les effets « boîte noire ».

L'élaboration de ces règles, en concertation avec le décideur ou à partir d'exemple, peut apparaître parfois laborieuse. Il existe deux solutions pour produire des règles d'affectation :

- la première solution consiste à « interagir » avec les experts ou un décideur : l'objectif est d'aider l'expert à exprimer de l'information qui sera utilisée pour construire des règles d'affectation ;
- la deuxième solution consiste à produire des règles à partir d'exemples : l'objectif est d'utiliser des exemples d'affectation afin de générer des règles en s'appuyant sur un processus de généralisation.

9.1.5.2. Intérêt de la méthode d'affectation à base de règles pour les digues

L'affectation à base de règles répond à la problématique du tri, où l'on vise à affecter les tronçons de digues dans des classes prédéterminées. A cet égard, les intérêts de cette méthode sont nombreux :

- les préférences des décideurs ou des experts peuvent être modélisées de manière très fine ;
- il n'est pas nécessaire d'affecter un poids aux critères puisque leur importance relative peut être prise en compte dans la règle. Cet aspect est primordial car les experts perçoivent ces importances relatives mais ont parfois du mal à leur affecter des pondérations ;
- les synergies entre critères ou, au contraire, les compensations peuvent être prises en compte ;
- les règles permettent une infinité de possibilités d'agrégation au plus proche de la connaissance des experts ;
- enfin, cette méthode permet une grande transparence dans l'agrégation des critères, ce qui est important pour l'appropriation par les gestionnaires de digues de l'outil d'aide à la décision.

Manifestement, cette méthode apparaît adaptée à notre problème de décision.

9.1.6. Synthèse

La recherche bibliographique permet de formaliser notre problème multicritère : nous souhaitons trier les tronçons de digues selon leur performance vis-à-vis des mécanismes de rupture. Deux méthodes d'analyse multicritère sont susceptibles de répondre à notre besoin :

- la méthode multiattribut élémentaire de forme additive : la moyenne pondérée ;
- la méthode interactive d'affectation à base de règles, permettant en outre la possibilité de mettre en place un dialogue avec les experts des digues.

A priori, il n'existe pas une bonne méthode et des mauvaises méthodes pour un problème de décision (Vincke, 1989). Nous allons donc mettre en œuvre ces deux méthodes et retenir la plus adaptée à notre recherche.

9.2. Analyse multicritère appliquée aux digues

Dans cette partie, nous utilisons deux méthodes multicritères (la moyenne pondérée et l'affectation à base de règles) pour le mécanisme d'érosion interne des digues à étanchéité amont. Nous appuyons notre démarche sur l'arbre de défaillance correspondant à ce mécanisme de rupture et issu de notre modèle de représentation des scénarios des digues (Fig. 9.3). Notre objectif est de parvenir ici à déterminer une méthode multicritère d'aide à la décision convenable pour trier les tronçons des digues.

Avec l'analyse experte des indicateurs d'état, nous sommes parvenus à évaluer le score des 13 critères de l'arbre de défaillance correspondant à l'érosion interne (Fig. 9.3). Nous cherchons ici à agréger ces critères pour obtenir un indicateur de performance de la digue vis-à-vis de ce mécanisme de rupture. La contrainte forte de la démarche réside dans le fait que le score global doit être le plus représentatif possible du fonctionnement des digues.

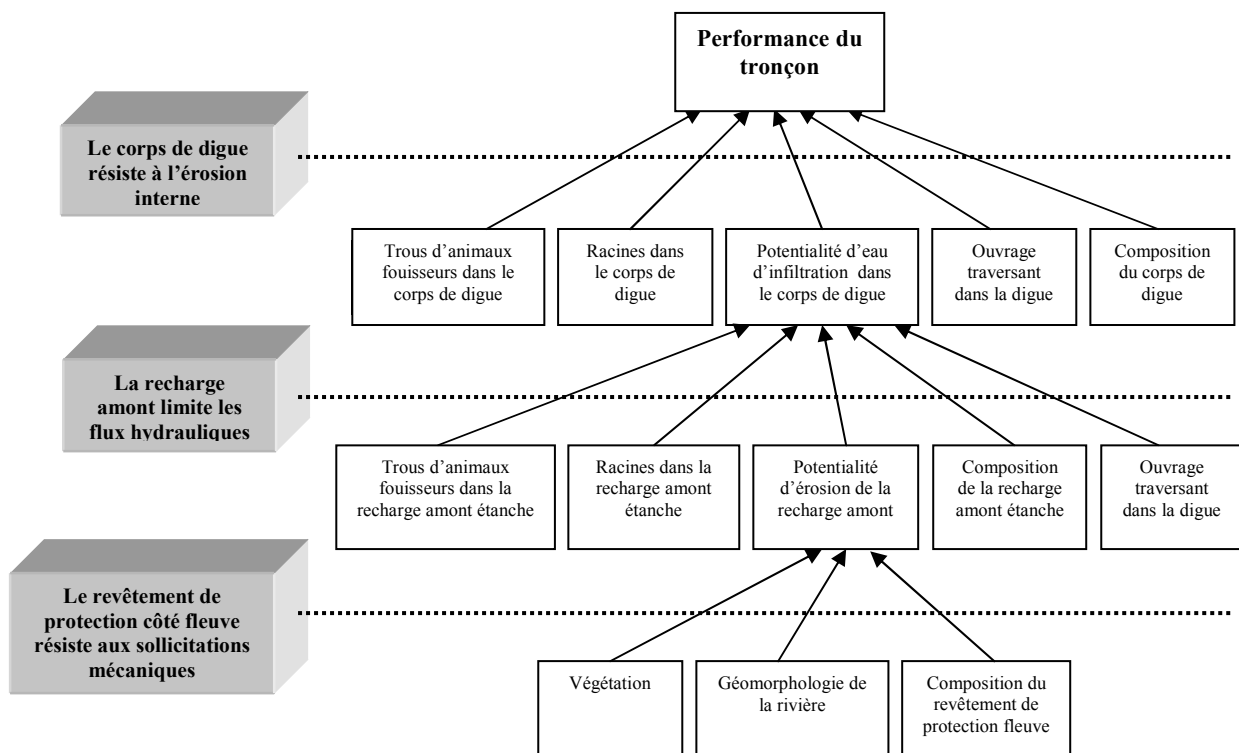


Figure 9.3. Arbre de défaillance par érosion interne de la digue à recharge amont étanche

9.2.1. Test d'une méthode élémentaire : la moyenne pondérée

Tout d'abord, nous avons appliqué la méthode de la moyenne simple aux digues. Ce travail a mis en évidence des limites fortes que nous énonçons ci-après.

La première limite mise en évidence par l'application est le lissage important de l'information traitée par la moyenne non pondérée. L'exemple présenté au tableau 9.1 montre que, pour deux tronçons de digue (a) et (b) dont les scores des critères étaient très différents, la moyenne calculée pour chaque tronçon conduit à la même performance. Pourtant, le tronçon (b) est moins performant que le tronçon (a) du fait du score obtenu sur le critère « potentialité infiltration ».

critères	tronçon (a)	tronçon (b)
Racine	7	4
Terrier	7	4
Composition	2	4
Potentialité d'infiltration	0	4
Ouvrage Traversant	4	4
Moyenne	4	4

Tableau 9.1. Lissage intrinsèque à l'utilisation de la moyenne

Cet inconvénient est constaté de façon analogue en utilisant des opérateurs destinés à mesurer la dispersion entre les critères, tels que l'écart-type (Tab. 9.2) :

critères	tronçon (a)	tronçon (b)
Racine	7	2
Terrier	2	7
Composition	2	7
Infiltration	7	2
Potentialité d'infiltration	7	7
Moyenne	5	5
Ecart-type	2,7	2,7

Tableau 9.2. Moyenne et écart-type identiques pour deux tronçons très différents

Même si cette méthode de la moyenne non pondérée fournit une première appréciation de la performance de la digue, elle n'est pas satisfaisante car elle ne permet pas de refléter la performance de la digue.

Nous avons ensuite appliqué la méthode de la moyenne pondérée. Une des difficultés de la méthode consiste à déterminer le poids à affecter à un critère en rapport avec la performance vis-à-vis d'un mécanisme que nous cherchons à évaluer.

Nous avons interrogé les experts des digues pour qu'ils affectent une pondération aux 13 critères de l'arbre de défaillance. Le résultat de l'interview ne fût pas exploitable car les experts n'ont, soit pas pu proposer des poids précis pour l'ensemble des critères, soit les

pondérations étaient très hétérogènes entre elles : les experts « sentaient » que des critères étaient plus significatifs que d'autres, mais avaient du mal à quantifier ces différences.

Pour les améliorer les résultats, nous avons proposé aux experts des interviews dirigées à partir de quelques exercices (Tab. 9.3). Ils consistaient, pour plusieurs tronçons de digues reflétant des situations variées et à partir de critères avec des scores imposés, à faire évaluer par les experts un score global de performance.

Tronçon	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
Critères											
Racine	7	2	3	2	7	3	9	2	3	3	4
Terrier	7	7	2	3	3	2	2	4	9	2	4
Composition	2	7	7	2	2	9	3	3	2	1	3
Infiltration	2	3	7	7	2	2	3	1	2	9	4
Ouv. Travers.	3	2	2	7	7	2	3	9	2	4	4
Score performance	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

Tableau 9.3. Exemple d'exercices proposés aux experts

Les résultats obtenus ne furent toujours pas satisfaisant, des différences significatives apparaissant dans les scores globaux proposés par les différents experts (Tab. 9.4). Par ailleurs, il s'est avéré que les experts avaient des difficultés à proposer un score sans connaître les raisons précises du score de chaque critère. Cet aspect n'a pas facilité l'harmonisation de leurs jugements.

Tronçon	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
Critères											
Racine	7	2	3	2	7	3	9	2	3	3	4
Terrier	7	7	2	3	3	2	2	4	9	2	4
Composition	2	7	7	2	2	9	3	3	2	1	3
Infiltration	2	3	7	7	2	2	3	1	2	9	4
Ouv. Travers.	3	2	2	7	7	2	3	9	2	4	4
Score global expert 1	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9	5
Score global expert 2	3	3	10	10	9	2	2	9	2	8	5
Score global expert 3	2	3	7	7	2	2	3	1	2	4	4

Tableau 9.4. Résultats des scores proposés par 3 experts

Cette application a montré qu'il n'a pas pu être possible de dégager des pondérations pour chacun des critères, rendant la méthode de la moyenne pondérée inutilisable dans notre domaine.

9.2.2. L'affectation à base de règles

Nous souhaitons modéliser au mieux les préférences des experts par la méthode d'affectation à base de règles (Azibi, 2003).

Nous avons vu que les experts ont proposé une hiérarchie entre les critères dès la mesure (Tab. 8.7) : le poids d'un critère dans un mécanisme de rupture est pris en compte par le score maximum qu'il peut atteindre. En conséquence, nous cherchons à proposer des règles d'agrégation des critères pour obtenir la performance de la digue, à travers un indicateur de performance unique de synthèse.

Nous détaillons ces règles pour l'exemple du mécanisme d'érosion interne d'une digue à étanchéité amont. L'arbre de défaillance (Fig. 9.3) sert de support au travail des experts et nous l'utilisons pour présenter les règles d'agrégation à chaque étape.

Etape ① : agrégation des critères évaluant la performance de la fonction « *le revêtement de protection côté fleuve résiste aux sollicitations mécaniques* »

Pour cette étape, les experts ont jugé que l'opérateur « Max » était le plus apte à représenter la réalité du fonctionnement de la digue. L'utilisation de cet opérateur simple se justifie pleinement du fait de la prise en compte de l'importance relative du critère dès sa propre évaluation.

L'agrégation de ces trois critères permet d'évaluer, d'une part, la performance de la fonction « *le revêtement de protection côté fleuve résiste aux sollicitations mécaniques* », d'autre part, le critère « *potentialité d'érosion de la recharge amont étanche* » correspondant à la défaillance successive figurant dans l'arbre de défaillance.

Ce dernier critère peut par ailleurs être évalué directement par inspection visuelle, par mesure ou par calcul : on ne parle plus de « *potentialité d'érosion dans la recharge amont étanche* » et le critère devient « *érosion de la recharge amont étanche* ». Dans le cas où les deux modes d'évaluation sont possibles, les règles fixées par les experts privilégient l'évaluation directe du critère.

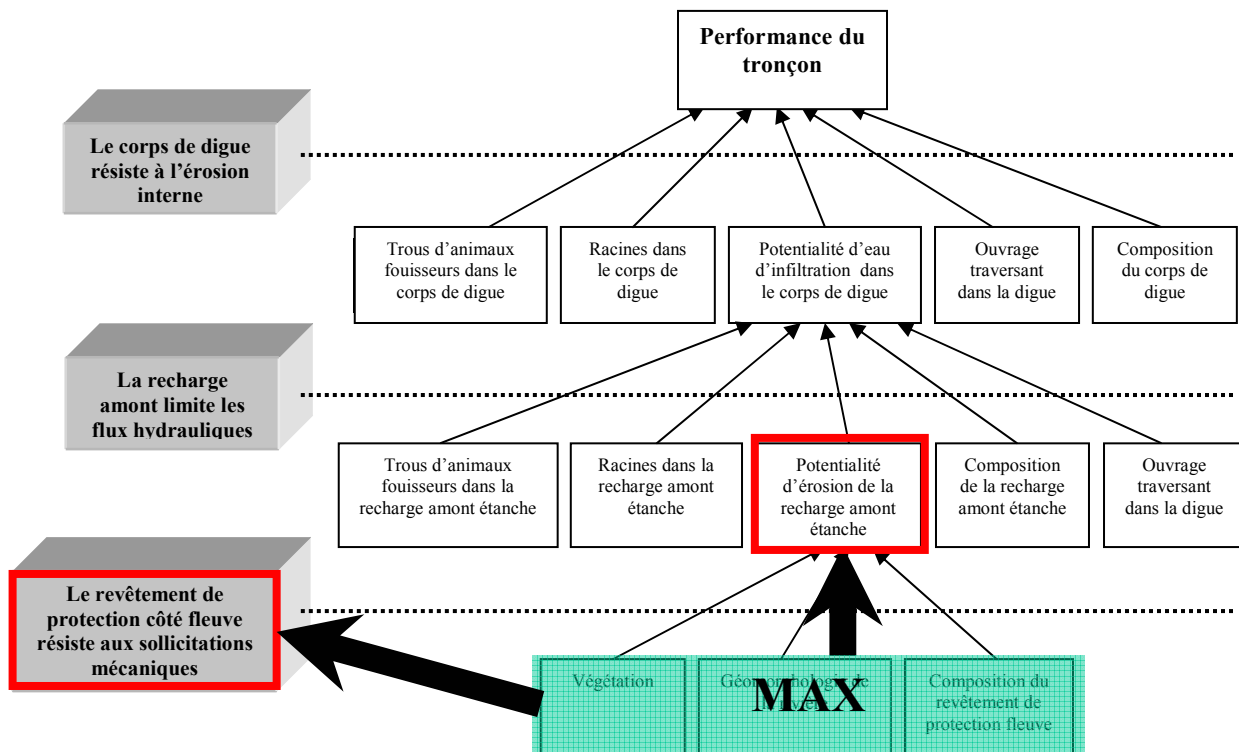


Figure 9.4. Règle d'agrégation des critères relatifs à la fonction du revêtement de la protection côté fleuve

Etape ② : agrégation des critères évaluant la performance de la fonction « *la recharge amont limite les flux hydrauliques* »

Comme pour l'étape 1, les experts ont jugé que l'opérateur « Max » était le plus apte à représenter la réalité du fonctionnement de la digue. L'utilisation de cet opérateur simple se justifie de la même manière.

L'agrégation de ces cinq critères permet d'évaluer, d'une part, la performance de la fonction « *la recharge amont limite les flux hydrauliques* », d'autre part, le critère « *potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digue* » correspondant à la défaillance successive figurant dans l'arbre de défaillance.

Ce dernier critère peut par ailleurs être évalué directement par inspection visuelle en crue, par mesure ou par calcul : on ne parle plus de « *potentialité d' eau d'infiltration dans le corps de digue* » et le critère devient « *eau d'infiltration dans le corps de digue* ». Dans le cas où les deux modes d'évaluation sont possibles, les règles fixées par les experts privilégient l'évaluation directe du critère.

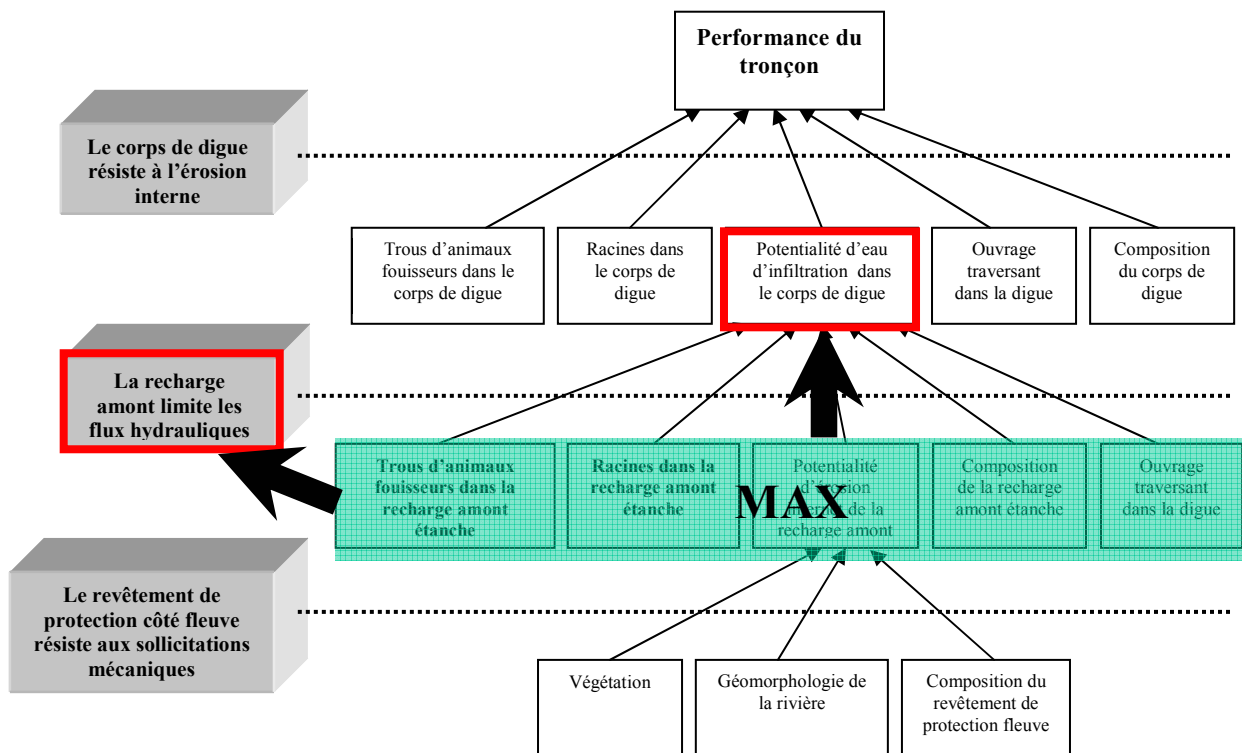


Figure 9.5. Règle d'agrégation des critères relatifs à la fonction de la recharge amont

Etape ③ : agrégation des critères évaluant la performance de la fonction « *le corps de digue résiste à l'érosion interne* »

Lors de cette troisième étape, nous obtenons l'évaluation de performance de la fonction « *le corps de digue résiste à l'érosion interne* », correspondant à la performance de la digue vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Cette étape débouche sur l'évaluation de l'indicateur de performance de la digue.

A partir de l'analyse experte, nous avons déterminé les règles d'agréations des cinq critères, correspondant aux critères impliqués dans la dernière séquence de défaillance de l'arbre (Fig. 9.5) et permettant de renseigner la performance de la digue. Ces règles sont synthétisées sous la forme d'une table de vérité experte (Fig. 9.6), qui comporte deux entrées :

- d'une part, le score maximum des quatre critères suivants :

- « *trous d'animaux fouisseurs dans le corps de digue* »
- « *racines dans le corps de digue* »
- « *ouvrage traversant dans la digue* »
- « *composition du corps de digue* »
- d'autre part, le score du critère « *potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digue* » évalué lors de l'étape 2.

La combinaison de ces deux entrées dans la table de vérité permet d'obtenir l'évaluation de l'indicateur de performance de la digue.

On utilise donc ici une véritable règle d'affectation de type « si... alors ». Par exemple, si le score maximum des quatre critères énumérés ci-dessus vaut 4 et que le score du critère « *potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digue* » vaut 7, l'indicateur de performance de la digue vaut 5 et nous affectons le tronçon de digue dans la classe « médiocre ».

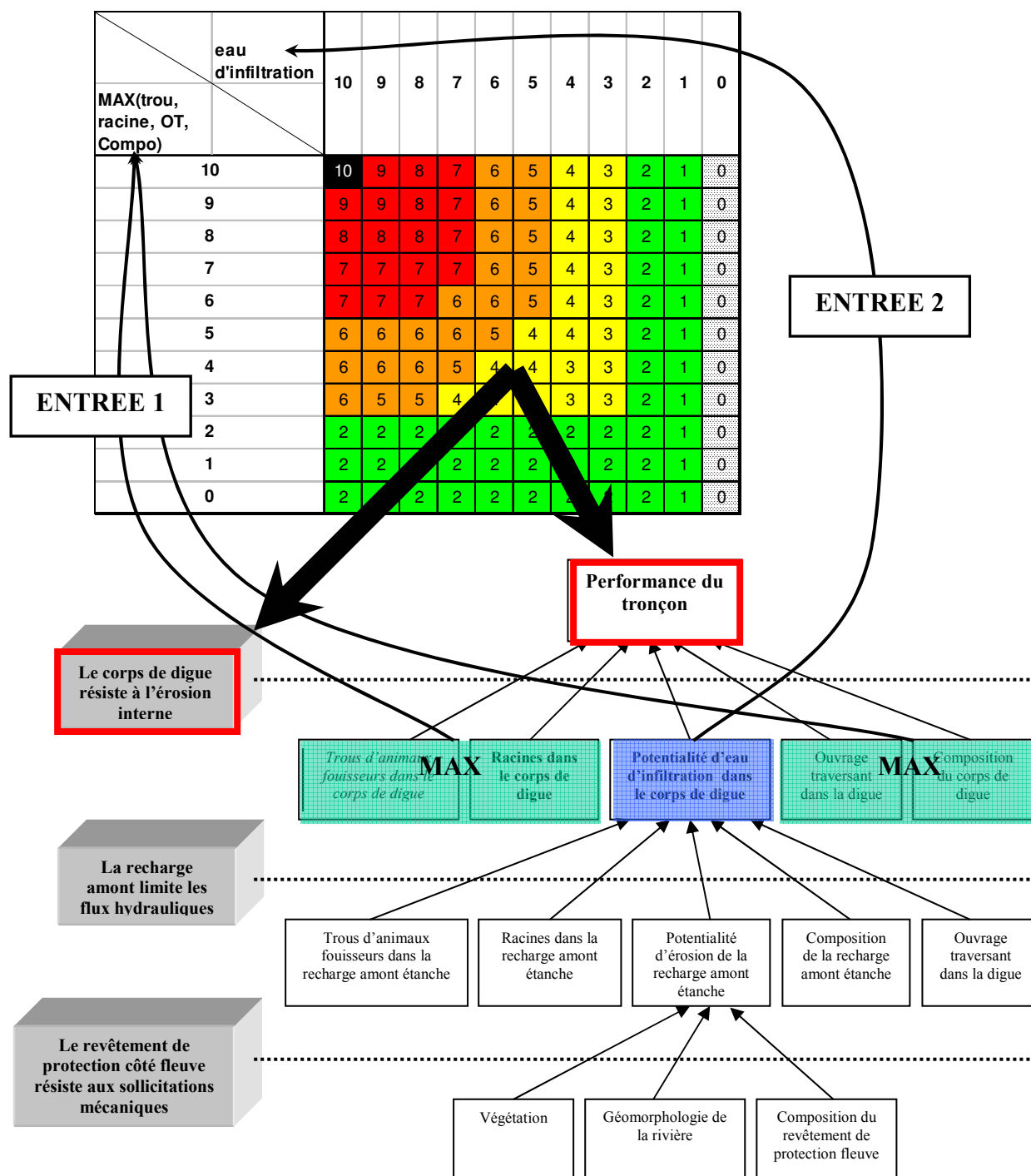


Figure 9.6. Règle d'agrégation des critères pour l'évaluation de l'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne

9.2.3. Automatisation de l'évaluation de la performance des digues

Dans un cadre applicatif, nous avons automatisé toutes les règles d'agrégation des critères dans un module informatique : en renseignant les scores des 13 critères de l'arbre de défaillance, nous obtenons alors directement l'indicateur de performance de la digue (Fig.

9.7). Une liste de choix impose la plage des scores adaptée à chaque critère lors de la saisie. L'objectif est ici de vérifier des règles proposées dans le modèle multicritère.

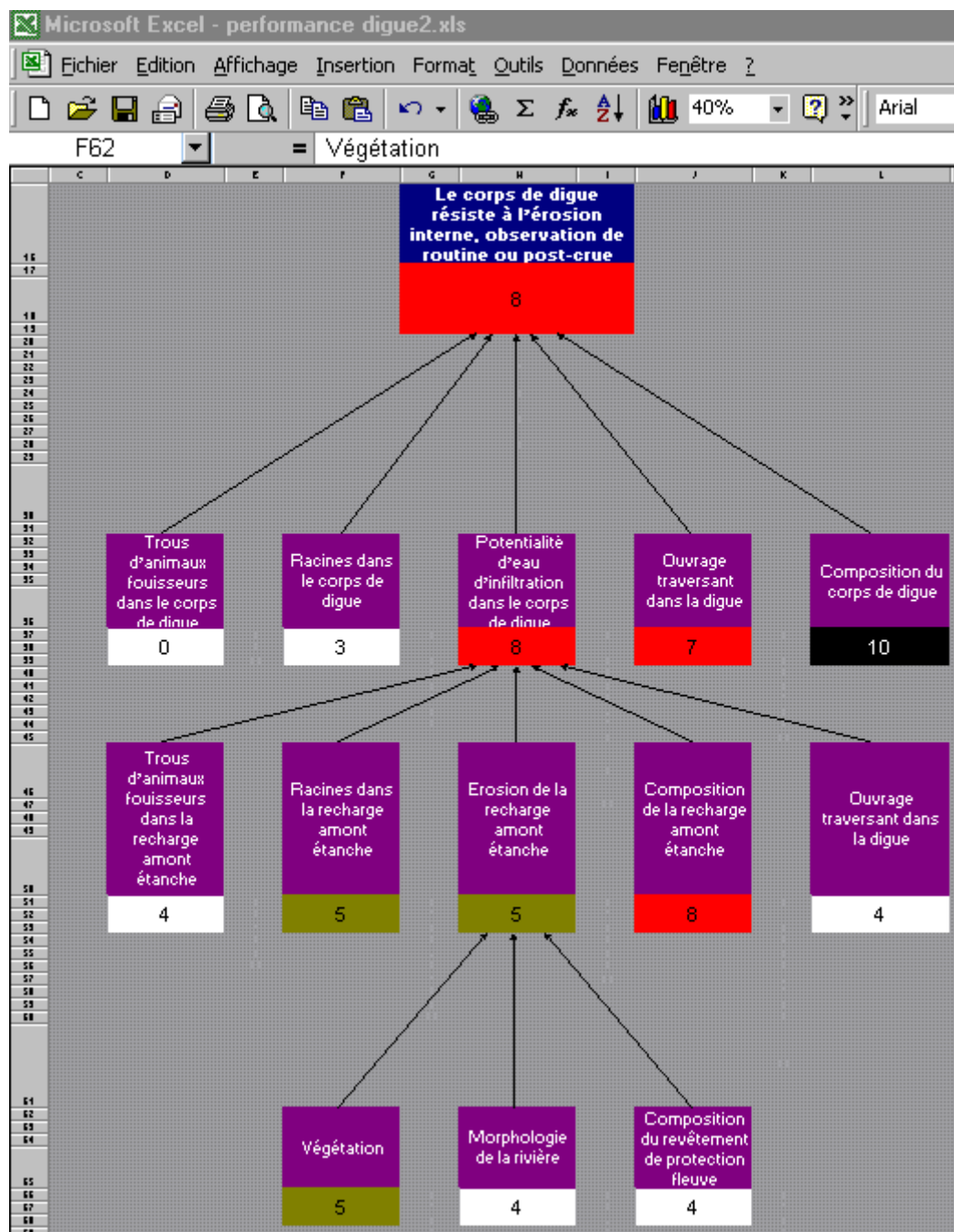


Figure 9.7. Module de calcul automatique de la performance des digues

Ce module, nous permet de dresser l'ensemble des règles d'agrégation des critères permettant d'obtenir l'indicateur de performance de la digue (Tab. 9.5).

Conditions	Critères	Valeurs	Scénario	Performance du tronçon de digue	Affectation dans la classe
si	Végétation	5	Erosion interne d'une digue à étanchéité amont	alors 8	correspondant à « mauvais »
et si	Géomorphologie de la rivière	4			
et si	Composition du revêtement de protection côté fleuve	4			
et si	Trous d'animaux fouisseurs dans la recharge amont étanche	4			
et si	Racines dans la recharge amont étanche	5			
et si	Potentialité d'érosion de la recharge amont étanche	5			
et si	Composition de la recharge amont étanche	8			
et si	Ouvrage traversant dans la digue	4			
et si	Trous d'animaux fouisseurs dans le corps de digue	0			
et si	Racines dans le corps de digue	3			
et si	Potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digue	8			
et si	Ouvrage traversant dans la digue	7			
et si	Composition du corps de digue	10			

Tableau 9.5. Règles d'affectation représentant les résultats du module de calcul

9.3 Synthèse

Nous avons répondu à notre problème de décision par la méthode d'affectation à base de règles. Sa mise en œuvre sur les digues permet d'évaluer, à partir des différents critères, l'indicateur de performance des digues pour chaque mécanisme de rupture.

Le modèle d'analyse multicritère présente l'avantage de prendre en compte au plus près les préférences des experts. Il est donc bien admis par les spécialistes du domaine, car les règles d'affectation ont été établies par leurs soins.

Par ailleurs, la base de règles peut être modifiée, complétée et affinée en permanence et de manière très simple. Cette méthode apparaît donc comme transparente dans la mesure où toutes les règles sont énoncées et accessibles aux décideurs. Dans un cadre applicatif, l'ensemble des règles relative au mécanisme d'érosion interne dans les digues à étanchéité amont est reporté en annexe 7.

Il nous reste donc maintenant à intégrer dans le SIRS Digues les indicateurs de performance pour spatialiser la performance des digues. C'est l'objet de la dernière partie de notre recherche.

* * *

*

Quatrième partie
Intégration du modèle multicritère et du
SIRS Dignes

Chapitre 10 : Des SIG pour la gestion d'ouvrages linéaires

Dans ce chapitre nous définissons les SIG, leurs intérêts et leurs limites. Puis, nous présentons une méthodologie qui permet aux SIG de s'enrichir de fonctions d'analyse spatiale destinées à l'aide à la décision.

10.1. Définitions, intérêts et limites des SIG

10.1.1. Définitions

Les *SIG* ont reçu des définitions très variées, allant de l'approche technologique jusqu'à des définitions ayant une perspective plus organisationnelle et institutionnelle visant l'aide à la décision. Ce panel de définitions est à l'origine de certaines confusions. En effet, sous le vocable de *SIG*, nous ne savons pas si le terme entend désigner simplement le logiciel spécifique ou le système en tant que structure organisationnelle, ou encore l'ensemble des disciplines de la géomatique (Laaribi, 2000).

Afin de clarifier cette situation, nous allons situer les *SIG* par rapport à la géomatique et aux *systèmes d'informations à référence spatiale (SIRS)*.

La **géomatique** (terme formé du préfixe *géo* et du mot informatique) peut être définie comme la discipline ayant pour objet la gestion des données géographiques et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion (d'après l'Office Québécois de la Langue Française).

Il s'agit donc d'une approche scientifique moderne qui met à profit l'intégration de plusieurs moyens d'acquisitions (topométriques, géodésiques, photogrammétriques, de télédétection...) et de gestion des données sur le territoire. Ce néologisme est né à Québec : il est aujourd'hui utilisé dans de nombreux pays tels que la Suisse, l'Australie, les Etats-Unis... (Laaribi, 2000).

Pour sa part, le **SIRS** est, d'après le Ministère des Affaires Municipales du Québec, une organisation structurée de ressources humaines, d'équipements, de procédures et de données qui se coordonnent pour réaliser l'acquisition et la gestion de données et fournir l'information sur le territoire.

Cependant, le SIRS moderne gagnerait, en terme d'efficacité, à se doter d'outils informatiques puissants pour gérer un volume important, et sans cesse croissant, de données sur le territoire et pour faire face à la complexité de leur traitement. Ainsi, le terme **SIG** désigne le système informatique utilisé dans un SIRS pour effectuer ces tâches (Laaribi, 2000).

Concernant le terme *SIG*, nous proposons de retenir la définition de (Fischer *et al.*, 1993) : « un **SIG** comme un système de gestion de base de données conçu pour saisir, stocker, manipuler, analyser et afficher des données à référence spatiale en vue de résoudre des problèmes complexes de gestion et de planification ».

Un tel système inclut les composantes relatives (Fig. 10.1) :

- à l'acquisition des données d'entrée ;
- au stockage, à la récupération et à la gestion de bases de données ;
- à la manipulation et à l'analyse des données ;
- à l'affichage et à la génération de produits ;
- à une interface pour l'utilisateur.

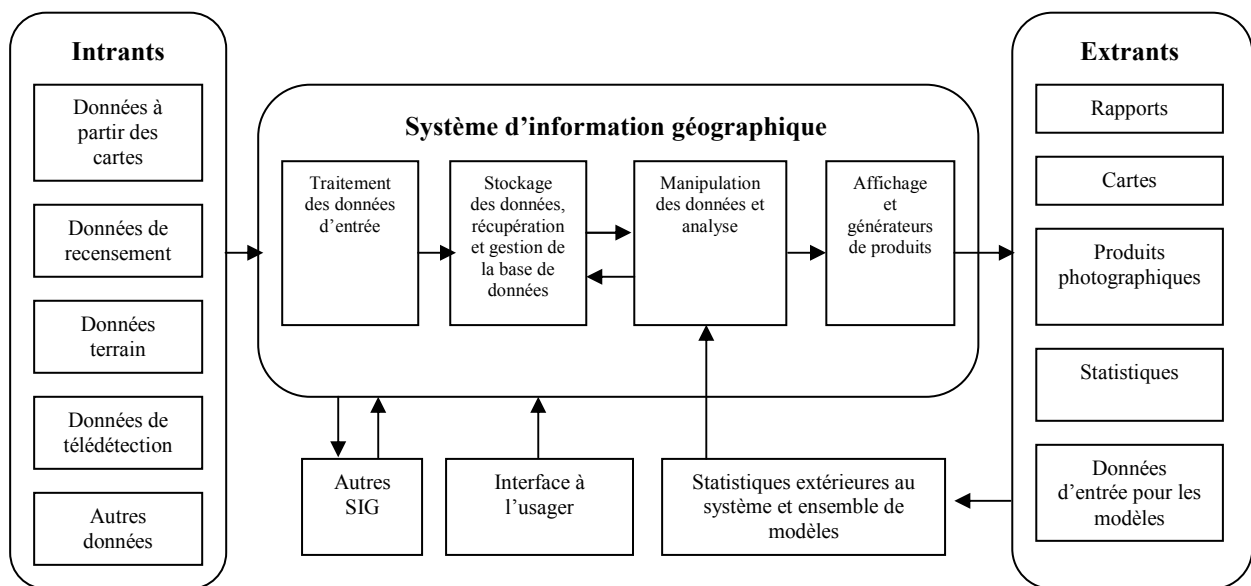


Figure 10.1. Composantes d'un SIG (Fischer *et al.*, 1993)

Dans cette section nous avons défini les principaux termes incontournables dans le domaine des SIG, puis les SIG eux mêmes.

Nous présentons maintenant les intérêts qu'apportent leur utilisation.

10.1.2. Intérêts des SIG

Par rapport aux systèmes d'information traditionnels d'une part, et aux logiciels graphiques et cartographiques d'autre part, les SIG présentent des intérêts particuliers (Laaribi, 2000) :

- le SIG gère des données à référence spatiale qui sont associées à des objets ou à des phénomènes qui se caractérisent par une position (adresse postale, coordonnées géographiques...) et très souvent par une forme géométrique (polygone, polyligne, ligne, point) ;
- le SIG joue le rôle « d'intégrateur » de données. A ce titre, il a la capacité d'accepter et de convertir des données sous les formes géométriques citées ci-dessus ;
- dans la plupart des SIG actuels, les données attributaires sont gérées dans un SGBD (R) classique et les données géographiques sont stockées à part et gérées par des modules spécifiques, le couplage entre les deux restant de bas niveau (Rigaux *et al.*, 2002). Cette coexistence de modèles de données hétérogènes pose des problèmes en matière de modélisation, d'utilisation et d'intégration. De plus, les fonctionnalités de base des SGBD en terme de restauration, de requêtes et d'optimisation sont sous-exploitées. Pour remédier à ces problèmes, des SGBD ont été améliorés en dotant le langage de requête SQL de nouvelles fonctionnalités pour stocker et manipuler à la fois les données spatiales et attributaires, et en optimisant les requêtes pour gérer les données spatiales plus efficacement. C'est le cas par exemple d'Oracle 8i et de PostGRES qui sont maintenant dotés de cartouches spatiales. Les développeurs de SIG ont adopté une approche similaire. C'est le cas par exemple d'ESRI qui propose maintenant de stocker l'ensemble des données géographiques et attributaires dans une même géodatabase ;
- le SIG permet la gestion des formes géométriques entre elles selon leur aspect géométrique grâce à des fonctions topologiques. La topologie est un sous-ensemble de la géométrie qui réfère aux relations spatiales existant entre les entités géographiques.

Tous les auteurs s'accordent sur la puissance des SIG et donc sur leur excellence en tant qu'outils de gestion des données à référence spatiale. Mais la caractéristique fondamentale qui distingue les SIG des logiciels graphiques, notamment de cartographie numérique, est leur capacité d'effectuer des *analyses spatiales* (Laaribi, 2000).

L'analyse spatiale peut être définie comme raisonnement qui permet de déduire les caractéristiques d'un phénomène en faisant intervenir des données géographiques (d'après

l'Office Québécois de la Langue Française). L'analyse spatiale exploite l'information topologique et l'information métrique. Les SIG offrent des fonctions d'analyse spatiale utilisant des opérateurs dont au moins un est spatial.

10.1.3. Limites des SIG

Toutefois, malgré le caractère fondamental de l'analyse spatiale dans les SIG, plusieurs auteurs soulignent les limites des SIG dans ce domaine (Laaribi, 2000).

Ces limites concernent en premier lieu le manque de fonctionnalités analytiques. En effet, les fonctionnalités incorporées au sein des SIG du marché répondent, généralement, aux besoins immédiats du marché, relativement peu sophistiqués, et qui sont beaucoup plus axés sur la gestion des données que sur leur analyse (Burrough, 1990, Fischer *et al.*, 1993).

Ensuite, on note des difficultés d'intégration de l'analyse spatiale aux SIG : un modèle d'analyse spatiale tend à mettre l'accent sur les traitements de phénomènes de la réalité spatiale qu'illustrent les fonctions d'analyse effectuées sur des mesures et par des calculs, alors qu'un SIG se préoccupe plus de la structure du système, c'est à dire des composantes ou des éléments qui représentent cette réalité. De plus, la discrétisation spatiale est explicite dans les SIG, alors qu'elle est implicite dans la plupart des formes d'analyse spatiale : plusieurs fonctions d'analyse spatiale sont conçues pour des phénomènes continus dans l'espace. Ces fonctions ne parviennent donc pas à traiter ces phénomènes à cause des incertitudes introduites par le processus de discrétisation des SIG (Goodchild, 1992).

Ces limites sont problématiques dans certains cas. Par exemple, les praticiens des SIG ont besoin d'une meilleure compréhension des besoins des décideurs en rapport avec leur environnement. Un besoin crucial des décideurs consiste à disposer de capacités analytiques de prédiction, de manière à ce qu'ils puissent commencer à explorer les effets de leurs décisions. Un SIG du marché ne permet pas cette analyse. De plus, les SIG manquent de capacités de modélisation et de simulation, ce qui les empêche de remplir leur rôle d'outil d'aide à la décision (Clarke, 1990, Dumolard, 1992).

Ce constat met en évidence le fait que malgré leur énorme potentiel, les SIG ne contribuent que fort peu à la solution des problèmes spécifiques des décideurs (Laaribi, 2000).

10.1.4. Synthèse

Dans cette section, nous avons défini les SIG et proposé un schéma récapitulant les composants d'un tel système. Nous avons présenté l'intérêt des SIG par rapport à des systèmes d'information plus classiques. Enfin, nous avons montré que les SIG, même s'ils sont excellents en terme de gestion des données, atteignent certaines limites dans leurs fonctions d'analyse spatiale. Ce dernier aspect aboutit à empêcher les SIG de jouer leur rôle d'outil d'aide à la décision.

10.2. Des SIG couplés à des modèles d'aide à la décision multicritère

L'objectif ici est de réduire le fossé qui sépare les SIG et l'analyse spatiale, d'autant plus qu'une telle coordination est possible et que le plus grand des avantages des SIG est justement leur capacité de manipuler plusieurs types de données (Laaribi, 2000).

10.2.1. Apporter aux SIG des capacités d'aide à la décision

Il semble qu'une simple intégration de nouvelles fonctionnalités dans les SIG ne comblerait pas les lacunes des SIG en terme d'aide à la décision. Ces fonctionnalités analytiques supplémentaires sont bien sûr nécessaires mais pas suffisantes pour tenir compte des préférences des décideurs devant raisonner à partir de nombreux critères (Laaribi, 2000).

Une solution appropriée pour combler les lacunes des SIG dans le domaine de l'aide à la décision consisterait à développer une théorie relative aux données à référence spatiale ainsi qu'une théorie de l'analyse spatiale, qui permettraient d'appréhender les problèmes décisionnels (Aangeenbrug, 1991). Mais cette solution est difficile à envisager car elle s'inscrit sur le long terme, pourtant elle est indispensable pour la reconnaissance de la Science de l'Information Spatiale (Laaribi, 2000).

Ainsi, il serait intéressant dans un premier temps de proposer une solution intermédiaire. Cette solution consiste à intégrer les SIG et les méthodes d'analyse ayant pour finalité l'aide à la décision à référence spatiale (Laaribi, 2000). Nous avons présenté ces méthodes dans la partie 3 de ce mémoire : il s'agit des méthodes d'analyses multicritères.

En conséquence, pour répondre à un problème de décision spatiale, fondé sur plusieurs critères, nous avons besoin d'intégrer les SIG et les modèles d'aide à la décision multicritère. Nous étudions maintenant les différentes possibilités d'intégration au sein du SIG.

10.2.2. Solutions pour coupler les SIG avec un modèle multicritère

Il existe 3 types d'intégration possibles des capacités d'analyse multicritère à un SIG (Ruelland, 2004) :

- l'ajout de certaines capacités analytique, directement au sein du SIG (système connecté) ;
- la combinaison de modules avec les SIG (système interfacé) ;
- l'intégration effective au sein du SIG où les données naviguent entre les modules d'analyse spatiale et le SIG sans perte de structures des données telles la topologie, l'identité de l'objet... (système de pleine intégration).

Nous détaillons maintenant ces trois types d'intégration.

10.2.2.1. Les systèmes connectés

Lorsqu'on emploie un système connecté, on utilise un système intermédiaire pour relier une application d'analyse multicritère (AMC) autonome et un SIG. Cette interface permet de reformuler et de restructurer les données afin de rendre possible la communication entre les 2 systèmes.

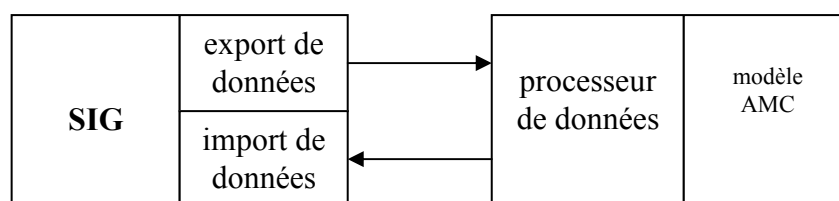


Figure 10.2. Système connecté (loose coupling) adapté de (Huang et al., 2002)

L'un des principaux atouts des systèmes connectés est que chacun des deux outils peut-être développé ou utilisé indépendamment. Mais les transferts de données d'un système à l'autre sont complexes et peu conviviaux.

10.2.2.2 Les systèmes interfacés

Ces systèmes correspondent à un niveau d'intégration plus élevé. Ils reposent sur des interfaces d'application généralement construites à partir des fonctions et du macro-langage (langage de script) disponibles au sein du SIG.

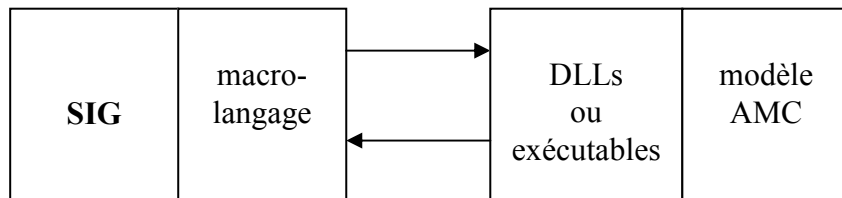


Figure 10.3. Système interfacé (tight coupling) adapté de (Huang et al., 2002)

La richesse et l'éventail des projets de systèmes interfacés montrent bien l'intérêt suscité par un traitement plus linéaire de l'information. Ces approches fournissent un accès direct aux données spatialisées et permettent une visualisation immédiate des résultats de la modélisation. Elles présentent aussi des limites en matière de communication, notamment lorsque le modèle a besoin de faire appel à une fonctionnalité du SIG au milieu d'un processus de calcul.

10.2.2.3 Les systèmes de pleine intégration

Ces systèmes peuvent être réalisés en utilisant un seul environnement de programmation, qu'il s'agisse d'un langage de programmation avancé ou du macro-langage d'un SIG. Le SIG et le modèle constituent alors un système homogène avec une base de données et des interfaces communes.

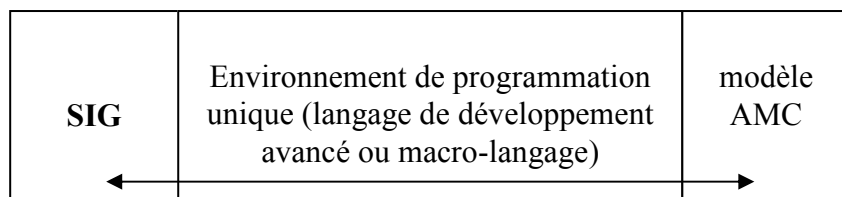


Figure 10.4. Système de pleine intégration (full coupling) adapté de (Huang et al., 2002)

Les systèmes pleinement intégrés, plus coûteux, sont alors la solution la plus efficace lorsque le problème requiert une plus grande intégration des fonctions des SIG dans les modèles.

Chaque stratégie d'intégration est une solution valide en fonction des besoins des utilisateurs et de leurs moyens technologiques et financiers.

10.2.3. Des SIG couplés à des méthodes multicritères

L'intégration AMC/SIG est aujourd'hui utilisée dans de nombreux domaines d'application tels que l'environnement, l'aménagement du territoire ou encore la gestion des risques. Nous allons détailler quelques exemples afin de voir quelles solutions sont adoptées et de quelles façons concrètes les AMC sont couplées aux SIG.

10.2.3.1. Exemples dans le domaine de l'aménagement du territoire

Pour faire face à la complexité des problèmes urbains, de nouvelles formes de gouvernance sont considérées. Des approches stratégiques, interdisciplinaires et concertées se développent pour accompagner les processus d'aménagement. En appui, des méthodes et instruments, tels les SIG et l'AMC permettent de faciliter les processus de participation (Joerin *et al.*, 2001).

Le cas des projets autoroutiers :

La mise en place d'une nouvelle infrastructure linéaire engendre souvent des réactions plus ou moins positives des personnes concernées (riverains, élus, associations...). Cette nouvelle forme de conflit, qui occasionne un rallongement des études et des pertes financières conséquentes, s'explique par la corrélation de plusieurs paramètres :

- un milieu récepteur contraignant ;
- une multiplication des acteurs ;
- des systèmes à valeur multiples ;
- une répartition inégale des bénéfices et des dommages.

Face à ce problème décisionnel, c'est toute une procédure d'évaluation qui est remise en cause et oblige les gouvernements à revoir leur processus de prise de décision. Or de nombreux auteurs ont déjà démontré que l'association des SIG et des AMC présente un intérêt majeur pour l'aide à la décision en aménagement du territoire (Molines *et al.*, 2001).

Voyons à présent l'exemple du projet de l'autoroute A79 sur lequel ont travaillé conjointement le CRENAM (Centre de Recherche sur l'Environnement et l'Aménagement, St Etienne), le CRG (Centre de Recherche en Géomatique, Laval, Québec), le CETE (Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de Lyon) et le SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Paris).

L'idée est de déterminer, à l'issue d'une étude, le tracé d'une autoroute en prenant en compte toutes les contraintes possibles. Trois applications sont développées et intégrées au sein d'un processus global d'évaluation (Molines *et al.*, 2001) :

- définition d'une grille de sensibilité globale de la zone d'étude ;
- délimitation d'un couloir de moindre contraintes environnementales ;
- automatisation et approfondissement de la comparaison (sur la base de critères) des différents corridors proposés.

cette application utilise les potentialités des SIG et des méthodes multicritères. Ainsi, l'association de ces deux outils complémentaires fournit un véritable outil de représentation et d'analyse spatiale.

Dans la phase préliminaire de localisation des contraintes, l'appréhension spatiale des composantes environnementales améliore l'étude de l'état initial. La phase de consultation quant à elle permet de modéliser les préférences de chaque type d'acteur. Elle est optimisée par un travail interactif « analyse-acteurs » qui nécessite la répétition d'évaluation et de tests d'hypothèses.

Ainsi, on comprend toute la puissance du couplage SIG/AMC dans ce type de projet où la prise de décision ne peut se faire qu'avec une connaissance et une analyse approfondie de tous les paramètres entrant en jeu.

Le cas de la planification urbaine :

Face à l'accélération des mutations urbaines, l'aménagement du territoire s'inscrit de plus en plus dans une logique de développement durable. Ce concept oblige ses acteurs à opter pour un processus de gestion du territoire basé sur l'utilisation d'informations (notamment d'ordre spatial) de plus en plus volumineuses et précises permettant d'élaborer une vue d'ensemble des enjeux impliqués. Mais la gestion de cette masse d'information ne peut se faire que par le biais de technologies telles les SIG ou les méthodes multicritères qui permettent de contribuer efficacement aux processus de décision (Joerin *et al.*, 2001).

L'exemple d'une ville comme Genève, où l'aménagement est un enjeu considérable tant l'espace disponible est rare, montre l'importance du processus de décision en matière de planification urbaine.

Dans ce type de projet, l'utilisation de l'AMC offre deux avantages principaux. Elle permet d'éviter les effets de seuil (satisfaction ou non d'un indicateur) puisqu'une faiblesse sur un facteur pourra être compensée dans certaines limites par des points forts sur d'autres facteurs. Elle permet également de gérer la composante subjective de tout processus de synthèse.

Dans ce cas de figure, les méthodes d'AMC les plus performantes sont les méthodes interactives. En effet, l'identification interactive des critères est particulièrement importante dans une démarche de négociation qui sera plus facile à mener si les différentes parties peuvent formuler leurs propositions.

Ainsi, en matière de planification urbaine, l'AMC couplée au SIG permet de prendre en compte un ensemble d'informations et de paramètres (contraintes, préférences de chaque décideur,...) et de les trier avant de les représenter de manière visuelle afin de permettre aux décideurs d'opter pour une solution (Joerin *et al.*, 2001).

10.2.3.2. Exemples dans le domaine de la gestion de l'eau

Aujourd'hui, la diminution des ressources en eau douce, la pollution des nappes et leur mauvaise répartition à la surface du globe font que de nombreuses populations ont de plus en plus de mal à assurer leur survie. Dans ce domaine, le couplage des SIG et des modèles d'AMC constitue une aide précieuse pour gérer ces ressources, évaluer les besoins des populations et définir les sites adéquats pour la mise en place d'installations liées à la production et au traitement de l'eau.

Le cas des équipements de désalinisation :

Dans de nombreuses régions arides, la désalinisation de l'eau de mer apparaît aujourd'hui comme la seule solution viable pour assurer la survie des populations. La baisse du coût des installations permet aujourd'hui d'envisager la mise en place de telles installations. Mais les problèmes liés aux critères économiques, sociaux et politiques ainsi que la complexité des analyses spatiales pour la répartition des installations imposent de développer une méthodologie intégrant des méthodes d'analyse multicritère spécifiques couplées à un SIG (Rami Mahmoud *et al.*, 2002).

Prenons l'exemple de la cote nord-ouest de l'Egypte, trop éloignée de la vallée du Nil pour bénéficier de ses avantages, et pour laquelle des études de mise en place d'usine de désalinisation ont été réalisées (Rami Mahmoud *et al.*, 2002).

Le logiciel SIG IDRISI a été choisi pour ses performances en matière d'analyse spatiale sur les modèles de données raster. Une méthode d'analyse multicritère fondée sur les méthodes de surclassement a été également adoptée. Les différents composants sont intégrés dans un système d'aide à la décision où le SIG et les opérations d'AMC sont automatisées, permettant aux décideurs de modifier aisément les poids des critères (Rami Mahmoud *et al.*, 2002).

3 critères principaux permettent de sélectionner les villes destinées à recevoir l'eau après désalinisation :

- l'encerclement de la population de la ville (le nombre de villes environnantes dans un rayon de 100 km) ;
- la distance par rapport à la première source d'eau douce (calculée dans le SIG) ;
- les préférences politiques (développement relatif de chaque ville).

Les capacités d'analyse spatiale du SIG permettent de déterminer l'emplacement optimal des équipements de désalinisation pour différentes configurations d'approvisionnement. Le SIG permet de considérer les caractéristiques spatiales complexes comme les barrières géographiques afin définir les trajectoires les plus efficaces pour les pipelines délivrant l'eau douce.

L'AMC, fondée sur des critères à poids variables, permet de définir quelles sont les villes les plus appropriées pour recevoir l'eau douce. Ainsi tous les critères peuvent être pris en compte dans ce modèle et il permet de déterminer la solution optimale pour la mise en place des usines de désalinisation.

10.2.4. Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons défini les SIG et présenté leurs intérêts par rapport aux autres système d'information. Nous avons montré que les SIG, même s'ils sont excellents en terme de gestion des données, atteignent certaines limites dans leurs fonctions d'analyse spatiale, notamment dans le cadre de l'aide à la décision fondée sur plusieurs critères. Pour répondre à cette problématique, il est nécessaire d'intégrer le SIG et des méthodes d'aide à la décision multicritère.

Nous avons vu que les SIG, pour pouvoir fournir une réelle aide à la décision, ont besoin d'être couplés à d'autres outils, notamment ceux de l'aide à la décision multicritère.

Nous avons identifié trois solutions pour intégrer les SIG et les méthodes d'aide à la décision multicritère : la connexion, l'interfaçage et la pleine intégration. Ces méthodes sont toutes valables et leur utilisation dépend du contexte dans lequel elles sont mises en place.

Dans des domaines tels que l'aménagement du territoire ou la gestion de l'eau, où de nombreux critères sont à prendre en compte dans un processus de décision, l'utilisation de SIG couplés à des méthodes multicritères a tendance à se développer.

Ainsi, nous proposons d'intégrer le SIRS Dignes avec la méthode multicritère d'affectation à base de règles que nous avons utilisée pour déterminer la performance des digues. Le SIRS Dignes, enrichi de telles fonctionnalités d'analyse spatiale, constituera un véritable outil d'aide à la décision à la disposition des gestionnaires. Nous présentons cette intégration dans le chapitre suivant.

Chapitre 11 : Intégration des indicateurs de performance des digues et du SIRS Digues

Dans la première section de ce chapitre, nous présentons de manière détaillée le SIRS Digues destiné aux gestionnaires locaux de digues (finalité, architecture, modèle de données...), puis nous montrons à l'aide d'un exemple une opération que peut effectuer un gestionnaire de digues à l'aide du SIRS. Dans la seconde section, nous montrons comment nous avons intégré le SIRS Digues et le modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues. Cette opération fournit au SIRS Digues une fonctionnalité supplémentaire d'analyse spatiale de la digue destinée à orienter les opérations de maintenance des gestionnaires.

11.1. Description de l'application SIRS digues

L'application SIRS Digues a fait l'objet de nombreuses présentations à l'occasion de divers colloques et séminaires, nationaux et internationaux. La présentation du SIRS Digues réalisée dans cette section, repose sur ces publications et rapports, notamment (Maurel *et al.*, 2004a, Maurel *et al.*, 2004b, Moins, 2005, Turpeaud *et al.*, 2004).

11.1.1. Contenu informationnel de l'application

L'application SIRS Digues repose sur une modélisation conceptuelle que le Cemagref a souhaité la plus générique possible, c'est à dire capable de représenter les différentes situations endiguées françaises, voire étrangères, sur la base de l'expertise accumulée par le Cemagref depuis une dizaine d'années.

Les grandes entités conceptuelles :

Le système endigué générique se compose d'une zone protégée, de tronçons de gestion de digue, du franc-bord, des berges et du lit du cours d'eau. A un tronçon de gestion de digue correspondent un gestionnaire et une zone protégée uniques. Par contre, une zone peut être protégée par plusieurs tronçons de gestion et un même gestionnaire peut gérer plusieurs tronçons de digue.

Un tronçon de gestion de digue est géré comme une entité linéaire au niveau du SIG. En un point d'un tronçon de gestion de digue, on distingue transversalement plusieurs entités : crête, talus côté rivière et côté terre, sommet et talus risberme, pied de digue côté rivière et côté terre, fondation (Fig. 11.1).

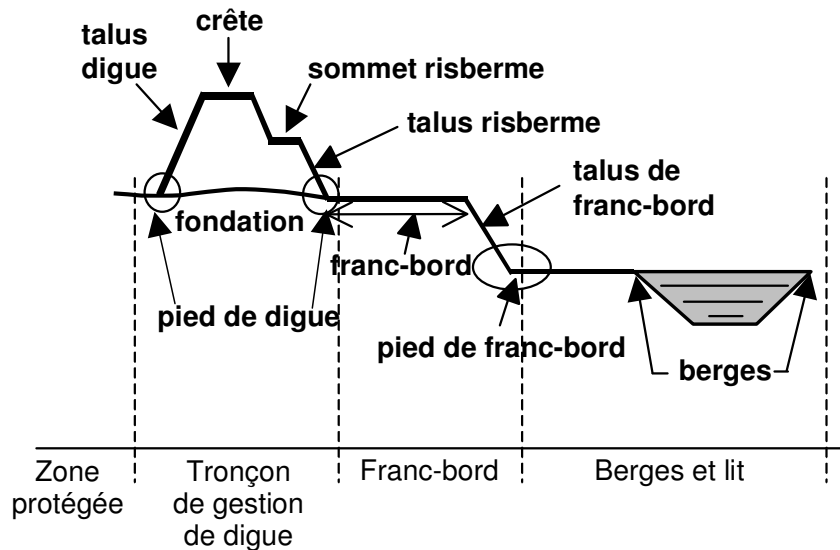


Figure 11.1. Modèle conceptuel d'un système endigué générique

La plupart des digues sont en remblai de terre, souvent rehaussées et/ou confortées à plusieurs périodes, ce qui peut entraîner des hétérogénéités internes (couches de matériaux de nature et de compactage différents). Quand la structure interne de la digue est connue (plans de travaux, sondages géotechniques), l'application SIRS digues permet de décrire la composition et la géométrie des différentes couches internes.

Le positionnement géographique des données :

L'application SIRS Digues a été conçue pour être utilisée dans une gamme d'échelles entre le 1/5000^{ème} et le 1/10000^{ème} avec une précision de positionnement des informations sur la digue de quelques mètres.

La solution retenue consiste à disposer au départ de la géométrie planimétrique (exprimée en coordonnées cartographiques) la plus précise possible pour chaque tronçon de gestion de digue. Le tracé peut être obtenu soit par récupération et éventuellement retouches de fichiers numériques existants, soit par digitalisation à l'écran en se servant de fonds cartographiques de référence (plans topo, orthophotos, BD Carto ou Topo IGN, ...) pour repérer la position des

digues, soit encore en important un fichier de points levés au GPS en se déplaçant sur la crête de digue.

Un système de repérage linéaire, similaire à ceux disponibles pour les rivières ou pour les routes, est ensuite rajouté à chaque tronçon de gestion pour positionner longitudinalement les informations sur la digue. Les points de repère (PR) sont matérialisés par des bornes fictives ou réellement implantées sur le terrain et dont les coordonnées planimétriques sont connues.

Ce système de repérage linéaire est ensuite utilisé pour positionner longitudinalement chacune des informations relatives à un élément de digue (par exemple, le matériau de la crête) sous la forme de tronçons homogènes délimités par un PR de début et un PR de fin (ou un seul PR pour une information ponctuelle). Ces tronçons peuvent alors être représentés cartographiquement, en utilisant une technique automatique dite de segmentation dynamique.

Comme les systèmes de repérage linéaire peuvent être modifiés, l'application SIRS digues a été conçue pour pouvoir gérer plusieurs systèmes linéaires (dont un par défaut) pour un même tronçon de gestion et de convertir les positions d'un système à un autre.

Du fait de la modélisation d'une digue comme une entité linéaire, le positionnement transversal de la donnée sur la digue elle-même se fait ensuite de manière alphanumérique. Ce positionnement peut être implicite du fait de la nature de l'information décrite : ainsi, l'information « matériau de la crête » sous-entend sa localisation sur la crête. Il peut également être décrit de manière explicite à l'aide des champs « côté » (rivière, terre, les deux) et « position » (pied de digue, talus ou sommet risberme, talus digue, crête, plusieurs parties, hors-digue, franc-bord, berge).

Les données gérées :

L'application SIRS digues permet de gérer des données alphanumériques et cartographiques propres aux digues. Comme cette application a été développée sur un logiciel SIG du marché, l'utilisateur peut ajouter aisément d'autres types de données géoréférencées et les mettre en relation avec les informations du SIRS digues par le biais de la cartographie.

Les données cartographiques spécifiques au SIRS digues se limitent à la géométrie des différents tronçons de gestion de digue (dotés de leurs systèmes de repérage linéaires et de leurs bornes) et des îles et bancs. Des entités complémentaires peuvent être ajoutées à la demande.

Les données alphanumériques sont organisées en quatre grandes catégories (Tab. 11.1). Le domaine couvert par la première version de l'application SIRS digue est représenté en grisé. Il comprend les catégories « gestion des ouvrages et du lit », « administratif » ainsi que les sous-ensembles « modélisation hydraulique » et « historique des crues ». Ceci nous semble correspondre à la partie générique commune à l'ensemble des situations endiguées en France. Les catégories « gestion et aménagement de la zone inondable » et « plan de vigilance » pourront être développées dans des versions ultérieures en fonction des attentes des gestionnaires mais il se peut également que ces applications de gestion soient déjà informatisées dans certaines zones endiguées. Dans ce cas-là, les efforts porteront sur l'interopérabilité entre le SIRS digues et ces autres systèmes d'information.

Catégories	Sous-catégories
Gestion des digues et du lit	Tronçons de gestion de digue Structure de la digue Profils en travers et en long Iles et bancs Franc-bord et berge Ouvrages à la mer Réseaux de voirie, hydrauliques et d'énergie sur digue et aux abords Désordres Végétation Situation foncière Documents : journaux, articles, rapports d'étude
Administratif	Organismes et personnes physiques Propriétaires et gardiens Marchés, prestations, conventions Emprise syndicale Emprise communale
Gestion de crise	Historique de crues Résultats de modélisations hydrauliques Plan de vigilance
Gestion et aménagement zone inondable	Description des zones de gestion Réglementation Vulnérabilité

Tableau 11.1. Les grandes catégories de données du SIRS Dignes (en grisé celles intégrées dans la version 1)

Pour contrôler la description des éléments rattachés à la digue, de nombreuses listes de valeurs prédéfinies ont été établies. Ces listes peuvent être facilement complétées par un gestionnaire en fonction de ses besoins spécifiques.

Les sources des données et le contrôle de leur qualité :

Les données gérées par le SIRS digues proviennent soit de documents d'archive, soit de relevés sur le terrain, soit de documents en cours d'exploitation chez le gestionnaire. Elles peuvent aussi être fournies par des organismes extérieurs (cas par exemple de profils en travers réalisés par un cabinet de géomètre).

Des fiches de relevé terrain, basées sur la méthode de diagnostic de digues (Mériaux et al., 2001), ont été élaborées en concertation avec les gardes digues du SYMADREM et de l'AD-IDR en cherchant à optimiser leur ergonomie pour un usage opérationnel sur le terrain. Les écrans de saisie du SIRS digues ont ensuite été développés sur cette base.

Les données concernant la structure et l'état externe de la digue, les réseaux hydrauliques, d'énergie et de voirie doivent faire l'objet d'un recensement initial lourd, mais ne nécessitent pas ensuite de mises à jour fréquentes. Les relevés hydrauliques et les inspections visuelles de crue (montée des eaux et laisses de crue) restent épisodiques. Le relevé des observations et des interventions sur les désordres doit s'effectuer quant à lui de manière périodique.

La maîtrise de la qualité des données repose sur plusieurs approches complémentaires :

- procédures de saisie/validation appliquées par le personnel et les prestataires ;
- renseignement systématique de l'origine de la donnée et de sa période de validité dans les champs « date de début de validité », « date de fin de validité » et « source » (choix possible : observée de visu sur le terrain, déduite de l'observation, à dire d'acteur, dérivée d'un document, non observable) ;
- éventuellement, description supplémentaire de la qualité en texte libre dans le champ « commentaire ».

11.1.2. Architecture informatique du système

L'application se compose d'une application principale client-serveur sous le logiciel SIG ArcView 8 (© ESRI) et Access (© Microsoft), dotées de l'ensemble des fonctionnalités cartographiques et alphanumériques , ainsi que d'un module autonome avec un run-time Access© pour saisir ou consulter des données alphanumériques sur le site ou en dehors du site du gestionnaire (Fig. 11.2).

Les droits d'accès et les tâches varient selon trois catégories d'utilisateurs : l'administrateur, ceux chargés de la saisie et ceux qui exploitent la base de données constituée.

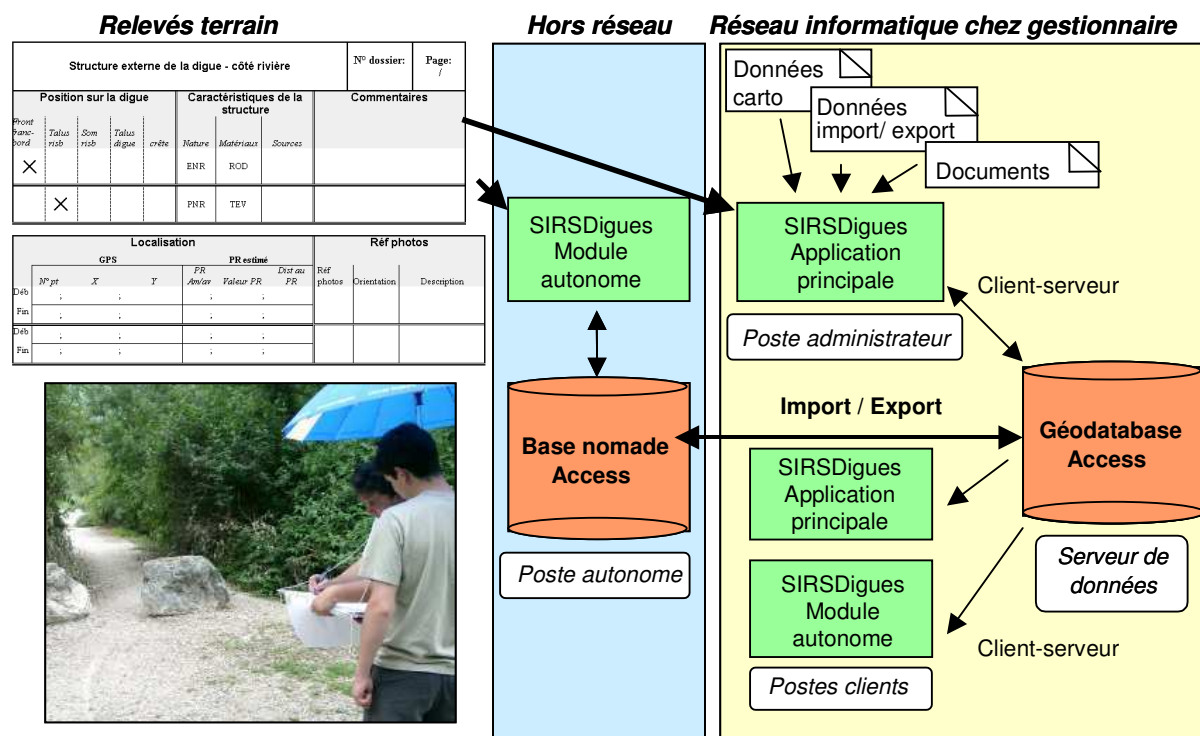


Figure 11.2. Architecture informatique de l'application SIRS digues V1

11.1.3. Fonctionnalités de l'application

Au-delà du modèle de données et des écrans de saisie et de consultation propres au domaine des digues (Fig. 11.3), plusieurs fonctionnalités spécifiques ont été développées :

- gestion de plusieurs systèmes de repérage linéaire sur un même tronçon ;
- mise à jour de la base de données liée à une évolution de la géométrie du tronçon de gestion de digue ;
- synchronisation entre les bases nomades et la base principale ;
- convertisseur entre systèmes de repérage cartographiques et linéaires ;
- projection automatique sur la digue de relevés GPS approximatifs ;
- gestion de la temporalité pour certains critères (exemple des désordres) ;
- outil et bibliothèque de symboles pour optimiser la représentation cartographique multivariée sur des linéaires (paramétrage de décalages graphiques latéraux lors de l'affichage) (Fig. 11.4) ;

- fonctions avancées d'édition de rapport (Fig. 11.5) ;
- modèles de mise en page cartographique.

Structure du tronçon de gestion de digue

Id Tronçon: 2, Nom du tronçon de gestion: Tronçon gestion Isère RD 418-502, Système de repérage linéaire par défaut: SR Isère RD

Crête | Talus digue | Sommet Risberme | Talus Risberme | Pied de digue | Talus Franc Bord | Pied Talus Franc Bord | Fondation

PR début	PR fin	N° couche	Nature	Matériau	Epaisseur crête (m)	Talus intercepté	Fonction	Source	D
		1	PAL : Palplanche	PMA : Pierres Ma		Indéfini		VUO : Vu sur le te 13	
33.607	33.773	1	RVT : Revêtement	ENB : Enrobé		Indéfini		VUO : Vu sur le te 01	

Compléments sur l'élément courant

Commentaires

Date: 09/07/2003

Figure 11.3. Exemple d'écran de saisie/consultation

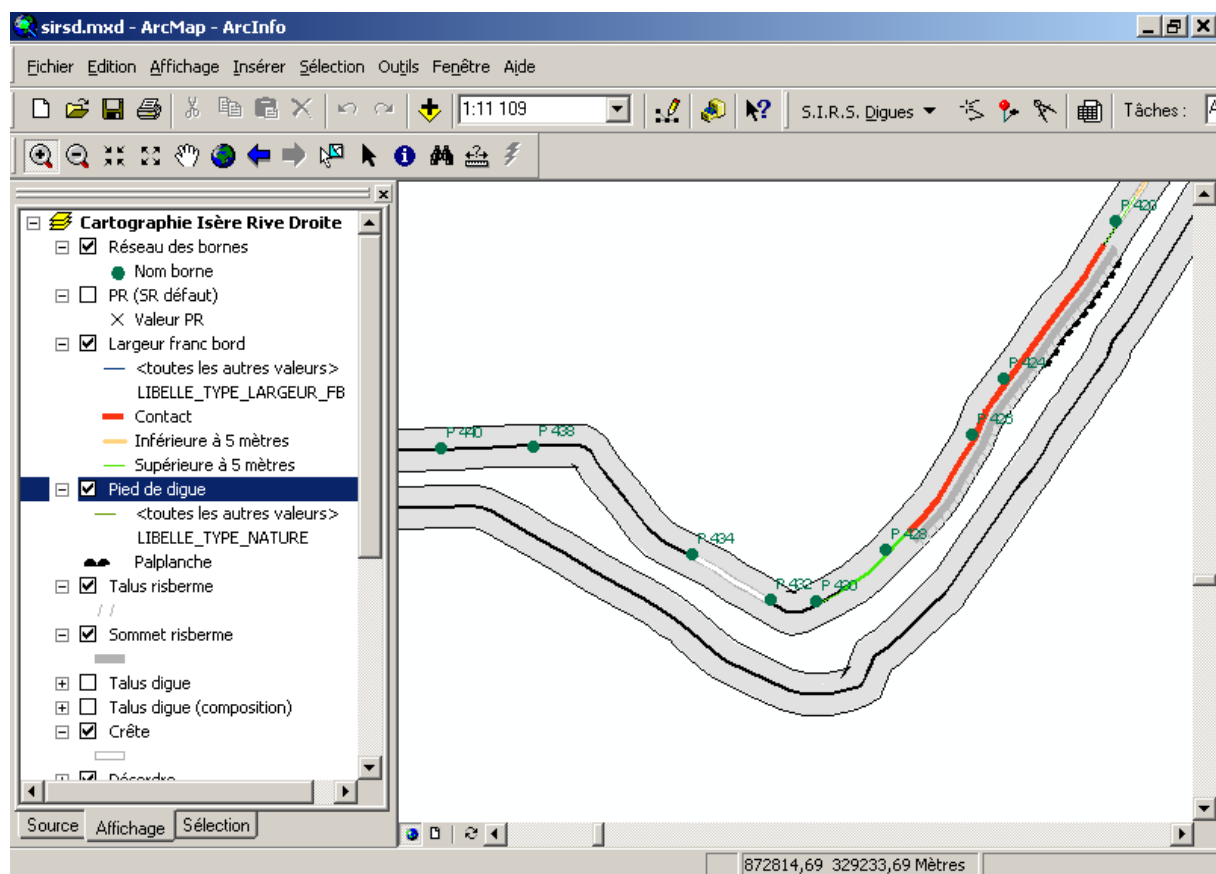


Figure 11.4. Exemple de cartographie en exploitant les décalages graphiques latéraux

SIRS Diques																
Système d'information à référence spatiale de gestion des digues de protection contre les inondations																
Rapport																
Id Tronçon		Nom du tronçon de gestion										Système de repérage linéaire par défaut				
2		Tronçon gestion Isère RD 418-502										SR Isère RD				
PR début sélectionné		33,61										PR fin sélectionné				
												35,64				
Talus digue																
PR début	PR fin	Côté	Nature haut	Matériau haut	Longueur rampant haut	Nature bas	Matériau bas	Longueur rampant bas	Source de l'info	Date début validité	Date fin validité	N° couche	Epaisseur sommet	Pente intérieure	Fonction	Commentaire
34,26	34,60	Terre	RVT : Revêtement sur la digue	PSE : Pierres Sèches					Déduction de l'observateur sur le terrain	07/04/2004		1			Protection	
34,92	35,37	Rivière	PNR : Partie non revêtue de la digue	TEV : Terre végétale	3,00	RVT : Revêtement sur la digue	PMA : Pierres Maçonneries	4,00	Vu sur le terrain par l'observateur	07/04/2004		1			Etanchéité	
35,49	36,18	Terre	PNR : Partie non revêtue de la digue	TEV : Terre végétale					Vu sur le terrain par l'observateur	07/04/2004		1				
Pied de digue																
PR début	PR fin	Côté	Nature	Matériau	Source de l'info	Date début validité	Date fin validité	Commentaire								
33,83	34,08	Rivière	PAL : Palplanche	B01 : Bois	Vu sur le terrain par l'observateur	07/04/2004										

Figure 11.5. Fonction avancée d'édition de rapport (mode tableau)

11.1.4. Exemple de traitement des informations avec le SIRS Dignes dans sa version actuelle

11.1.4.1. Acquisition et saisie des données

Nous présentons maintenant un exemple concret d'utilisation du SIRS Dignes que peut faire actuellement un gestionnaire. L'exemple que nous traitons concerne la gestion des désordres qui peuvent affecter une digue. Nous rappelons qu'un désordre est un comportement défectueux du point de vue de la sécurité et des performances de l'ouvrage.

Le gestionnaire parcourt son parc d'ouvrage et relève un à un l'ensemble des désordres qu'il découvre sur ses ouvrages. Pour cela, des fiches de relevé spécifiques ont été développées (Fig. 11.6).

Observation et intervention sur désordre											Page : /		
Position sur la digue	Caractéristiques du désordre				Localisation						photos Réf		
	Côté*	Type*	Déjà vu?*	Disparu?*	type ouvrage*	Lieu-dit	n° pt	X	Y	Repérage par borne			
										Borne	Pos/ borne	Distance/ borne	
							Déb	;	;		;	;	
							Fin	;	;		;	;	
Description:		Evolution:		Suite à apporter:		Prestation (nature de l'intervention)							

Figure 11.6. Fiche spécifique dédiée au relevé des désordres

Sur cette fiche, l'opérateur chargé de relever les désordres, peut inscrire :

- la position du désordre sur la digue ;
- la caractéristique du désordre (terriers, végétation, érosion de talus...) en choisissant dans une liste préétablie de désordres possibles ;
- sa localisation (soit à l'aide d'un GPS, soit en utilisant des points de repère) ;
- la référence d'une photo du désordre ;
- divers commentaires relatifs à la description et l'évolution du désordre, puis la suite à apporter pour le traiter.

Lorsque la campagne de relevé sur la digue est achevée, un opérateur saisit les données acquises dans le SIRS Dignes. Pour cela il choisit le tronçon de digue de son parc sur lequel il souhaite saisir des données, puis le type d'informations à saisir (Fig. 11.7).

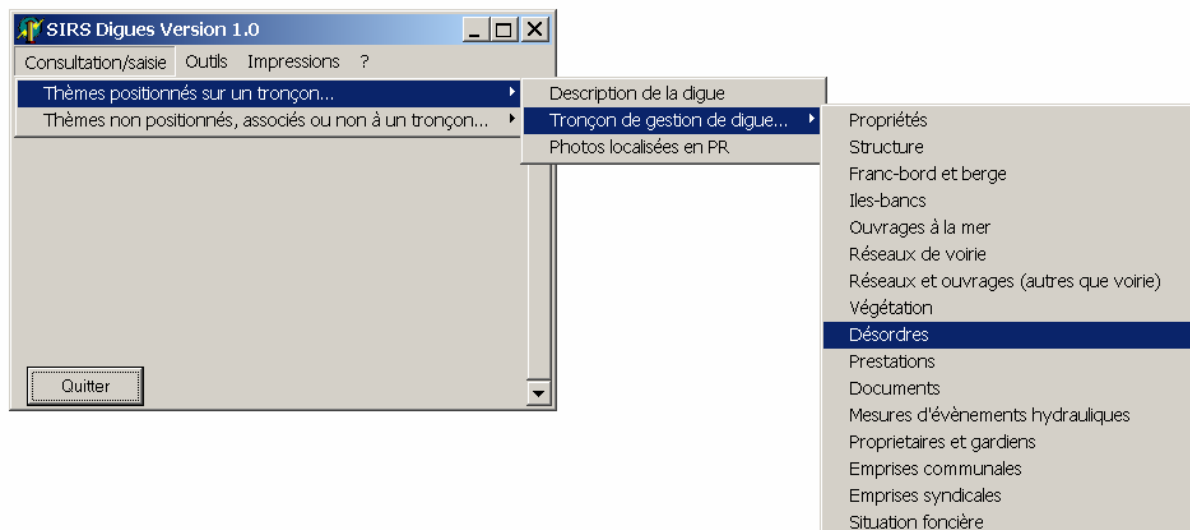


Figure 11.7. Démarrage du module de saisie de l'application SIRS Dignes

L'opérateur accède alors à un écran de saisie, dont l'ergonomie est similaire à celle de la fiche de relevé de terrain (Fig.11.8). Cela permet de faciliter la saisie de toutes les données relevées sur les digues.

PR début	PR fin	Côté	Position	Type désordre	Lieu-dit	Source	Date apparition	Date disparition
37 196,249	37 196,249	TER : Terre	TAD : Talus digue	RDH : Renard hydraulique	Grangeage	VUO : Vu sur le terrain	01/12/2004	
37 212,301	37 276,508	TER : Terre	CRE : Crête	DSA : Dépôt sauvage	Grangeage	VUO : Vu sur le terrain	15/06/2004	

Id observation	Date de l'observ	Observateur	Urgence	Nombre désordre
1	30/11/2004	Gomes Jean-Fran	0 : Faible urgence	
3	15/06/2004	Gomes Jean-Fran	0 : Faible urgence	

Figure 11.8. Ecran de saisie des données du SIRS Dignes

11.1.4.2. Exploitation des données

Désormais, le gestionnaire de digues a la possibilité d'exploiter les données du SIRS Digues. Il peut par exemple être intéressant de cartographier les désordres qu'il vient de saisir dans la base de données. Pour cela, il lui suffit de choisir le thème à représenter dans l'application cartographique du SIRS Digues (Fig.11.9).

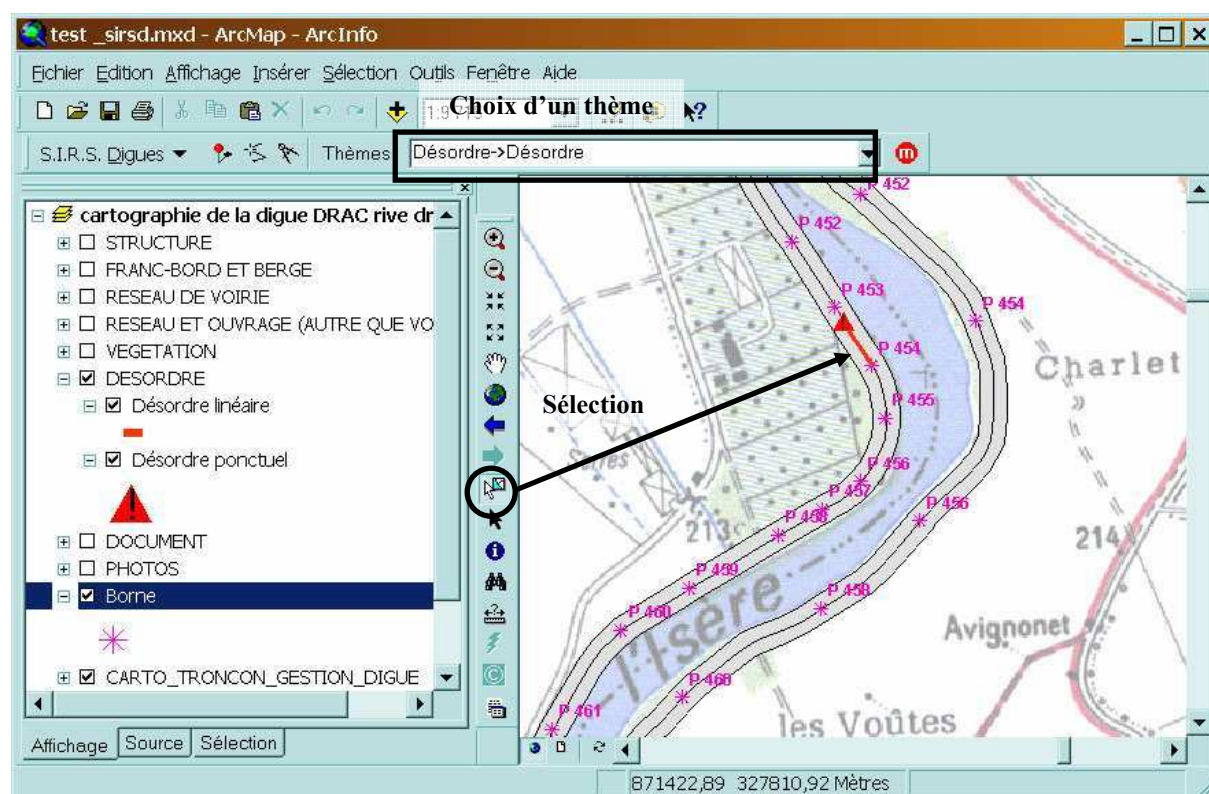


Figure 11.9. Représentation cartographique du thème désordre

Sur cet exemple, le gestionnaire s'aperçoit qu'entre le PR 453 et 454 se trouvent deux désordres relatifs à la digue en rive droite de l'Isère :

- un désordre ponctuel symbolisé par un triangle rouge signifiant « danger » ;
- un désordre linéaire symbolisé par un trait rouge en crête de digue.

Le gestionnaire peut retrouver facilement l'ensemble des informations relatives à ces désordres en double cliquant sur le désordre qu'il souhaite étudier avec l'outil de sélection entouré sur la figure ci-dessus. En effectuant cette opération, il obtient l'écran de visualisation correspondant au désordre (Fig. 11.10).

Désordres en relation avec un tronçon de gestion de digue

Mode consultation Annuler Quitter

Désordre

Id désordre: 1 Date apparition: 15/06/2004 Date disparition: Côté: CRE : Crête

Tronçon de gestion de digue auquel appartient l'entité ci-dessus

Id Tronçon: 6 Nom du tronçon de gestion: Tronçon de gestion Isère RD du Bresson (P 322) à St Gervais (P 938)

Ouvrages et réseaux associés Voiries associées

+ d'infos Observations / Suivi Prestations Articles de journaux Evènements hydrauliques à l'origine

Description Photos

Id photo: 135 Nom du fichier contenant la photo: DSCN2410.JPG

Description Localisation

Caractéristiques de la photo ci-dessous

Côté: CRE : Crête Date photo: 30/11/2004

Référence de la photo: Nom et prénom du photographe: Gomes Jean-François

Orientation de la prise de vue: AMO : Vers l'amont Nom du document:

Description de la photo: Désordre "hauteur du dépôt: 2 m"



Figure 11.10. Ecran de visualisation des données relatives à un désordre

Enfin, le gestionnaire du parc peut décider d'imprimer une fiche de suivi des désordres (Fig. 11.11). Cette fiche est un récapitulatif des désordres étudiés où sont édités :

- la description du désordre ;
- sa localisation ;
- son observation et son suivi,
- son traitement ;
- ses photos.

SIRS Dignes Version 1.0

Consultation/saisie Outils Impressions ?

- Rapport par tronçon de gestion
- Rapport synthétique sous forme graphique...
- Profils en travers
- Fiche de suivi de désordre**

Quitter

Préc. Suiv. Zoom + Zoom - Imprimer page courante Imprimer

Fiche de suivi de désordre

Description générale du désordre

N° désordre: 37263 Date appariement: 15/05/2005 Date de position: 15/05/2005 Type de désordre: (N°20 - Présence de végétation générale ou d'arbres (sauf arbres ouverts, ou de rochers))

Profil de la section: (Profil de la section: 15m le 15/05/2005 et 12m le 20/11/2004)

Localisation du désordre

N° Tronçon: 8 Nom du tronçon de gestion: Tronçon de gestion 10km RD du Brecon (P22) à Brecon (P23) Système de repérage initial par défaut: BPI 10km RD Digne

Profil: 37263 Date de position: 15/05/2005

Observation / suivi

Catégorie	Niveau	Observation sur l'édifice	Réaction/Intervention	Situation	Urgence
10/10/10	10/10/10	désordre de la structure	Intervention	As n. d. l. l.	N° 10/10/10
10/10/10	10/10/10	désordre de la structure	Intervention	As n. d. l. l.	N° 10/10/10

Traitement du désordre

Catégorie: 10/10/10 Date: 15/05/2005 Intervent: 15/05/2005 Initialisation: 15/05/2005

Photo(s)

FR: 37263 Date photo: 15/05/2005

Référence de la photo: 15/05/2005

Observation de la photo: 15/05/2005

Nom et prénom du photographe: 15/05/2005

Commentaire: 15/05/2005

Métrage: 15/05/2005

Page 1/1

SIRS Dignes
Général 15/05/2005 à 15/05/2005

Figure 11.11. Création d'une fiche de suivi des désordres

11.1.5. Synthèse

Nous avons présenté en détail l'application SIRS Dignes, ses finalités, son architecture, son contenu informationnel et ses fonctionnalités. A travers un exemple d'utilisation (la gestion des désordres), nous avons montré les possibilités d'acquisition et d'exploitation des données que permet la version actuelle du SIRS Dignes.

Cet outil constitue une avancée significative dans le cadre de la gestion patrimoniale des digues. Cependant le SIRS Dignes ne permet pas à l'heure actuelle d'optimiser réellement les

actions de maintenance. Pour cela, les gestionnaires doivent être aidés dans leurs choix. Leur fournir une vision plus synthétique de leurs données, sous la forme d'indicateurs de performance, et leur donner la possibilité de cartographier cette performance, leur apportera une vision globale de l'état et de la performance de leur parc de digues. Ainsi les gestionnaires disposeront d'un outil d'aide à la décision leur permettant d'optimiser leurs choix de gestion.

11.2. Du SIRS Dignes à un outil d'aide à la décision à référence spatiale

11.2.1. Concepts des systèmes support de décision

Dans sa version actuelle, le SIRS Dignes permet d'acquérir toutes les données relatives aux digues, sous diverses formes (données alphanumériques, photos, dessins...). Ces données sont localisées sur la digues, ce qui permet aux gestionnaires de cartographier les données par thèmes (désordres, réseau, ouvrages, végétations...).

Bien que novateur dans le contexte de la gestion des digues, cet outil a d'ores et déjà besoin d'être enrichi de fonctionnalités d'analyse spatiale pour devenir un système d'aide à la décision à référence spatiale (SADRS), (Spatial Decision Support System (SDSS) en anglais (Laaribi, 2000)).

L'approche traditionnelle des Systèmes d'Aide à la Décision (SAD) repose sur trois composantes (Fig. 11.12) :

- un système de gestion de base de données (SGBD) qui fournit toutes les fonctions relatives à la saisies, au stockage et au traitement des données, à la diffusion des résultats ainsi qu'aux relations avec d'autres bases de données ;
- un système de gestion de base de modèles analytiques (SGBM) qui fournit un ensemble d'outils analytiques pertinents, nécessaires pour l'interprétation et les recommandations relatives aux données, et répondant aux besoins du décideur ;
- une interface à l'utilisateur, conviviale et interactive, fournie par un système de gestion et de génération de dialogue (SGGD) qui facilite l'interaction du décideur avec le SAD.

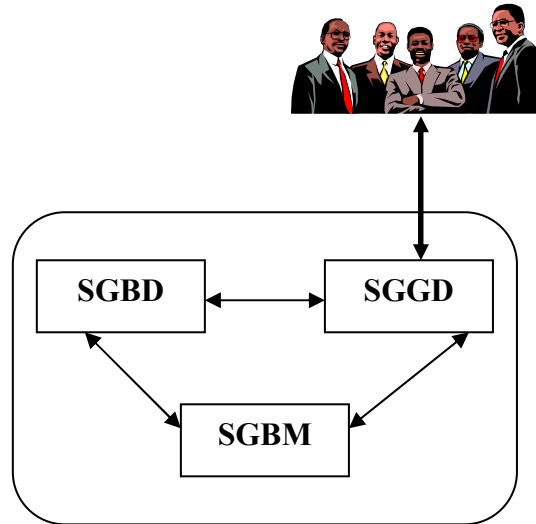


Figure 11.12. Les trois composantes d'un SAD

Le SADRS utilise ces trois composantes. Mais, à cause de la spécificité des problèmes localisés dans l'espace géographique, le SADRS a besoin de capacités et de fonctionnalités additionnelles (Densham, 1991) qui :

- fournissent des mécanismes d'entrée de données à référence spatiale ;
- incluent les techniques analytiques qui sont propres aux analyses géographiques et spatiales (incluant les statistiques) ;
- fournissent une sortie des résultats dans des formes spatiales variées, incluant la carte et d'autres types plus spécialisés.

Le SADRS est conçu pour aider à définir les problèmes, à identifier les objectifs et générer des variantes, parmi lesquelles le décideur est amené à choisir, en se basant sur des techniques d'évaluation. Parmi ces techniques, l'analyse multicritère constitue un élément fondamental d'analyse dans le processus de décision et forme donc une composante importante du SADRS (Laaribi, 2000).

Ainsi, pour tendre vers le passage de la version actuelle du SIRS Digues à un SADRS, nous devons intégrer le modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues et permettre une visualisation des résultats de cette analyse, au moins sous une forme cartographique.

11.2.2. Intégration de la méthode multicritère et du SIRS Dignes

Le mode de couplage adopté pour intégrer la méthode multicritère d'évaluation de la performance des digues au SIRS Dignes est le mode de pleine intégration (Cf. Chapitre 10) où le modèle multicritère et le SIRS Dignes utilisent une base de données et un langage de programmation communs.

Nous avons considéré que cette solution était la plus efficace car elle évite toute conversion de donnée lorsqu'il s'agit de faire communiquer les modules entre eux. Les spécifications techniques du module développé sont précisées en annexe 9. Le prototype de couplage a été développé en Visual Basic, ArcGIS proposant un module de programmation dans ce langage.

11.2.2.1. Les outils de développement

Les outils utilisés pour mener à bien l'intégration du modèle multicritère et du SIRS Dignes se sont imposés naturellement du fait des contraintes liées au logiciel ArcGIS d'ESRITM et au SIRS Dignes. En effet, le SIRS Dignes s'intègre entièrement au sein d'ArcGIS dont il est un composant additionnel. Le SIRS utilisant une base de données de type Access, nous avons opté pour les mêmes outils de développement.

ACCESS :

Access est un système de gestion de base de données (SGBD) développé par la société Microsoft®. L'application SIRS Dignes utilise une base de données Access pour saisir, stocker et restituer les données relatives aux digues. Cette base de données peut-être interrogée par n'importe quel programme au moyen de requêtes SQL (System Query Language).

Nous avons donc utilisé le logiciel Access ainsi que le langage SQL pour récupérer, dans la base de données du SIRS Dignes, les données nécessaires au calcul des indicateurs de performance.

Visual Basic for Application (VBA) :

VBA est un langage de programmation résultant de l'évolution des langages Basics précédents de Microsoft® (Basica, GW Basic, QBasic). Il permet de créer des applications fenêtrées et de pratiquer la programmation événementielle.

Le programmeur en Visual Basic manipule des éléments visuels à l'écran auxquels il ne reste plus qu'à associer du code. On peut développer avec Visual Basic diverses applications, qui peuvent notamment être intégrées dans les principaux logiciels Microsoft® (Access, Excel, Word...).

Visual Basic, dans sa version 6, est le langage de programmation utilisé avec ArcGIS qui propose un environnement de développement complet. C'est pour cette raison que ce langage a été adopté pour l'implémentation du module mettant en œuvre le modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues.

ArcMap :

ArcMap est un logiciel appartenant à la gamme de produits ArcGIS développée par la société ESRITM. C'est un SIG permettant la création, la mise à jour, l'affichage, l'édition, l'interrogation et l'analyse de toutes les données cartographiques ou géographiques.

L'atout majeur d'ArcMap dans le cas de la gestion d'ouvrages linéaires est qu'il propose en natif des fonctionnalités de segmentation dynamique. Nous verrons plus loin l'intérêt fondamental de cet outil pour notre projet.

En outre, ArcMap inclut un système de génération de diagrammes, des fonctions de dessin avancées, un éditeur cartographique orienté objet ainsi qu'un générateur complet d'états. Il constitue un environnement de traitement des données cartographiques et de rédaction de documents cartographiques de haute qualité.

11.2.2.2. Potentialités de la base de données du SIRS Dignes à intégrer le modèle

La mise en œuvre de l'analyse multicritère dans le SIRS Dignes a nécessité, dans un premier temps, de vérifier que la base de données du SIRS pouvait permettre le calcul de la performance des digues. Pour cela, il a fallu vérifier que la base de données pouvait intégrer les données nécessaires au calcul du score de chacun des critères. Ces données ont en effet été déterminées par les experts sans tenir compte du modèle de données de la version actuelle du SIRS Dignes.

Cette indépendance entre la base de données et l'évaluation experte des critères a été souhaitée. Elle permet tout d'abord de ne pas limiter notre modèle multicritère aux

possibilités du SIRS Dignes, quitte à proposer ensuite des modifications de cette base de données selon nos besoins.

Ainsi, dans un premier temps, nous avons étudié la structure de la base de données actuelle du SIRS Dignes afin de déterminer les éléments manquants.

Le document en annexe 8 récapitule, sous forme de tableaux, l'ensemble des critères pris en compte pour le développement du module d'analyse multicritère et précise les champs et les tables de la base de données qui sont utilisés pour le calcul du score de chacun des critères. De plus, dans ce document sont faites des propositions de modifications à réaliser au niveau de la structure de la base de données (ajout de tables, liste de références, champs...).

En l'occurrence, dans le cadre du prototype que nous avons développé, nous avons fait le choix de n'apporter dans la base de données que des modifications ou adaptations mineures. Par exemple, nous avons rajouté des champs à des tables existantes ou inséré dans des listes de choix existantes de nouvelles possibilités. Nous avons fait ce choix car l'objectif de notre étude est pour le moment de montrer qu'on peut coupler au SIRS Dignes un modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues, pour un mécanisme de rupture particulier. Par contre, dans le cas où nous souhaiterions intégrer plus tard l'évaluation multicritère de tous les scénarios de rupture existants, pour tous les types de digues, il sera alors nécessaire de faire évoluer la structure de la base de données du SIRS Dignes, notamment en ajoutant des tables spécifiques à l'évaluation multicritère de l'ensemble des cas possibles.

11.2.2.3. L'intégration du modèle multicritère

Un premier développement en Visual Basic réalisé en 2004 avait permis de commencer à coupler le SIRS Dignes et le modèle multicritère (Berthaud, 2004). Mais le modèle multicritère ayant évolué depuis, il a fallu reprendre en 2005 la quasi totalité de l'application et redéfinir son architecture (Prévot, 2005).

Le fonctionnement du programme dans sa dernière version est le suivant :

- les valeurs des critères et sous-critères du modèle sont lues dans la base du SIRS Dignes à l'aide de requêtes SQL ;
- ces valeurs décrivent des tronçons ponctuels et/ou des tronçons linéaires de digue dont la position est exprimée dans le système de repérage linéaire défini plus haut.

L'application calcule alors les scores pour chaque sous critère puis critère et renvoie alors une première segmentation de la digue pour chacun de ces critères.

Prenons l'exemple du critère « Racines dans la recharge amont étanche » (Fig. 11.13) et (Fig. 11.14).

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 11.13. Grille d'évaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche »

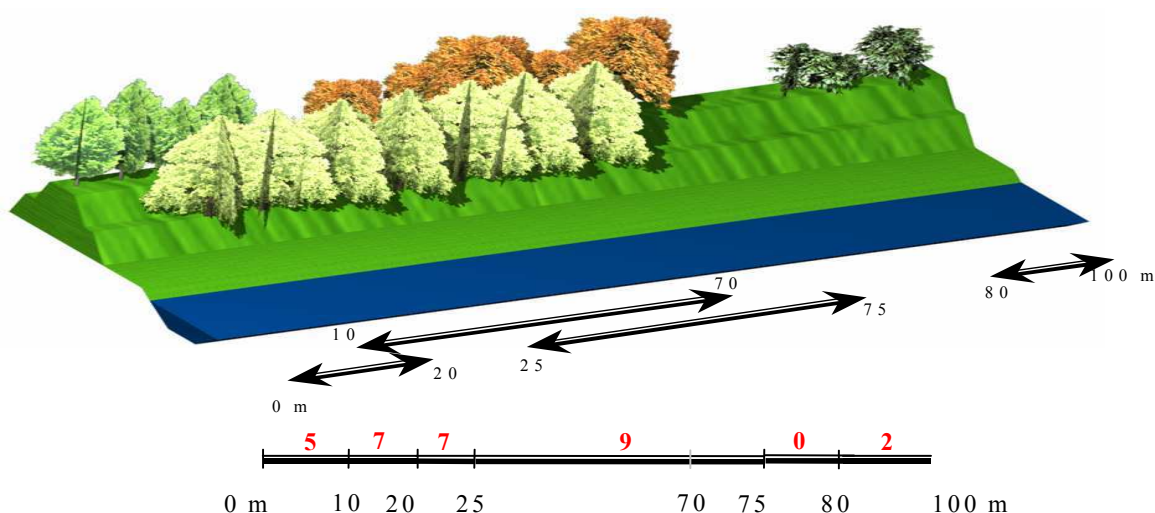


Figure 11.14. Segmentation de la digue selon le critère « végétation » (Berthaud, 2004)

L'existence de racines dans la recharge amont étanche dépend de la présence de végétation sur et autour de la digue. Le programme récupère alors tous les enregistrements de la base de données concernant la végétation sur le tronçon étudié.

Une fois calculés les scores des trois sous-critères suivant la grille présentée à la figure 11.13, ils sont agrégés sous forme de nouveaux sous-tronçons homogènes de même niveau de performance. Cette opération de segmentation automatique multicritère est réalisée avec une fonction spécifique à ArcGIS appelée « superposition d'évènements d'itinéraires ». Le score du critère est alors calculé en appliquant ici l'opérateur MAX (pour chaque intervalle, on retient le plus haut score comme valeur finale du critère sur cet intervalle).

La même procédure est appliquée à l'ensemble des critères. Nous obtenons ainsi une segmentation de la digue selon le score de chaque critère. Pour le cas de la rupture de digue par érosion interne, nous obtenons jusqu'à 13 « objets digues » différents segmentés selon leurs scores.

Ces résultats sont stockés au fur et à mesure des calculs dans des tables ACCESS temporaires (Fig. 11.15).

ID_TRONCON	PR_DEBUT	PR_FIN	FINAL
2	1,00081	1,03981	0
2	1,12611	1,13024	0
2	1,14024	1,15143	0
2	1,19605	1,43333	0
2	1,44333	1,57156	0
2	1,58156	1,68655	0
2	1,69655	1,81421	0
2	1,82421	1,99965	0
2	1,18105	1,19605	4
2	1,03981	1,12611	5
2	1,13024	1,14024	5
2	1,57156	1,58156	5
2	1,81421	1,82421	5
2	1,15143	1,18105	8
2	1,68655	1,69655	8
2	1,43333	1,44333	9

Figure 11.15. Table résultat des scores du critère « racines dans la recharge amont étanche »

Pour calculer la performance du tronçon de la digue, on agrège ces 13 objets (Fig. 11.16).

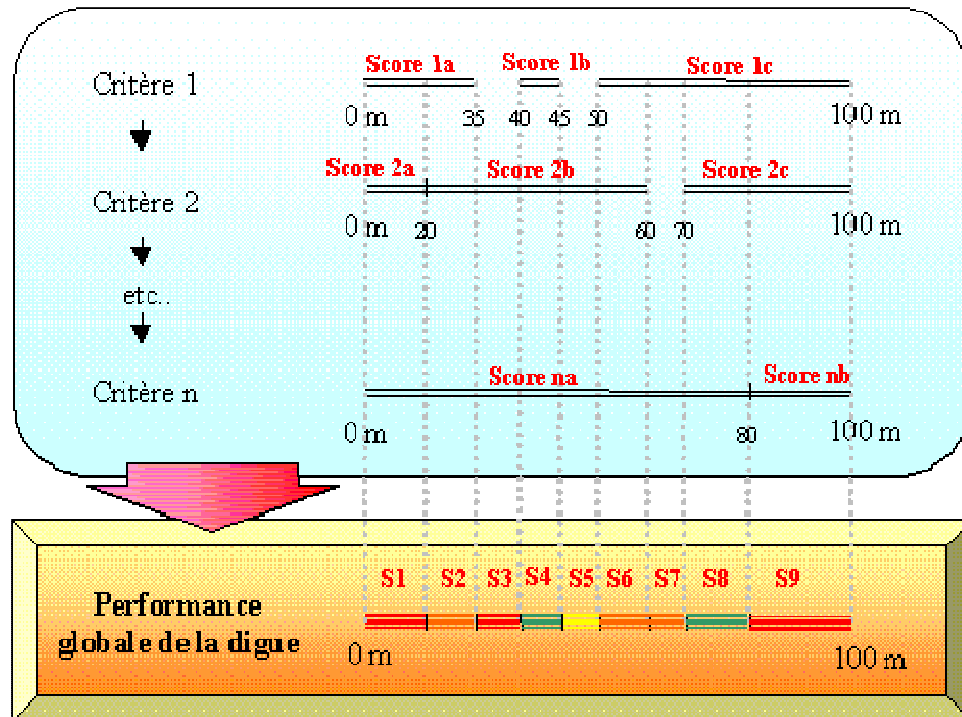


Figure 11.16. Evaluation de la performance de la digue (Berthaud, 2004)

Ainsi sur ce schéma, la valeur S1 représente le score final de la première portion du tronçon. Ce score est égal au maximum des valeurs « Score 1a, Score 2a, ..., Score na ».

$$S1 = \text{MAX}(\text{Score 1a}, \text{Score 2a}, \dots, \text{Score na})$$

Les valeurs obtenues sont stockées au fur et à mesure dans une table ACCESS temporaire.

Cette opération permet d'obtenir un découpage de la digue en tronçons représentatifs du niveau de performance global calculé, pour un mécanisme de rupture donné. Selon le cas, les tronçons résultants peuvent être de faible longueur (de l'ordre du mètre).

Pour cela, une interface spécifique a été développée dans le SIRS Digues (Fig. 11.17).

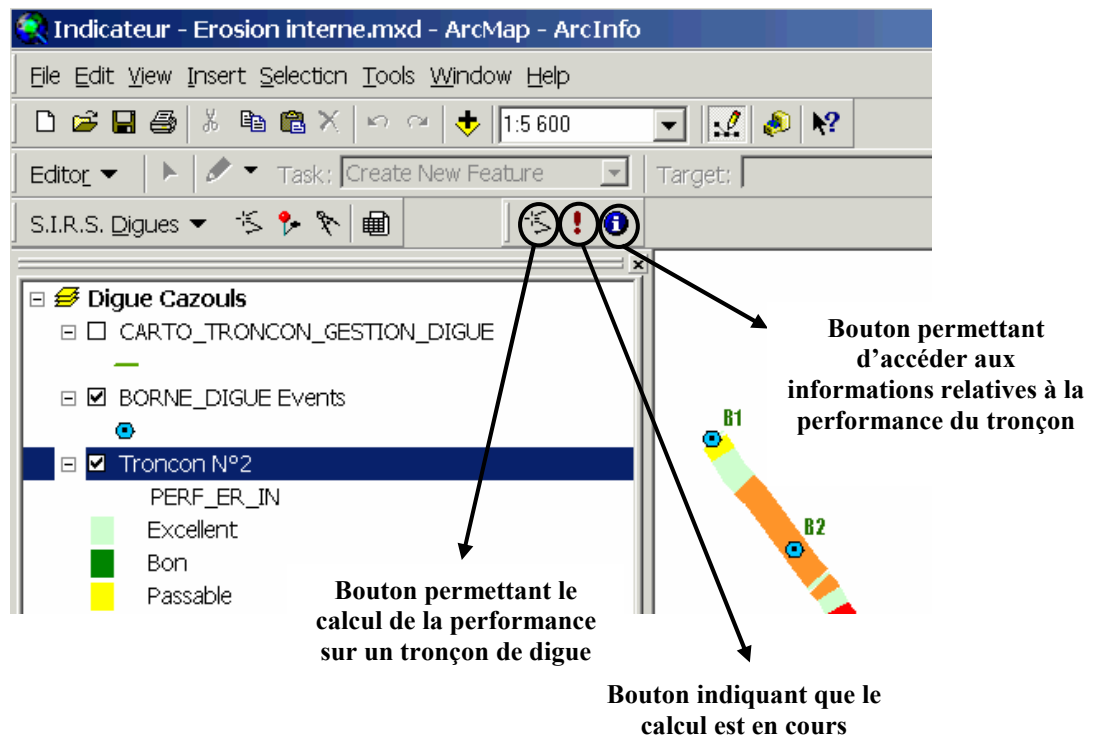


Figure 11.17. Interface spécifique au calcul de la performance des digues (Berthaud, 2004)

11.2.3. La cartographie de la performance des digues

La segmentation dynamique est une méthode qui permet d'associer à un objet linéaire unique, différentes entités positionnées par rapport à cet objet et dont les caractéristiques sont modifiables sans avoir besoin de modifier l'objet linéaire lui-même.

Cette méthode se déroule en plusieurs étapes (Fig. 11.18) :

- on crée dans le SIG une couche linéaire (dans notre cas, la digue) divisée en sous-parties chacune identifiée par un ID unique.
- on crée une base de données contenant la liste des événements associés aux différentes parties de la couche.
- le SIG permet alors de faire le lien entre la couche et la base de données par l'intermédiaire de l'identifiant de chaque sous-partie.
- la fonctionnalité de segmentation (en natif sous ArcGis) crée alors une nouvelle couche de polygones associant chaque sous parties aux événements qui la concerne.

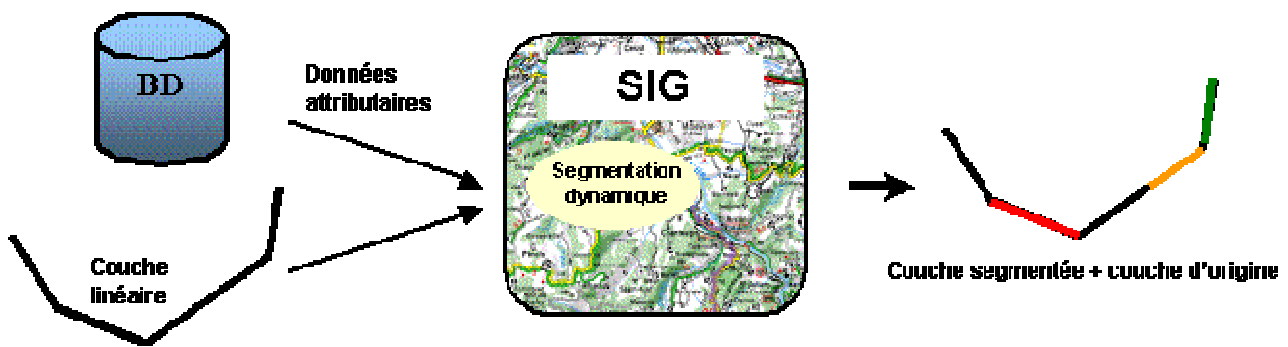


Figure 11.18. Le principe de la segmentation dynamique

Nous utilisons cette fonctionnalité pour cartographier la performance des digues.

11.2.4. Synthèse

Nous avons proposé une intégration du modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues et du SIRS Digues. Cette intégration a nécessité des adaptations provisoires de la structure de la base de données du SIRS Digues dans sa version actuelle.

Nous sommes en mesure, en utilisant la base de données modifiée de l'application, les potentialités d'ArcGis comme la segmentation dynamique, et un programme de calcul de la performance des digues issu du modèle multicritère d'évaluation développé dans le langage Visual Basic, d'évaluer la performance des digues au sein du SIRS Digues et d'en cartographier les résultats.

Nous avons ainsi augmenté les potentialités d'analyse spatiale du SIRS Digues, ce qui en fait un véritable Système d'Aide à la Décision à Référence Spatiale puisqu'il répond maintenant aux spécificités d'un tel système définies par (Densham, 1991).

Nous proposons de tester les nouvelles potentialités du SIRS Digues en calculant la performance d'une digue de l'Hérault.

11.3. Validation du modèle multicritère d'évaluation de la performance sur une digue réelle

11.3.1. Objectif

L'objectif de cette étude de terrain est de tester, d'une part, la capacité du modèle d'évaluation multicritère de la performance des digues à rendre compte d'une situation réelle, d'autre part, l'aptitude du SIRS Dignes et du modèle multicritère intégré à fournir une aide à la décision aux gestionnaires locaux de digues.

Pour cela, nous cherchons à évaluer la performance d'une digue test vis à vis du mécanisme d'érosion interne. Nous avons considéré que la digue choisie (Cf. 11.3.2), du fait de la présence d'un mur maçonné, puis d'un parement bétonné tout le long de la digue, correspondait au modèle de digue à étanchéité amont que nous avons élaboré. En effet, ces deux composants ont pour fonction d'assurer l'étanchéité de la digue. Nous avons alors, à partir des données collectées, évalué les 13 critères de l'arbre de défaillance relatif au mécanisme d'érosion interne pour pouvoir évaluer la performance de la digue par rapport à ce mécanisme.

11.3.2. La digue étudiée

La digue étudiée protège la ville de Cazouls d'Hérault (département 34) contre les crues (Fig. 11.19).

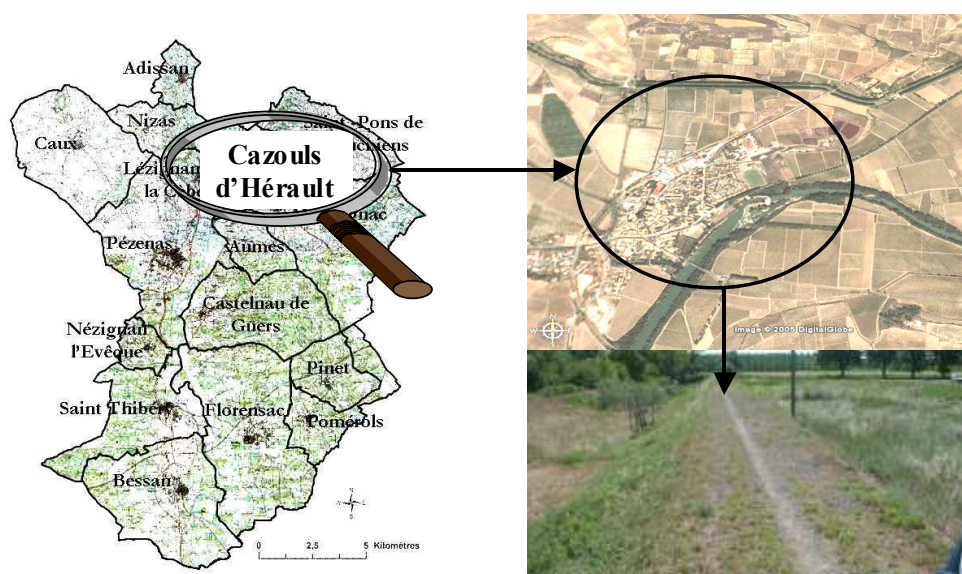


Figure 11.19. Localisation de la digue de Cazouls d'Hérault

Cette digue retient les eaux de deux cours d'eau : les eaux de l'Hérault (en rive droite) et les eaux de son affluent, la Boyne (en rive gauche). C'est une digue dite de « ceinture » car elle n'est pas située le long d'un cours d'eau, mais autour de la ville. En conséquence, la ville est protégée des crues, ce qui n'est pas le cas de la totalité de la vallée.

L'ouvrage, raccordé au coteau en ses deux extrémités. Il mesure environ 1 870 mètres de longueur pour 4 à 4,6 mètres de hauteur maximale par rapport au terrain naturel côté ville. Il a été construit au 20^{ème} siècle consécutivement à la crue de 1907. Cette digue est constituée, en général, d'un remblai de 2,5 à 3 mètres de largeur en crête dont le talus côté cours d'eau est revêtu d'un perré en béton incliné d'une quarantaine de centimètres d'épaisseur (Fig. 11.20).



Figure 11.20. Talus côté cours d'eau revêtu d'un perré en béton incliné

Sur quelques 230 mètres à partir de l'extrémité Sud-Ouest de la digue, la structure côté cours d'eau est formée d'un mur en maçonnerie sur lequel s'appuie le remblai (Fig. 11.21), dont la crête est alors très étroite (Mériaux *et al.*, 2005).



Figure 11.21. Structure côté cours d'eau formée d'un mur en maçonnerie

Cette digue a fait l'objet d'un diagnostic par un bureau d'étude (ISL, 2001) pour répondre à une demande de la commune et des services de l'Etat d'évaluer les mécanismes de rupture de la digue. Cette mission a comporté plusieurs étapes :

- l'établissement d'un plan topographique au 1/500^{ème} utilisé comme support de l'étude ;
- l'analyse des documents existants ;
- la visite détaillée de l'ouvrage avec relevé de désordres ;
- la réalisation de trois sondages avec prélèvement dans le corps de la digue et dans sa fondation.

A la fin de la mission a été rédigé un rapport technique présentant successivement :

- les pathologies de nature à induire la rupture de l'ouvrage ;
- l'état de la digue par tronçon homogène ;
- les recommandations d'intervention.

Cette étude nous a permis de connaître l'état général de l'ouvrage, de disposer d'un plan détaillé de l'ouvrage et de vérifier l'hypothèse qu'il s'agissait bien d'une digue à étanchéité amont. Au moment du relevé des données sur la digue, nous avons pu comparer celles-ci aux données relevées lors de l'étude citée, afin de vérifier que nous n'avions pas oublié de données importantes. Cette étude nous a permis ensuite de la comparer à nos résultats d'évaluation de la performance de la digue (Cf. 11.3.5.3).

11.3.3. La collecte des données

Nous avons passé une demi-journée sur la digue, en compagnie d'un expert des digues et de deux spécialistes du SIRS Dignes, à relever des données en utilisant les fiches de saisie spécifiques du SIRS Dignes. Durant ce laps de temps, nous avons parcouru environ 1 km de digue et relevé les informations concernant les désordres, la présence de végétation, de réseaux de voirie ou encore d'autres ouvrages traversant sur la digue.

Le matériel utilisé pour ces relevés a été le suivant :

- un GPS pour relever les coordonnées précises des points où se situaient les différents désordres sur la digue ;
- un toponomètre pour mesurer la distance entre le début de la digue et les différentes informations relevées sur le terrain ;
- les fiches de saisies pour noter les différents phénomènes observés sur la digue ;
- un appareil photo numérique. L'intérêt ici était de garder une trace visuelle du terrain, notamment en cas d'oubli lors du remplissage des fiches de saisie.

11.3.4. La saisie des données

La première étape de la saisie des données dans le SIRS Dignes a consisté en la création de la géométrie du tronçon de digue sur lequel nous avons collecté les données ainsi que d'un système de repérage propre au tronçon. Voici résumée la démarche effectuée :

- nous avons créé sous ArcMap une digue dénommée « Cazouls » composée d'un seul tronçon de gestion qu'on affecte à une digue de la base. Pour cela, nous avons importé dans la base cartographique les points GPS relevés sur le terrain préalablement convertis dans le bon système de coordonnées (ici, Lambert III) ;
- nous avons créé, à partir de l'outil prévu à cet effet dans le SIRS Dignes, un ensemble de bornes (virtuelles dans notre cas) affectées à ce tronçon. Cette opération a permis par la suite de mettre en place le système de repérage.

Dans notre cas, nous avons choisi de créer une borne virtuelle approximativement tous les 100 mètres.

Nous avons alors établi un nouveau système de repérage propre à cette digue à l'aide du fichier de bornes préalablement créé. Ceci permet d'obtenir une représentation cartographique de la digue de Cazouls d'Hérault (Fig. 11.22).

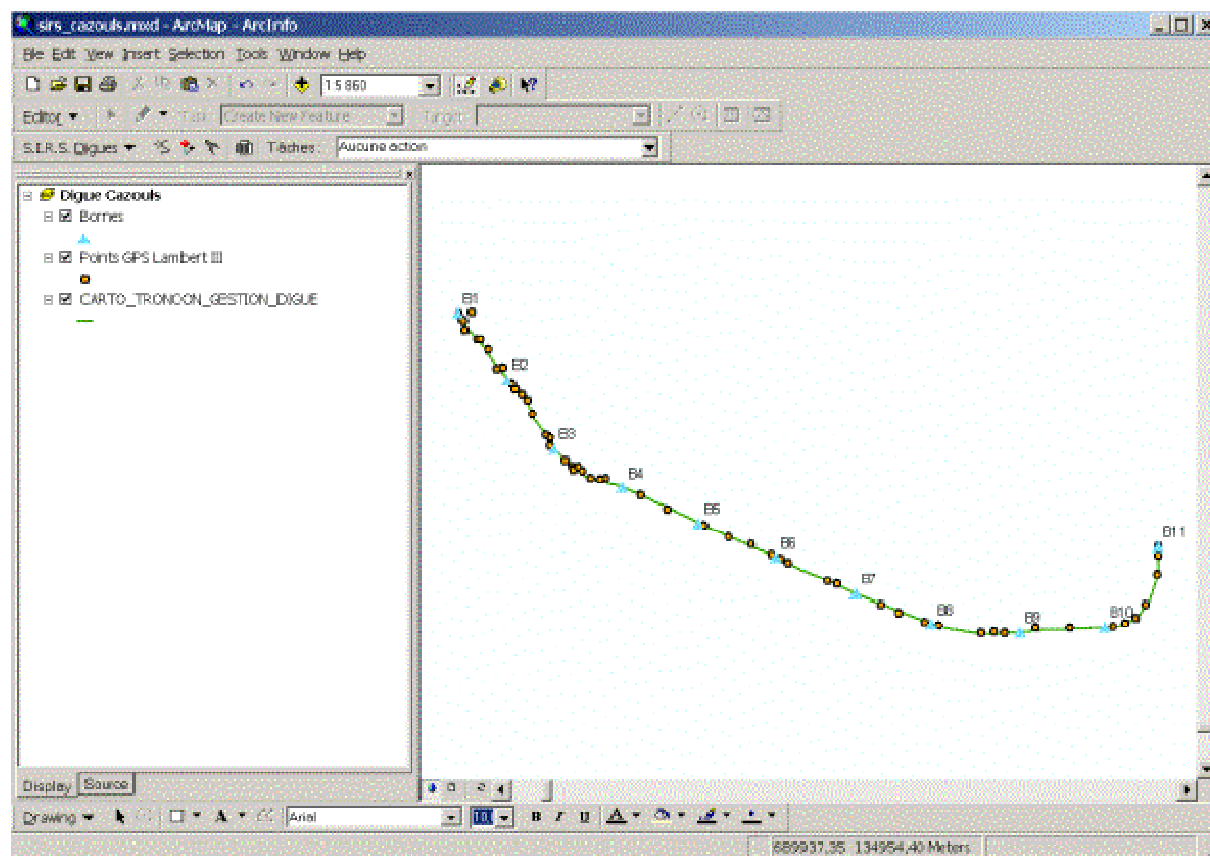


Figure 11.22. Création du tronçon de gestion de la digue de Cazouls d'Hérault avec son système de repérage (Prévot, 2005)

La base de données a alors été renseignée à partir des données relevées sur la digue (Fig. 11.23).

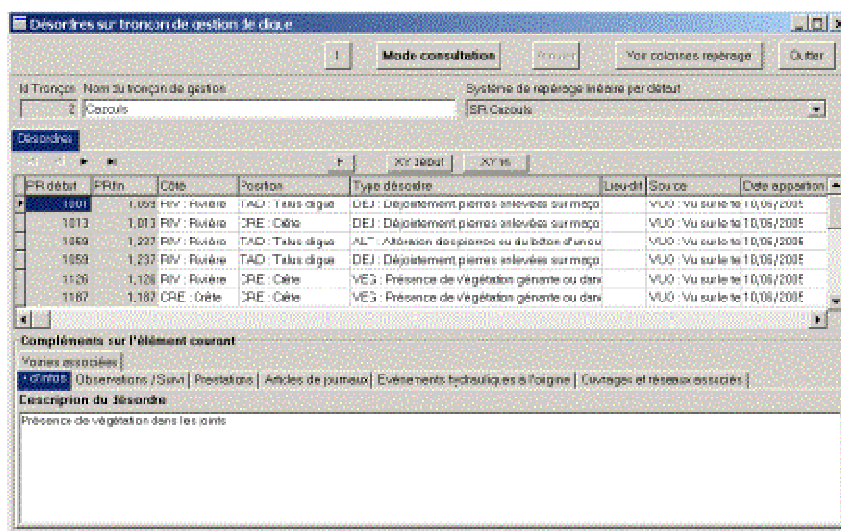


Figure 11.23. Module de saisie et de consultation de données du SIRS Digues

Les données saisies, nous procédons au calcul de la performance de la digue de Cazouls vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne en utilisant l'interface logicielle présentée à la figure 11.17.

11.3.5. La restitution des résultats

Les résultats sont restitués sous la forme d'une carte et d'un tableau qui récapitulent les scores des critères à partir desquels a été calculée la performance de la digue.

11.3.5.1. La carte

La segmentation dynamique nous permet de localiser sur la carte les événements stockés dans la table. Elle permet d'associer des jeux d'attributs multiples à chaque portion d'entité linéaire. Une fois ces événements localisés, il reste à proposer un rendu cartographique pour afficher le niveau de performance de chaque tronçon de digue.

Dans notre cas nous avons mis au point l'échelle de couleur suivante (Fig. 11.24) :

	0	Excellent
	1 – 2	Bon
	3 – 4	Passable
	5 – 6	Médiocre
	7 – 9	Mauvais
	10	Inacceptable

Figure 11.24. Légende utilisée pour la représentation de l'indicateur de performance relatif à l'érosion interne

Le résultat cartographique s'affiche directement dans la fenêtre d'ArcGis et présente le tronçon étudié coloré suivant la légende ci-dessus (Fig. 11.25).

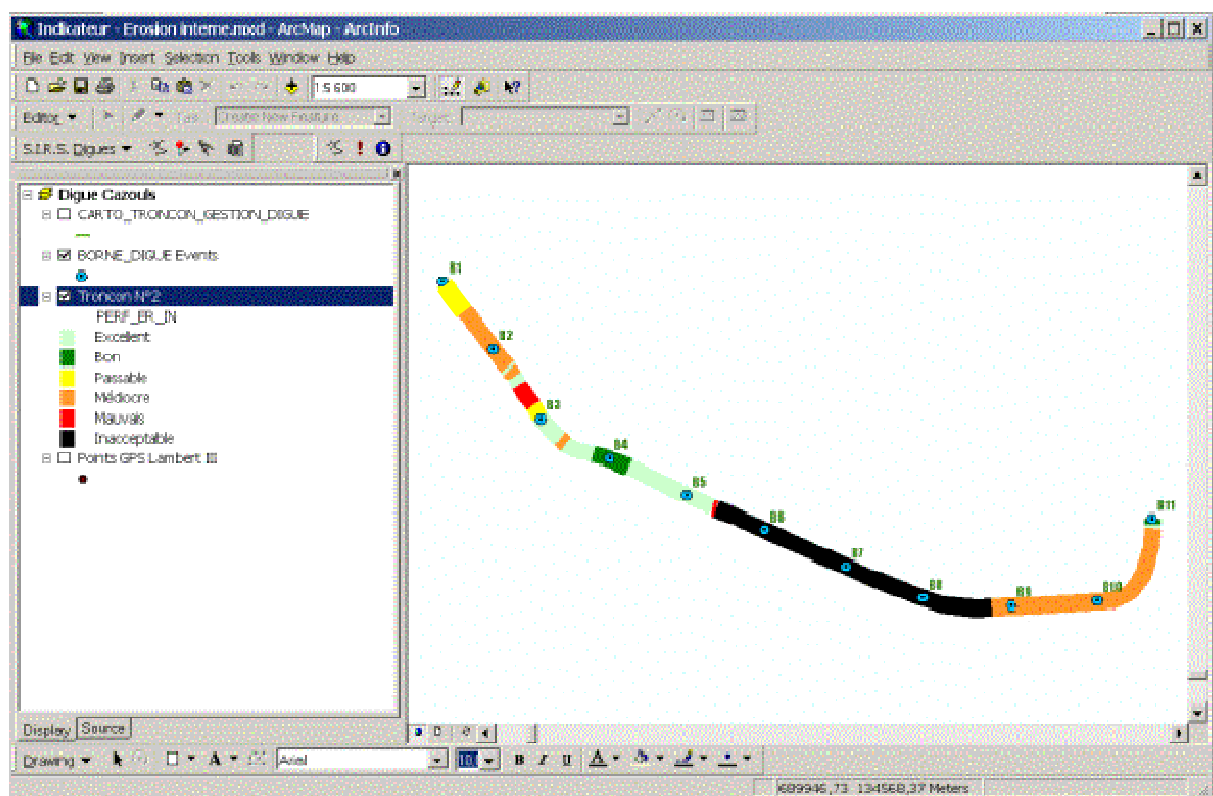


Figure 11.25. Visualisation de la performance vis à vis du mécanisme d'érosion interne dans le SIRS Digues (Prévoit, 2005)

11.3.5.2. Tableau récapitulatif

Les résultats cartographiques obtenus mettent bien en évidence le niveau de performance de la digue de Cazouls d'Hérault.

Mais pour déclencher une intervention sur l'ouvrage, il peut être intéressant pour le gestionnaire de retrouver de manière simple et rapide les critères qui ont contribué à fournir le résultat de la performance de la digue. En effet, si le niveau de performance atteint est consécutif par exemple, à la présence de végétation ou à celle d'un ouvrage traversant, les moyens à mettre en oeuvre pour améliorer la performance de la digue seront vraisemblablement différents.

Il est vrai que le gestionnaire peut, en utilisant les fonctionnalités actuelles du SIRS Dignes, retrouver les données de départ qui ont contribué au résultat du calcul de la performance. Cependant, cette opération peut être assez longue et fastidieuse.

C'est pourquoi nous avons enrichi le SIRS Dignes d'une fonctionnalité supplémentaire permettant, en « cliquant » directement sur n'importe quel tronçon de digue dont la performance est évaluée, d'ouvrir une page HTML qui présente sous la forme d'un tableau l'ensemble des scores des critères ayant contribué au résultat final du calcul de la performance.

ArcGis permet en effet d'associer une partie de couche d'information étudiée à une page HTML et cette fonctionnalité est paramétrable directement à partir du langage Visual Basic. Ainsi sa mise en oeuvre au sein du module de calcul de la performance permet, lors de la génération de la couche d'informations, de générer « à la volée » un tableau HTML pour chaque sous-tronçon de la digue.

Pour visualiser les résultats, il suffit alors d'activer l'outil « Hyperlink » dans la barre d'outils et de cliquer sur la zone de la digue qui nous intéresse. La page HTML résultat s'ouvre alors automatiquement (Fig. 11.26).

Tableau des résultats

Tronçon n°2
Sous tronçon n°18
PR DEBUT: 1,43033 - PR FIN: 1,77603
Score MAX retenu pour cette partie du tronçon

Excellent Bon Passable Médiocre Inacceptable

PR DEBUT	PR FIN	CRITERE	COMMENTAIRE	SCORE
1,48862	1,49862	Racines dans le corps de digue	Présence de grands arbres vivants et épars	7
1,56012	1,57012	Racines dans le corps de digue	Présence de grands arbres morts et épars	8
1,75232	1,76232	Racines dans le corps de digue	Présence de grands arbres vivants et épars	7
1,40709	1,46734	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	
1,40709	1,46734	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	
1,43333	1,44333	Racines dans la recharge amont étanche	Présence de grands arbres vivants et penchés en contact avec le dispositif d'étanchéité	9
1,40709	1,77103	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	
1,40709	1,51537	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	
1,43333	1,44333	Racines dans la recharge amont étanche	Présence de grands arbres vivants et penchés en contact avec le dispositif d'étanchéité	9
1,51537	1,6338	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	
1,57156	1,58156	Racines dans la recharge amont étanche	Présence de grands arbres hors du dispositif d'étanchéité	5
1,6338	1,65735	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	3
1,65735	1,69155	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	3
1,65735	1,69155	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	3
1,68855	1,69855	Racines dans la recharge amont étanche	Présence de grands arbres vivants en contact avec le dispositif d'étanchéité	8
1,69155	1,77103	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	
1,77103	1,99176	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	3
1,77103	1,85961	Racines dans la recharge amont étanche	Pas d'infos concernant la végétation	
1,43833	1,46734	Erosion dans la recharge amont étanche	100% de la recharge amont étanche érodée	10
1,43833	1,77103	Erosion dans la recharge amont étanche	100% de la recharge amont étanche érodée	10
1,76603	1,77603	Erosion dans la recharge amont étanche	100% de la recharge amont étanche érodée	10
1,76603	1,77603	Erosion dans la recharge amont étanche	Erosion ou glissement superficiel	6
1,77103	1,99176	Erosion dans la recharge amont étanche	Erosion ou glissement superficiel	6

Figure 11.26. Page HTML récapitulant les critères et leurs scores ayant participé à l'évaluation de la performance du tronçon de digue (Prévot, 2005)

Dans ce cas, le tronçon analysé est celui coloré en noir sur la figure 11.23 et dont le niveau de performance est inacceptable. Le tableau nous indique que les critères les plus défavorables vis à vis de la performance sont relatifs à la présence de végétation et au mauvais état du composant d'étanchéité (recharge amont étanche) qui est pour ce tronçon de digue un parement bétonné.

11.3.5.3. Evaluation de la qualité des résultats

Si on compare les résultats fournis par le modèle, au moyen de la carte de la figure 11.23, avec l'étude de diagnostic réalisée sur cette digue (ISL, 2001), on se rend compte que

globalement, les tronçons de digues dont la performance vis à vis du mécanisme d'érosion interne est médiocre ou inacceptable, se dégagent de la même manière. Le découpage de la digue en tronçons reflétant le niveau de performance est sensiblement analogue.

Cela s'explique en partie du fait de l'utilisation d'une méthode multicritère qui prend en compte de manière très précise le raisonnement des experts. Toutefois, il semble qu'on ne puisse pas aller beaucoup plus loin dans la comparaison des deux études. En effet, notre légende comporte six niveaux alors que celle utilisée par le cabinet d'étude n'en comporte que trois.

Nous avons également présenté les résultats fournis par le modèle multicritère à des experts du domaine des digues qui ont une bonne connaissance de la digue de Cazouls d'Hérault. D'une manière générale, ils considèrent que les niveaux de performance des tronçons sont en accord avec l'état actuel de l'ouvrage. Le modèle multicritère représente la réalité de manière précise pour les tronçons dont les scores sont compris entre 0 et 4 puis entre 7 et 10. Pour la plage des scores variant de 5 à 6, les résultats sont moins probants. En l'occurrence, les experts considèrent que les tronçons affectés dans la classe « médiocre » (score 5 à 6) auraient plutôt dû être affectés dans la classe « passable » (score 3 à 4). Pour autant, il est trop tôt pour remettre en cause la modèle car nous ne l'avons testé que sur une digue. De plus cette digue présente un profil particulier : cet aspect peut expliquer les écarts entre les résultats fournis par le modèle et l'état réel de la digue à dire d'experts.

Nous avons également sollicité l'avis des experts pour connaître leur opinion sur l'apport de l'outil en terme d'aide à la décision. Selon eux, la contribution d'un tel outil est significative car :

- le gestionnaire peut retrouver facilement les critères à l'origine du niveau de performance atteint.
- la longueur des tronçons découpés selon le niveau de performance est adaptée aux interventions des gestionnaires (tout au moins sur la digue de Cazouls d'Hérault) ;

Pour le cas précis de cette étude, on peut considérer que l'aide à la décision fournie est satisfaisante. Toutefois, il faut prendre en compte que la digue étudiée était de faible longueur (environ 2 kilomètres) et que le calcul de la performance n'a été réalisé que pour un seul mécanisme de rupture.

Des tests sur des ouvrages plus longs et pour l'ensemble des mécanismes s'avèrent indispensables pour vérifier plus précisément l'aide réelle qu'apporte notre outil.

11.3.6. Synthèse

Cette étude a montré tout d'abord la faisabilité technique de l'évaluation de la performance des digues dans le SIRS Dignes. Nous avons mis en place les adaptations nécessaires dans la base de données du SIRS Dignes pour pouvoir utiliser les données dont nous avons besoin dans le modèle multicritère pour évaluer la performance des ouvrages. Ce prototype est maintenant fonctionnel. Toutefois, dans le cadre d'un développement futur pour une utilisation effective de cette fonctionnalité par les gestionnaires, il sera nécessaire de modifier, en partie, la structuration actuelle de la base de données du SIRS Dignes.

Ensuite, nous avons pu tester la capacité du modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues à représenter une situation réelle (digue de Cazouls d'Hérault).

Grâce à l'outil de génération de pages HTML, nous pouvons retrouver facilement les critères en cause dans l'évaluation de la performance. Cet aspect est primordial pour une transparence totale de la méthode et une appropriation par les gestionnaires. Ainsi, le SIRS Dignes, une fois enrichi de telles fonctionnalités analytiques, constituera un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires locaux de digues.

Il serait intéressant pour améliorer encore le modèle multicritère de réaliser des tests supplémentaires sur d'autres digues. Cela nous permettrait, au besoin, de rajouter ou de modifier des règles d'affectation pour augmenter la sensibilité du modèle.

Chapitre 12 : Perspectives

12.1. Recherche et développement

Afin de valoriser les méthodes développées dans cette recherche, il nous semble important de poursuivre des travaux relevant de la recherche et développement. Ainsi, deux axes principaux doivent être engagés à court terme :

- poursuivre et achever l'évaluation de la performance des digues pour l'ensemble des mécanismes de rupture modélisés (surverse, érosion interne, érosion externe, glissement) et pour les trois modèles structurels de digues présentés à la figure 6.10 (digue à étanchéité amont, digue à étanchéité interne, digue en maçonnerie) ;
- continuer l'intégration de tous les modèles multicritères d'évaluation de la performance des digues et du SIRS Digues.

12.1.1. L'évaluation de la performance des digues vis à vis de l'ensemble des mécanismes

L'évaluation de la performance des digues, à l'aide d'indicateurs d'état et de critères, puis d'une méthode multicritère, constitue une avancée significative dans le cadre de l'aide à la décision en matière de maintenance pour les gestionnaires de digues locaux.

Au cours de notre recherche, nous avons appliqué les méthodes développées uniquement sur un type de digue (les digues à étanchéité amont) et sur un mécanisme de rupture (le mécanisme d'érosion interne).

Le travail restant à produire pour achever l'outil d'aide à l'évaluation de la performance des digues peut être résumé selon les quatre points suivants :

- terminer l'évaluation de la performance des digues à étanchéité amont pour ***l'ensemble de leurs mécanismes de rupture***, c'est à dire construire tous les indicateurs de performance pour chacun des mécanismes en déterminant avec les experts les règles multicritères d'affectation ;
- achever l'analyse fonctionnelle et l'AMDE des ***digues à étanchéité interne*** et des ***digues en maçonnerie*** ;

- construire, à l'aide du modèle fonctionnel de rupture de digue, la totalité des scénarios de rupture des *digues à étanchéité interne* et des *digues en maçonnerie* sous la forme de graphes causaux et d'arbres de défaillances ;
- déterminer les indicateurs d'état et les critères à utiliser dans le cadre de l'évaluation multicritère de la performance de ces deux derniers types de digues.

Ces étapes réalisées, il sera alors possible d'évaluer la performance de chaque type de digues pour chacun de leurs mécanismes de rupture. A ce stade, il sera donc intéressant de développer de nouvelles règles multicritères pour agréger, pour un profil de digues donné, la performance de chacun des mécanismes de rupture et obtenir ainsi la performance générale de la digue.

A l'issu du travail conduit dans notre recherche, il conviendra de mobiliser à nouveau le groupe d'experts spécialisé dans les ouvrages hydrauliques, à travers des réunions de travail régulières pour définir l'ensemble des règles multicritères d'évaluation de la performance des digues.

12.1.2. L'intégration dans le SIRS Digues

Le deuxième axe de recherche et développement porte sur l'intégration dans la version actuelle du SIRS Digues de tous les modèles d'évaluation de la performance des digues pour chaque profil structurel de digue.

Pour cela deux démarches paraissent envisageables :

- soit on intègre les modèles d'évaluation multicritère en adaptant la base de données actuelle du SIRS Digues au fil du travail des experts ;
- soit on propose une refonte de la structure de la base de données en la complétant notamment avec de nouvelles tables relatives à l'évaluation des différents critères.

Le choix de la démarche sera conditionné par l'objectif fixé à court terme. En effet, si on souhaite, dans un premier temps, ne démontrer que la faisabilité technique de l'intégration et tester rapidement les modèles multicritères, on peut se contenter de la première démarche. Si on souhaite, au contraire, favoriser la manipulation simple des nouvelles fonctionnalités de l'outil à destination des gestionnaires locaux de digues, pour une première phase expérimentale sur site, la deuxième démarche doit être favorisée.

Ensuite il faudra concevoir une méthode d'agrégation des niveaux de performance obtenus pour chacun des mécanismes de rupture afin d'arriver à un indicateur de performance synthétique de la performance générale de la digue.

Enfin, pour éviter d'arriver à un découpage entraînant une multitude de micro-tronçons, il restera à développer une méthode d'agrégation longitudinale de ces micro-tronçons pour arriver à des longueurs compatibles avec des opérations de maintenance. En effet, le SIRS Dignes, enrichi de telles fonctionnalités est destiné à aider le gestionnaire dans la priorisation de ses interventions. Or, des tronçons multiples et trop petits peuvent déboucher, au contraire, sur une vision encore plus difficile à interpréter.

12.2. Validation et transfert vers les gestionnaires

Les méthodes proposées et leur intégration dans le SIRS Dignes ne peuvent pas être utilisées en l'état par les gestionnaires locaux de digues. Nous proposons donc une mise en oeuvre en deux phases chronologiques :

- phase de test : cette étape de validation est destinée à vérifier plus en détail la capacité des méthodes multicritères d'évaluation de la performance des digues à représenter les situation réelles ;
- phase opérationnelle : cette étape d'utilisation vise à proposer un premier prototype pour les gestionnaires de digues en vue d'une découverte de l'outil, de son appropriation progressive, et d'éventuelles propositions d'amélioration pour arriver à une version opérationnelle.

12.2.1. Phase de validation

A l'heure actuelle, un seul test sur le terrain a été réalisé : nous l'avons présenté en détail dans le chapitre précédent. Pour valider ou apporter des modifications à notre modèle, de nouveaux tests sur le terrain avec des données réelles devront être menés en intégrant, d'une part, tous les types de digues, d'autre part, tous les mécanismes de rupture.

Pour tester la sensibilité du modèle, il conviendra d'appliquer les méthodes proposées sur des digues anciennes très dégradées, mais aussi sur des digues nouvelles ou confortées récemment.

Une première forme de validation consisterait à comparer la performance des différents tronçons de digue calculée par notre modèle avec le comportement de la digue en situation de crue.

Une alternative pourrait consister à analyser une digue ayant déjà connu des ruptures, dans l'état où elle était avant la crue, et d'observer si les résultats fournis par le modèle correspondent à la réalité. La difficulté consiste dans ce cas à retrouver dans les archives (lorsqu'elles existent) les informations relatives aux tronçons ayant subi les mécanismes de rupture.

12.2.2. Phase de transfert

Une fois le modèle validé, il deviendra alors envisageable de proposer aux gestionnaires de digues ces nouvelles fonctionnalités du SIRS Digues pour disposer d'indicateurs de performance des digues.

Des démonstrations pourraient être réalisées pour, par exemple :

- évaluer la performance du parc de digues du gestionnaire pour chacun des mécanismes à un instant donné ;
- simuler des réparations sur les tronçons de faible performance et relancer le calcul pour visualiser l'effet des travaux sur la performance de l'ouvrage.

Ces démonstrations pourraient servir de base à des discussions avec les gestionnaires pour connaître leurs avis sur ces nouvelles fonctionnalités et leurs permettre d'affiner l'expression de leurs besoins en vue du développement d'une version opérationnelle dans le SIRS Digues.

Nous pensons que les bureaux d'études spécialisés dans la sécurité des digues pourraient également être intéressés par un tel outil.

Une autre piste de développement consisterait à combiner le niveau de performance des digues avec les enjeux des zones qu'elles protègent. Le SIRS Digues, permet, comme tout SIG classique doté de fonctionnalités d'analyse spatiale, de superposer et de croiser plusieurs couches d'informations. Ainsi, les gestionnaires de digues et les responsables des zones protégées disposeraient de critères supplémentaires d'aide à la décision pour s'orienter vers une gestion plus intégrée du risque d'inondation grâce à une meilleure prise en compte de l'aléa technologique de rupture de digue.

* * *

*

Conclusion

La mission principale des gestionnaires de digues est d'assurer le bon fonctionnement de leur parc d'ouvrages en période de crue, afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens protégés, tout en optimisant les dépenses liées à cette gestion. Face à un linéaire de digues important et avec un budget dédié à la maintenance nécessairement limité, les gestionnaires doivent établir des choix d'intervention sur leurs ouvrages et hiérarchiser leurs actions de maintenance. Ainsi, les tronçons de digues dont le niveau de performance est jugé faible, doivent être remis à niveau prioritairement.

Pour assister les maîtres d'ouvrages dans leurs choix, nous avons développé des méthodes pour évaluer la performance des digues et nous les avons ensuite intégrées à un système d'information géographique existant : le SIRS Digues. Au final, nous disposons de méthodes et d'un outil d'aide à la gestion des digues, permettant d'évaluer la performance des ouvrages vis-à-vis des différents mécanismes de rupture à l'aide d'indicateurs de performance, de géoréférencer et de visualiser le niveau de performance des différents tronçons de digues.

Nos premiers résultats concernent la modélisation des mécanismes de rupture des digues. Ils comportent :

- en développement, la réalisation de l'analyse fonctionnelle des digues ;
- en recherche, l'adaptation de la méthode AMDE à notre contexte et la proposition d'un modèle de représentation des scénarios au moyen de graphes causaux puis d'arbres de défaillance.

Les arbres de défaillance présentent l'avantage de proposer une vision synthétique des mécanismes de rupture et résumant les phénomènes qui y sont impliqués. Ce modèle de rupture enchaîne des séquences fonctionnelles de défaillance et structure l'information liée aux mécanismes de rupture autour de trois variables : indicateur, phénomène et fonction. Dans un cadre plus applicatif, il sert de base à l'établissement de la collection des mécanismes de rupture des digues et à la collecte d'informations expertes destinées à l'évaluation de la performance des digues.

La deuxième famille de résultat intéresse la construction d'indicateurs de performance des digues destinés à évaluer la capacité des digues à résister aux sollicitations auxquelles elles sont soumises. Nous avons bâti, à partir des indicateurs issus des scénarios de rupture, un système d'indicateurs d'état et de critères destiné à l'évaluation de la performance des digues.

Tout d'abord, les indicateurs d'état sont évalués par les experts du domaine pour chaque mécanisme de rupture à partir d'une échelle commune de notation. A partir des scores de chaque indicateur d'état, nous proposons ensuite une méthode d'agrégation permettant d'obtenir les critères.

Après avoir étudié les méthodes d'aide à la décision multicritère, nous avons formalisé notre problème de décision. Nous utilisons la méthode d'affectation à base de règles qui est apparue la mieux adaptée pour répondre à notre problème de décision multicritère : évaluer la performance des digues à partir de plusieurs critères et trier les tronçons de digues selon leur niveau de performance. L'utilisation de cette méthode permet d'évaluer les indicateurs de performance des digues et d'affecter ainsi un score de performance pour chaque mécanisme de rupture.

La dernière famille de résultat concerne l'intégration du modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues dans l'outil SIRS Digues. Nous avons adapté la base de données du SIRS Digues pour intégrer les informations nécessaires au modèle multicritère d'évaluation de la performance des ouvrages. Ainsi, un premier outil prototype d'aide à la décision a été proposé. Il permet, d'une part, de cartographier la performance des tronçons de digues, d'autre part, d'accéder aux scores des critères rentrant dans l'évaluation de la performance d'un tronçon.

Afin d'apprécier leurs intérêts et leurs limites, les méthodes d'analyse de la performance et le modèle multicritère proposés ont été mis en œuvre sur une digue réelle à étanchéité amont et pour un mécanisme donné (le mécanisme d'érosion interne). L'analyse critique de ces résultats montre que :

- a) le modèle fonctionnel d'écriture des scénarios apparaît bien adapté à nos objectifs de représentation des mécanismes de rupture des digues. Il permet de structurer la connaissance experte et présente d'intéressantes qualités de synthèse. Ce modèle a servi de base à l'évaluation de la performance des ouvrages et à l'interview des experts pour la définition des règles d'affectation. Il a été consensuel au sein des experts du domaine.
- b) la capacité du modèle multicritère à évaluer la performance d'une digue réelle a été vérifiée. En comparant les résultats obtenus par nos modèles et ceux issus du diagnostic établi par des experts (sans nos méthodes), il en ressort des conclusions

sensiblement analogues. Toutefois, il est difficile de conclure définitivement, la comparaison n'ayant été faite que sur un seul cas d'ouvrage réel. Pour cela, il conviendrait de poursuivre plus amplement ces analyses sur cas réels et d'éventuellement ajuster et modifier les règles affectées à chaque critère et leurs seuils associés.

- c) la faisabilité technique de l'évaluation de la performance des digues dans le SIRS Dignes a été vérifiée. Cet outil, enrichi de fonctionnalités d'aide à la décision, permet de cartographier et de visualiser la performance de chaque tronçon de digues. Pour devenir un outil prototype entièrement fonctionnel, des développements importants supplémentaires restent à produire : adaptation de la base de données actuelle, intégration des indicateurs de performance pour l'ensemble des mécanismes, agrégation linéaire des valeurs de performance le long d'un tronçon.

Au final, nous avons produit des méthodes d'évaluation des digues, prenant en compte l'ensemble des mécanismes de rupture auxquels une digue est potentiellement soumise et intégrant les aléas et l'environnement extérieur (crues, végétation, animaux, actions de l'homme...). Ces méthodes reposent sur la définition d'indicateurs de performance pouvant être intégrés à un système d'information géographique. A ce titre, nous avons enrichi le SIRS Dignes de fonctionnalités d'analyse multicritère : il constitue ainsi les bases d'un outil prototype d'aide à la décision, destiné, à moyen terme, à être utilisé par les gestionnaires locaux de digues. Il permet de répondre à notre problématique, puisque avec ce nouvel outil, un gestionnaire peut déterminer des priorités d'interventions sur les digues, en fonction du niveau de leur performance.

Pour valoriser ces méthodes, des travaux complémentaires vont être réalisés à court terme suivant deux directions :

- un axe de recherche visant, d'une part, à poursuivre et achever l'évaluation de la performance des digues pour l'ensemble des mécanismes de rupture et pour les trois modèles structurels de digues, d'autre part, à continuer l'intégration de tous les modèles multicritères d'évaluation de la performance des digues et du SIRS Dignes ;

- un axe de développement et d'accompagnement subdivisé en deux étapes chronologiques : la vérification détaillée de la capacité des méthodes multicritères d'évaluation de la performance des digues à représenter les situation réelles, suivi de la diffusion d'un premier prototype opérationnel chez les gestionnaires de digues.

A long terme, une première perspective de ce travail consisterait à modéliser les incertitudes sur les données utilisées, notamment dans le cadre de l'évaluation de la performance. Des méthodes comme la théorie des sous ensemble floue pourraient être appliquées, d'une part, aux données de base recueillies sur les digues, d'autre part, aux jugements des experts au moment de l'évaluation experte de la performance pour chacun des mécanismes de rupture des digues. Nos travaux s'inspireront des démarches développées dans le domaine des conduites d'eau dans le bâtiment, des réseaux d'assainissement et de la haute qualité environnementale des bâtiments.

Un deuxième axe de recherche concerne le système d'aide à la décision. Dans l'état actuel, les méthodes et outils d'aide à la décision que nous apportons aux gestionnaires reposent sur l'aspect « analyse de la performance des digues ». Pour améliorer les informations de prise de décision destinées au gestionnaire, il conviendrait à terme d'intégrer des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité de la zone protégée par la digue. Ceci constitue un axe de recherche à part entière. Des recherches sur cette thématique sont en cours au sein des laboratoire GUEH et CEREVE de Marne la Vallée.

Enfin, lorsque nous disposerons de données suffisantes pour analyser et modéliser les détériorations des digues et leurs facteurs explicatifs, des méthodes statistiques pourront être envisagées sur certains parc de digues particulièrement bien documentés. A l'instar de la pratique constatée sur des ouvrages de génie civil de grand linéaire tel que les réseaux enterrés, ce type d'analyse permettrait de produire une évaluation du fonctionnement et des défaillances des digues. Ce point constitue également à terme un axe de recherche pertinent.

Bibliographie

- Aangeenbrug R. T.** (1991). A critique of GIS. In: Maguire D. J., Goodchild M. F. and Rhind D., *Geographical Information System: Principles and Applications*. Longman, 101-107 p.
- Abraham D. M., Wirahadikusumah R., Short T. J., Shahbahrami S.** (1998). *Optimization modelling for sewer network management*. *Journal of construction engineering and management ASCE*, vol 124, n°5, pp. 402-410
- AFNOR.** (1988). *Norme expérimentale X60-500 Terminologie relative à la fiabilité - maintenabilité - disponibilité*. 44 p.
- AFNOR.** (1996). *Norme homologuée NF EN1325-1 Vocabulaire du management de la valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle - Partie 1 : analyse de la valeur et analyse fonctionnelle*.: 24 p.
- AFNOR.** (2001). *Norme homologuée NF EN13306 Terminologie de la maintenance*. 59 p.
- AUGC.** (2003a). *Le développement durable en génie civil, 22ème Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Volume 1: 477 p.
- AUGC.** (2003b). *Le développement durable en génie civil, 22ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, "Prix René Houpert"*. Volume 2: 278 p.
- Azibi R.** (2003). *Construction de critères en aide à la décision : aspects méthodologiques, techniques et pratiques*. Paris: Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine, 160 p.
- Azzout Y.** (1996). *Aide à la décision appliquée au choix des techniques alternatives en assainissement pluvial*. Lyon: Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 245 p.
- Belouze P.** (1999). *Connaissance et gestion des endiguements de protection contre les inondations. Etude préalable à la mise en place d'un Système à Références Spatiales. Première étape : Diagnostic stratégique*. Rapport Cemagref, 58 p.
- Berthaud C.** (2004). *Proposition d'une méthode d'intégration d'indicateurs de performance des digues dans le SIRS Dignes*. Rapport de stage pour l'obtention de la Maîtrise de Sciences et Techniques de Cartographie, Université d'Orléans, 66 p.
- Bonierbale T.** (2004). *Eléments pour l'évaluation de la qualité environnementale des systèmes d'assainissement urbain*. Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée, 265 p.
- Bonnefous C., Courtois A.** (2001). *Indicateurs de performance*. Paris: Editions HERMES Science Publication, 285 p.
- Breysse D., Boissier D.** (2002). L'évaluation et la maintenance des réseaux d'assainissement. In: Cremona C., *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. Association Française de Génie Civil, 451 p.
- Burrough P. A.** (1990). *Methods of spatial analysis in GIS*. *International Journal of Geographical Information System*, vol 4, n°3, pp. 221-223
- CEA.** (2000). *A guide to dam risk management*. Canadian Electricity Association - Dam Safety Interest Group, p.

- CFGB.** (1997). Erosion interne : typologie, détection et réparation. In: Barrages et Réservoirs n°6, *Le Bourget du Lac*, CFGB-EDF, pp. 126
- CFGB.** (2004). *Sécurité des digues fluviales et de navigation*. Antony: Cemagref Editions, 601 p.
- Clarke M.** (1990). Geographic Information System and model based analysis: toward effective decision support. In: Scholten H. J. and Stillwell J. C. H., *Geography in America*. Kluwer, Dordrecht, 165-175 p.
- Coeveld E. M., Knoeff J. G., Bizarri A., Klein Breteler M.** (2004). Residual strength of a dike after failure of cover layer. In: 29th ICCE conference proceedings, *Lisbon, Portugal*, pp. 14
- Correc O.** (2005). *Approche probabiliste de prédiction des risques de dégradation des réseaux de distribution d'eau à l'intérieur des bâtiments*. Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée, p.
- Courilleau E.** (1997). *Analyse statistique des données routière appliquée au développement de modèle de gestion de l'entretien*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 148 p.
- Cremona C.** (2002). *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.
- Daly F., De La Personne C., Chapital L.** (2004). Etat des lieux patrimonial des digues de canaux de navigation en France. In: *Sécurité des digues fluviales et de navigation*, CFGB - MEDD, *Orléans, France*, pp. 21-45
- David B.** (2002). Le SIR : un SIG pour la route. In: 14^e Rencontres européennes de la géomatique, Géoévénement, *Paris, France, 9,10,11 avril 2002*. pp. 6
- Degoutte G.** (2003). *Les mécanismes de rupture des digues*. Grenoble: ENGREF, Formation continue, Support d'intervention, 32 p.
- Delfosse G.** (2001). La politique technique de restauration du réseau routier national. In: Journées scientifiques et techniques du CETMEF, 2, 3 et 4 octobre 2001. pp. 2
- Densham P. J.** (1991). Spatial Decision Support System. In: Maguire D. J., Goodchild M. F. and Rhind D., *Geographical Information System: Principles and Applications*. Longman, London: 403-412 p.
- Diab Y.** (1993). Reinforced and concrete pressure pipe diagnosis. In: Pipeline Infrastructure II, *San Antonio, Texas, USA*, ASCE Conference, pp. 355-369
- Diab Y.** (2001). *Génie civil 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. In: INFRA 2002, *Montréal, Québec*, pp. 7
- Diab Y., Morand D., Polosan A.** (1999). Aide au choix des techniques de réhabilitation des conduites d'assainissement non visitables. In: 17^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, *Poitiers, France*, pp. 8
- Dumolard P.** (1992). Les fonctions d'analyse dans les SIG du futur. In: Conférence de l'information géographique numérique MARI 92, *Paris, France, 1-3 avril 1992*. pp.
- Dupont P., Londinsky N.** (2004). Préserver un patrimoine d'assainissement évalué à 2,5 milliards d'euros, en Seine-Saint-Denis, et l'améliorer. In: 22^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, *Université de Marne la Vallée, France, 3 et 4 juin 2004*. pp. 2
- El-Assaly A., Abourizk S., Stoeck J.** (2001). *Adequate data collection frequency and gauging length for surface condition rating in Alberta. Canadian journal of civil engineering*, n°28, pp. 871-874
- EPFL.** (2001). *Banque de données routières - STRADA-DB. Projet de levé d'une géométrie de l'axe de maintenance. Routes cantonales : axes 8000 et 6110. Rapport technique*, 6 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.
- Figeac N.** (2003). *Ecriture des scénarios de vieillissement des barrages en remblai à partir d'une méthodologie basée sur la modélisation fonctionnelle et de l'analyse d'expertise*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie civil, CUST, Université Blaise Pascal Clermont 2, 199 p.
- Fischer M. M., Nijkamp P.** (1993). design and use of geographic information system and spatial models. In: Fischer M. M. and Nijkamp P., *Geographic information system, spatial modelling, and policy evaluation*. EDS, p.
- Gignoux E.** (2000). *Sécurité des digues de protection contre les inondations : quelle capacité de résistance à la surverse ?* : ENGREF, Montpellier, 9 p.
- Goodchild M. F.** (1992). *Geographical Information Science. International Journal of Geographical Information System*, vol 6, n°1, pp. 31-45
- Goutx D., Mériaux P., Tourment R.** (2004). Conception hydraulique des déversoirs des endiguements de protection contre les inondations. In: Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD, *Orléans, France*, pp. 531-550
- Hanicotte M., Perchat J.** (1998). *DICO-TP. Dictionnaire général des travaux publics*. Ris-Orangis: Editions ARCATURE, 831 p.
- Huang B., Jiang B.** (2002). *AVTOP: a full integration of TOPMODEL into GIS. Environmental Modelling & Software*, n°17, pp. 261-268
- ICOLD.** (1983). *Deterioration of Dams and Reservoirs - examples and their analysis*. Gap: Louis Jean, 367 p.

- ICOLD.** (1993). *Bulletin 93: Ageing of dams and appurtenant works - Review and recommendations*. Paris: ICOLD, 235 p.
- ICOLD.** (1995). *Bulletin 99: Dam failures - Statistical analysis*. Paris: ICOLD, 73 p.
- ISDF.** (?). *AMDEC- Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité - guide pédagogique*. Ed. ISDF - Institut de la Sécurité de Fonctionnement, 36 p.
- ISL.** (2001). *Diagnostic de la digue de Cazouls d'Hérault*. Rapport technique, 17 p.
- Joerin F., Nembrini A., Rey M.-C., Desthieux G.** (2001). *Information et participation pour l'aménagement du territoire. Rôle des instruments d'aide à la décision*. *Revue internationale de géomatique*, vol 11, n° spécial : SIG et développement du territoire, pp. 309-332
- Johnson P. A.** (1999). *Fault tree analysis of bridge failure due to scour and channel instability*. *Journal of infrastructure system*, Vol 5, n°1, pp. 35-36
- Kaplan S.** (1997). *The words of risk analysis*. *Risk Analysis*, vol 17, n°24, pp.
- Klein Breteler M., Pilarczyk K. W., Hart R.** (2000). Influence of ageing and wide wave spectra on stability of placed block revetments. In: International conference on coastal engineering, *Sydney, Australia*, pp. 13
- Kurtz J. P.** (1997). *Dictionnaire de génie civil*. Paris: Editions du conseil International de la Langue Française, 398-399 p.
- Laaribi A.** (2000). *SIG et analyse multicritère*. Paris: Hermès Editions, 190 p.
- Laffréchine K.** (1999). *Base de données urbaine pour la gestion des réseaux d'assainissement non-visibles*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 170 p.
- Lair J.** (2000). *Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 213 p.
- Lair J.** (2003). Méthodes opérationnelles pour la prise en compte de la durabilité dans la norme ISO 15686 "Service Life Planning". In: 21ème Rencontres de Génie Civil, *Université de La Rochelle, France*, Actes, Volume, pp. 381-388
- Lajzerowicz N., Gattino B., Cérutti O.** (1998). *Construction d'indicateurs et tableaux de bord synthétiques*. AFNOR, Editions Paris la Défense, 1-29 p.
- Lannoy A., Procaccia H.** (2005). *Evaluation et maîtrise du vieillissement industriel*. Paris: Lavoisier, Tec & Doc, collection EDF R&D, 361 p.
- Le Gauffre P., Joannis C.** (2004a). Multi-criteria decision support approach to sewer asset management. In: DMUCE4 (Decision Making in Urban and Civil Engineering), *Porto, Portugal, 28-30 octobre 2004*. pp. 10
- Le Gauffre P., Joannis C., Gibello C., Breyse D.** (2002). Performance indicators and decision support for rehabilitation of sewer networks. Contribution of the French R&D

- REREAU Program. In: International conference on sewer operation and maintenance SOM 2002, pp. 10
- Le Gauffre P., Laffréchine K., Baur R., Poinard D., Haidar H., Schiatti M.** (2004b). Aide multicritère aux décisions de réhabilitation d'un réseau d'eau potable. In: 22ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, *Université de Marne la Vallée, France, 3 et 4 juin 2004*. pp. 8
- Le Gauffre P., Laffréchine K., Haidar H., Baur R., Poinard D., Schiatti M.** (2004c). A multicriteria decision support tool for annual rehabilitation programmes of water networks. Principles and experiments. In: DMUCE4 (Decision Making in Urban and Civil Engineering), *Porto, Portugal, 28-30 octobre 2004*. pp. 10
- Lepetit L.** (2002). *Etude d'une méthode de diagnostic des digues avec prise en compte du risque de liquéfaction*. Thèse de doctorat, 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.
- Maurel P., Serre D., Tourment R.** (2004a). Towards a generic GIS for dike management in flood plain areas: from conceptual design to real applications. In: AGILE 2004 conference on Geographic Information Science, *Heraklion, Greece, April 29th - May 1st*. pp. 14
- Maurel P., Tourment R., Romac A., Pinhas M.** (2004b). Le SIRS Dignes, un système d'information pour les gestionnaires locaux de digues. In: Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD, *Orléans, France*, pp. 393-406
- Mériaux P., Folton C.** (2005). *Sécurité de la digue de Cazouls d'Hérault. Recommandations pour le traitement de la végétation. Compléments de diagnostic génie civil*. Rapport de mission Cemagref, 12 p.
- Mériaux P., Hollier-Larousse A., Derobert X.** (2003a). Reconnaissance géophysique des digues de l'Agly après la crue de novembre 1999 - Contribution à l'élaboration d'une méthode de diagnostic. In: Geofcan, pp.
- Mériaux P., Royet P., Folton C.** (2001). *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations*. Cemagref Editions, 191 p.
- Mériaux P., Tourment R., Wolff M.** (2004). Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France. In: Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD, *Orléans, France*, pp. 9-20
- Mériaux P., Wolff M., Folton C.** (2003b). *Recensement national des digues de protection contre les inondations. Etat d'avancement de l'opération, premiers résultats et perspectives*. *Ingénieries*, n° spécial, pp. 113-126
- Millet R. A., Fellow P. E.** (1999). *Failures : how to avoid them*. *Journal of management in engineering*, september/october 1999, Issue 5, pp. 32-36
- Moins I.** (2005). Le SIRS Dignes, un Système d'Information pour les gestionnaires locaux de digues. In: colloque SIRNAT/JPRN, *Montpellier, France, 10 et 11 mars 2005*. pp. 7

- Molines N., Chevallier J.-J.** (2001). Système d'information géographique et analyse multicritère : une association novatrice au service du processus d'évaluation des grandes infrastructures linéaires. In: Colorni A., Paruccini M. and Roy B., *A-MCD-A Aide Multi Critère à la Décision / Multiple Criteria Decision Aiding*. 195-212 p.
- 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 p.
- OCDE.** (1997). *Indicateurs de performance dans le secteur routier*. Paris: Editions de l'OCDE, 174 p.
- Perez M.** (2004). La maintenance des digues et canaux EDF. In: Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD, Orléans, France, pp. 47-55
- Perrier J., Gallissaires J.-M.** (2004). Méthodes de détection de la nature des matériaux immergés et des affouillements. In: Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD, Orléans, France, pp. 321-327
- Peyras L.** (2003). *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise*. Thèse de doctorat, 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, pp. 931-952
- Pilarczyk K. W.** (1998). *Dikes and revetments. Design, maintenance and safety assessment*. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema, 562 p.
- Pilarczyk K. W.** (2003). Integrated approach and future needs in coastal engineering: general remarks. In: International conference on estuaries and coasts, Hangzhou, Chine, pp. 363-371
- Pomero C.** (2001). *Ecriture des scénarios de vieillissement des barrages poids à partir d'une méthodologie basée sur la modélisation fonctionnelle et de l'analyse d'expertise*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie civil, CUST, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 99 p.
- Prévot C.** (2005). *Evaluation de l'état des digues. Couplage d'une méthode multicritère avec un SIG*. Rapport de stage de Master Pro 2 IMST (Image, Multimédia et Sciences de la Terre) Université de Nice, 91 p.
- Price C. J., Taylor N. S.** (2001). *Automated multiple failure FMEA. Reliability engineering and system safety*, n°76, pp. 1-10
- Rami Mahmoud M., Fahmy H., Labadie J. W.-J.** (2002). *Multicriteria Siting and Sizing of Desalination Facilities with Geographic Information System*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, March/Avril 2002, pp. 113-120
- Rens K. L., Nogueira C. L., Transue D. J.** (2005). *Bridge management and nondestructive evaluation*. *Journal of performance of constructed facilities*, 19, n°1, pp. 3-16

- Rigaux P., Scholl M., Voisard A.** (2002). *Spatial databases - with application to GIS*. Morgan Kaufman Publisher, pp.
- Rouzet C., Labbé S.** (1997). *SIG en " multi-partenariat " : mobiliser les acteurs et partager les données*. *Revue internationale de géomatique*, Volume 7, n°3-3/1997, pp. 279-295
- Roy B., Bouyssou D.** (1993). *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Paris: Editions Economica, 695 p.
- Royet P., Lino M.** (2004). Méthodologie de diagnostic pluridisciplinaire des digues fluviales. In: Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD, Orléans, France, pp. 213-226
- Ruelland D.** (2004). *SENEQUE, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité de l'eau*. *Revue internationale de géomatique*, vol 14, n°1/2004, pp. 97-117
- Serre D., Peyras L., Tourment R., Diab Y.** (2004). Modéliser le fonctionnement et les modes de défaillance des digues de protection contre les inondations pour évaluer leur performance. In: 22ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Université de Marne la Vallée, France, 3 et 4 juin 2004. pp. 8
- SETRA.** (1993). *Note d'information. SICRE : système d'information connaissance du réseau routier. Pour qui, pourquoi et comment ?* : CSTR, 4 p.
- SETRA.** (2000a). *Guide méthodologique pour la mise en œuvre d'un système d'information routier (version provisoire 1.0, novembre 2000)*. Ministère de l'équipement, du logement et des transports, centre sécurité techniques routières, 49 p.
- SETRA.** (2000b). *Note d'information. IQRN, Images Qualité du Réseau National*. Réseau Technique, 8 p.
- SETRA.** (2003). *Logiciel VISAGE. Vis2Gest - Exploitation des données, Guide d'apprentissage*. Ministère de l'équipement, du logement et des transports, 69 p.
- Sianipar P. R. M., Adams T. M.** (1997). *Fault-tree model of bridge element deterioration due to interaction*. *Journal of infrastructure system*, september 1997, Issue 3, pp. 103-110
- Simon H. A.** (1991). *Sciences des systèmes Sciences de l'artificiel*. Paris: Dunod, 229 p.
- Tratapel G.** (2004). Etat du patrimoine des digues du Rhône. In: Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD, Orléans, France, pp. 57-66
- Travé-Massuyès L., Dague P., Guerrin F.** (1997). *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*. Paris: Hermes, 505 p.
- Turpeaud B., Serre D., Maurel P., Mériaux P.** (2004). *Etude d'un système d'informations à références spatiales (S.I.R.S) dédié au diagnostic, à la surveillance et à l'entretien des digues de protection contre les inondations*. rapport final de recherche (Convention RIO2 n°05/2001), 148 p.

- Valadas E.** (2003). *Identification des scénarios de dégradations des chaussées bitumineuses épaisses*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie civil, CUST, Université Blaise Pascal Clermont 2, 148 p.
- Vasconcelos E., Breyse D., Desmulliez J. J.** (2004). Démonstrateur d'un outil d'aide à la gestion du patrimoine réseaux d'assainissement non visitable. In: 22ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, *Université de Marne la Vallée, France, juin 2004*. pp. 8
- Villemeur A.** (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité - Facteurs humains - Informatisation*. Editions Eyrolles, 121-141 p.
- Vincke P.** (1989). *L'aide multicritère à la décision*. Bruxelles: Editions Ellipses, 179 p.
- VSS.** (1989a). *SN 640 900 Management de la maintenance routière, principes fondamentaux*. VSS (Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute) Zurich, 10 p.
- VSS.** (1989b). *SN 640 910 Système de repérage de base dans l'espace pour données routières*. VSS (Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute) Zurich, 14 p.
- VSS.** (1989c). *SN 640 930 Evaluation globale de l'état des ouvrages d'art*. VSS (Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute) Zürich, 11 p.
- VSS.** (1991). *SN 640 908 Catalogue des dégradations*. VSS (Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute) Zürich, 85 p.
- VSS.** (1996). *SN 640 944 Catalogue des données routières, état de la chaussée*. VSS (Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute) Zürich, 14 p.
- VSS.** (1997). *SN 640 925a Relevés et évaluation de l'état des routes*. VSS (Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute) Zürich, 11 p.
- VSS.** (2000). *SN 640 908 Gestion de l'entretien, évaluation de tronçons de routes dans le réseau - évaluation fonctionnelle*. VSS (Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute) Zürich, 12 p.
- Zwingelstein G.** (1995). *Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Paris: Hermès Editions, 601 p.
- Zwingelstein G.** (1996). *La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM*. Paris: Hermès Editions, 666 p.

Liste des tableaux

Tableau 3.1. Les différents risques et leur déclinaison en indicateurs et critères (Diab, 2002)	62
Tableau 3.2. Points à observer lors de l'inspection visuelle de routine (Mériaux et al., 2001)	65
Tableau 4.1. Synthèse des méthodes utilisées dans le cadre de notre recherche	72
Tableau 5.1. Recensement des incidents liés à l'érosion interne (CFGB, 1997)	83
Tableau 6.1. Structure d'un Tableau d'Analyse Fonctionnelle (Zwingelstein, 1996)	95
Tableau 6.2. AMDE appliquée à un disjoncteur électrique	96
Tableau 6.3. AMDE appliquée aux digues en charge en permanence –extrait (Lepetit, 2002)	99
Tableau 6.4. Les composants des digues en remblai à étanchéité amont.....	111
Tableau 6.5. Tableau d'analyse fonctionnelle - Extrait pour les digues à étanchéité amont (Serre et al.)	113
Tableau 6.6. Structure de l'AMDE adaptée aux digues	114
Tableau 6.7. L'AMDE adaptée aux digues (extrait du composant crête)	116
Tableau 7.1. Scénarios de rupture des digues	124
Tableau 8.1. Indicateurs utilisés pour le calcul du score final – extrait (El-Assaly et al., 2001)	133
Tableau 8.2. Moyens de détection associés à chaque indice (VSS, 1997).....	134
Tableau 8.3. Indicateurs utilisés dans l'évaluation des indices et détermination de la gravité (VSS, 1997).....	135
Tableau 8.4. Critères de décision pour la réhabilitation du réseau d'eau potable (Le Gauffre et al., 2004c).....	137
Tableau 8.5. Indicateurs d'état et critères du scénario d'érosion interne	142
Tableau 8.6. Echelle des scores des indicateurs d'état et des critères.....	143
Tableau 8.7. Scores possibles des indicateurs relatifs au critère « racines dans la recharge amont étanche ».....	144
Tableau 9.1. Lissage intrinsèque à l'utilisation de la moyenne	158
Tableau 9.2. Moyenne et écart-type identiques pour deux tronçons très différents.....	158
Tableau 9.3. Exemple d'exercices proposés aux experts	159
Tableau 9.4. Résultats des scores proposés par 3 experts	159
Tableau 9.5. Règles d'affectation représentant les résultats du module de calcul	166
Tableau 11.1. Les grandes catégories de données du SIRS Dignes (en grisé celles intégrées dans la version 1).....	185

Liste des figures

Figure 1.1. Eléments et fonctions d'un système de génie civil particulier : une digue.....	24
Figure 1.2. Dégradation et défaillance (Zwingelstein, 1996).....	25
Figure 1.3. Les stratégies de maintenance (Zwingelstein, 1996).....	26
Figure 1.4. Diagnostic, évaluation de l'état/performance et l'analyse de risques.....	28
Figure 1.5. SIG dédié à la gestion des réseaux d'eau.....	34
Figure 1.6. Visualisation de la performance d'un tronçon de route dans un SIG (EPFL, 2001)	35
Figure 2.1. Digue de navigation du Rhône en charge en permanence (Perrier et al., 2004)....	37
Figure 2.2. Digue de protection contre les inondations (Mériaux et al., 2001).....	38
Figure 2.3. Répartition des digues en France (estimations).....	38
Figure 2.4. Typologie de digues de canaux en fonction de la position par rapport au terrain naturel (Daly et al., 2004).....	39
Figure 2.5. Profil type d'une digue de navigation de la CNR (Tratapel, 2004).....	40
Figure 2.6. Dignes du canal d'Oraison, période de travaux (Perez, 2004).....	40
Figure 2.7. Positionnement de la digue par rapport cours d'eau.....	41
Figure 2.8. Digue « à la mer » en Camargue.....	42
Figure 2.9. Principales tables de la base de données « BarDignes » (Mériaux et al., 2004)....	43
Figure 2.10. Coupe type de vallée endiguée (Mériaux et al., 2001).....	45
Figure 2.11. Coupe caractéristique des digues de Loire (Mériaux et al., 2001).....	45
Figure 2.12. Coupe type des digues du Petit Rhône en Camargue (Mériaux et al., 2001).....	46
Figure 2.13. Coupe type des digues zonées.....	46
Figure 2.14. Coupe type d'une digue en maçonnerie (Mériaux et al., 2001).....	47
Figure 2.15. Coupe type d'un déversoir sur la Loire (Mériaux et al., 2001).....	48
Figure 2.16. Ouvrage singulier dans la digue : une conduite.....	48
Figure 2.17. Identification des intervenants dans la gestion des digues (Mériaux et al., 2001)	52
Figure 3.1. Construction des indicateurs de performance (IP).....	59
Figure 3.2. Combinaison des IP et obtention de l'IP global (Diab, 2002).....	63
Figure 3.3. Fiche de relevé de désordres.....	67
Figure 3.4. Radargramme avec mise en évidence d'une brèche (Mériaux et al., 2003a).....	68
Figure 3.5. Comparaison d'essais pénétrométriques au PANDA et au pénétromètre lourd (Mériaux et al., 2003a).....	68
Figure 4.1. Démarche d'analyse de la performance des digues et de construction d'un outil d'aide à la décision.....	74
Figure 5.1. Les quatre mécanismes de rupture des ouvrages en remblai. Schéma extrait de (Lepetit, 2002).....	78
Figure 5.2. Mécanisme de rupture par surverse (Mériaux et al., 2001).....	80
Figure 5.3. Cas de rupture par surverse sur le Vidourle (Gard).....	81
Figure 5.4. Erosion interne par renard et par suffusion (CFGB, 1997).....	82
Figure 5.5. Mécanisme du renard hydraulique dans une digue (Mériaux et al., 2001).....	83
Figure 5.6. Renard autour d'une canalisation traversant la digue.....	84
Figure 5.7. Le mécanisme de l'affouillement (Mériaux et al., 2001).....	85
Figure 5.8. Rupture par érosion externe d'une digue du fleuve côtier Var.....	87
Figure 5.9. Le mécanisme de glissement côté val en situation de crue (Mériaux et al., 2001).....	88

Figure 5.10. Le mécanisme de glissement côté fleuve lors de la décrue (Mériaux et al., 2001)	89
Figure 5.11. Glissements côté val en crue (photo à gauche) puis côté fleuve à la décrue (photo à droite)	90
Figure 6.1. Démarche générale de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)	92
Figure 6.2. Processus de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)	93
Figure 6.3. BdF appliqué à un système de quatre composants (Zwingelstein, 1996)	94
Figure 6.4. Processus général de l'AMDE (Peyras, 2003)	96
Figure 6.5. Evaluation de la durabilité – Approche fondée sur l'AMDE (Lair, 2003)	97
Figure 6.6. AMDE du noyau étanche d'un barrage en remblai (Figeac, 2003)	98
Figure 6.7. Arbre des causes appliqué à un générateur de secours (CEA, 2000)	100
Figure 6.8. Structure d'un arbre d'événements (Zwingelstein, 1996)	101
Figure 6.9. Boucle de recyclage et son graphe orienté signé (Travé-Massuyès et al., 1997)	106
Figure 6.10. Graphe causal dynamique	106
Figure 6.11. Démarche de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)	107
Figure 6.12. Les trois profils structurels de digues représentatif du parc de digue français	110
Figure 6.13. Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux interactions de flux hydrauliques dans une digue à étanchéité amont	112
Figure 6.14. Démarche AMDE utilisée pour les digues	114
Figure 6.15. Schéma conceptuel pour l'écriture des scénarios de rupture	117
Figure 6.16. Représentation des variables dans le graphe causal	118
Figure 7.1. Démarche pour la modélisation des scénarios	121
Figure 7.2. Scénario de rupture par érosion interne d'une digue à étanchéité amont	123
Figure 7.3. Arbre de défaillance relatif au mécanisme d'érosion interne de la digue	125
Figure 8.1. L'indicateur de performance au centre du triangle « stratégie/acteur/processus d'action » (Bonnefous et al., 2001)	130
Figure 8.2. Calcul de l'indice déterminant l'état des chaussées (El-Assaly et al., 2001)	133
Figure 8.3. Les trois variables destinées à l'évaluation de la performance des digues - exemple	139
Figure 8.4. Hiérarchisation des trois variables pour l'évaluation de la performance des digues	140
Figure 8.5. Règles d'affectation des scores des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche »	145
Figure 9.1. Problème de tri (Laaribi, 2000)	150
Figure 9.2. Exemple de détermination de catégories dans lesquelles vont être affectées les actions avec la méthode ELECTRE TRI (Le Gauffre et al., 2004c)	154
Figure 9.3. Arbre de défaillance par érosion interne de la digue à recharge amont étanche	157
Figure 9.4. Règle d'agrégation des critères relatifs à la fonction du revêtement de la protection côté fleuve	161
Figure 9.5. Règle d'agrégation des critères relatifs à la fonction de la recharge amont	162
Figure 9.6. Règle d'agrégation des critères pour l'évaluation de l'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne	164
Figure 9.7. Module de calcul automatique de la performance des digues	165
Figure 10.1. Composantes d'un SIG (Fischer et al., 1993)	171
Figure 10.2. Système connecté (loose coupling) adapté de (Huang et al., 2002)	175
Figure 10.3. Système interfacé (tight coupling) adapté de (Huang et al., 2002)	176
Figure 10.4. Système de pleine intégration (full coupling) adapté de (Huang et al., 2002)	176
Figure 11.1. Modèle conceptuel d'un système endigué générique	183
Figure 11.2. Architecture informatique de l'application SIRS digues V1	187
Figure 11.3. Exemple d'écran de saisie/consultation	188

Figure 11.4. Exemple de cartographie en exploitant les décalages graphiques latéraux	189
Figure 11.5. Fonction avancée d'édition de rapport (mode tableau)	189
Figure 11.6. Fiche spécifique dédiée au relevé des désordres	190
Figure 11.7. Démarrage du module de saisie de l'application SIRS Digues	191
Figure 11.8. Ecran de saisie des données du SIRS Digues	191
Figure 11.9. Représentation cartographique du thème désordre	192
Figure 11.10. Ecran de visualisation des données relatives à un désordre	193
Figure 11.11. Création d'une fiche de suivi des désordres	194
Figure 11.12. Les trois composantes d'un SAD	196
Figure 11.13. Grille d'évaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche »	200
Figure 11.14. Segmentation de la digue selon le critère « végétation » (Berthaud, 2004)	200
Figure 11.15. Table résultat des scores du critère « racines dans la recharge amont étanche »	201
Figure 11.16. Evaluation de la performance de la digue (Berthaud, 2004)	202
Figure 11.17. Interface spécifique au calcul de la performance des digues (Berthaud, 2004)	203
Figure 11.18. Le principe de la segmentation dynamique	204
Figure 11.19. Localisation de la digue de Cazouls d'Hérault	205
Figure 11.20. Talus côté cours d'eau revêtu d'un perré en béton incliné	206
Figure 11.21. Structure côté cours d'eau formée d'un mur en maçonnerie	207
Figure 11.22. Création du tronçon de gestion de la digue de Cazouls d'Hérault avec son système de repérage (Prévot, 2005)	209
Figure 11.23. Module de saisie et de consultation de données du SIRS Digues	210
Figure 11.24. Légende utilisée pour la représentation de l'indicateur de performance relatif à l'érosion interne	211
Figure 11.25. Visualisation de la performance vis à vis du mécanisme d'érosion interne dans le SIRS Digues (Prévot, 2005)	211
Figure 11.26. Page HTML récapitulant les critères et leurs scores ayant participés à l'évaluation de la performance du tronçon de digue (Prévot, 2005)	213

Liste des annexes

Annexe 1 - Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement.....	243
Annexe 2 - L'analyse structurelle des digues.....	251
Annexe 3 - Les Blocs diagrammes Fonctionnels des digues à étanchéité amont.....	259
Annexe 4 - Les tableaux d'analyse fonctionnelle.....	265
Annexe 5 - L'AMDE des digues à étanchéité amont.....	277
Annexe 6 - Les scénarios de rupture des digues à étanchéité amont.....	283
Annexe 7 - Compte rendu des réunions d'experts des digues destinées à l'évaluation multicritère de la performance.....	295
Annexe 8 - Proposition de modification de la base de données du SIRS Digues en vue d'intégrer les critères du scénario « perte d'étanchéité de la recharge amont étanche ».....	333
Annexe 9 - Spécifications techniques du modèle d'analyse multicritère couplé au SIRS Digues.....	345
Annexe 10 - Valorisation des compétences – un nouveau chapitre de la thèse.....	351

Annexes

Annexe 1 - 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 1.1).

système	phase	entités dangereuses	événement causant une situation dangereuse	situation dangereuse	accident potentiel	effet	gravité	mesure préventive

Tableau 1.1. Tableau de l'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.

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 1.1) : [ISDF]

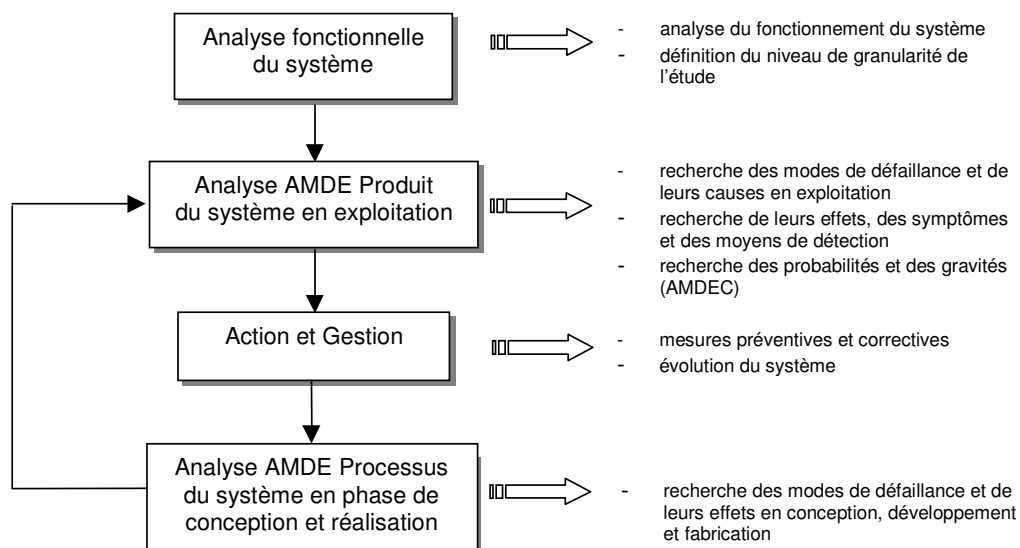


Figure 1.1. Processus général de l'AMDE

- 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 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 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.

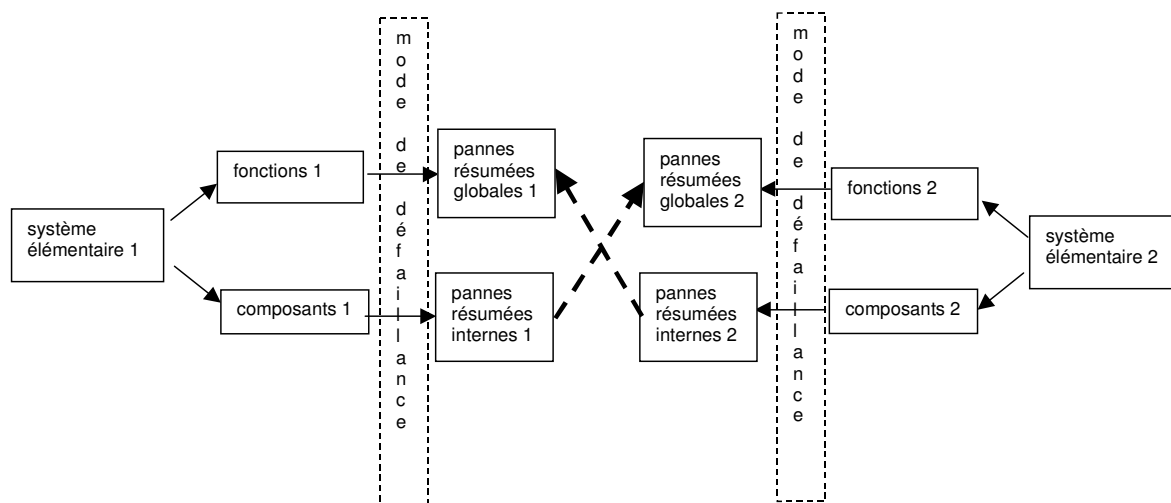


Figure 1.3. Démarche de la MCPR

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 Etats, 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]

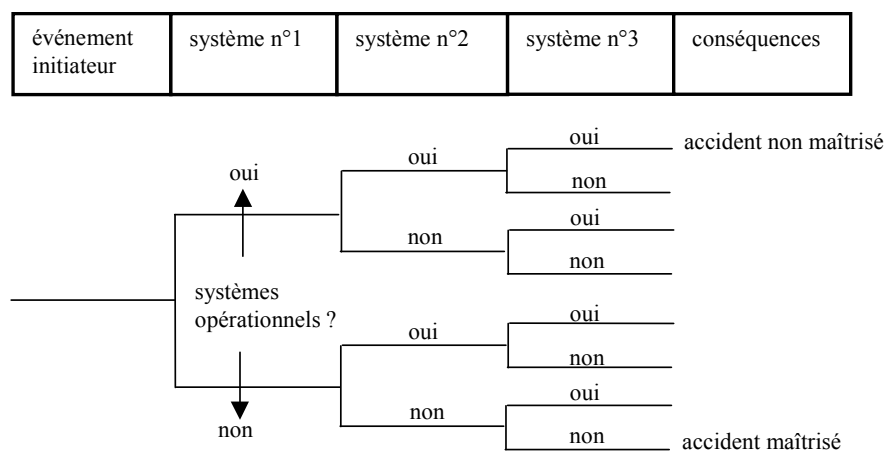


Figure 2.1. Structure d'un arbre d'événements [ZWINGELSTEIN,96]

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 résumées 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 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.

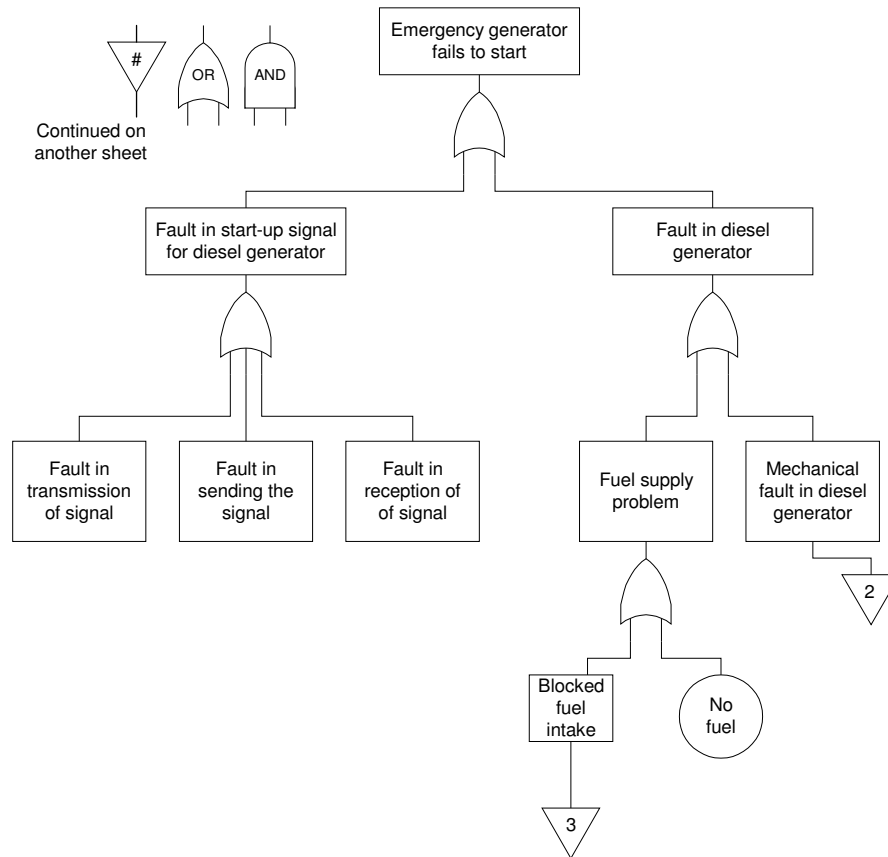


Figure 2.2. Arbre des causes appliqué à un générateur de secours [CEA,00]

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.

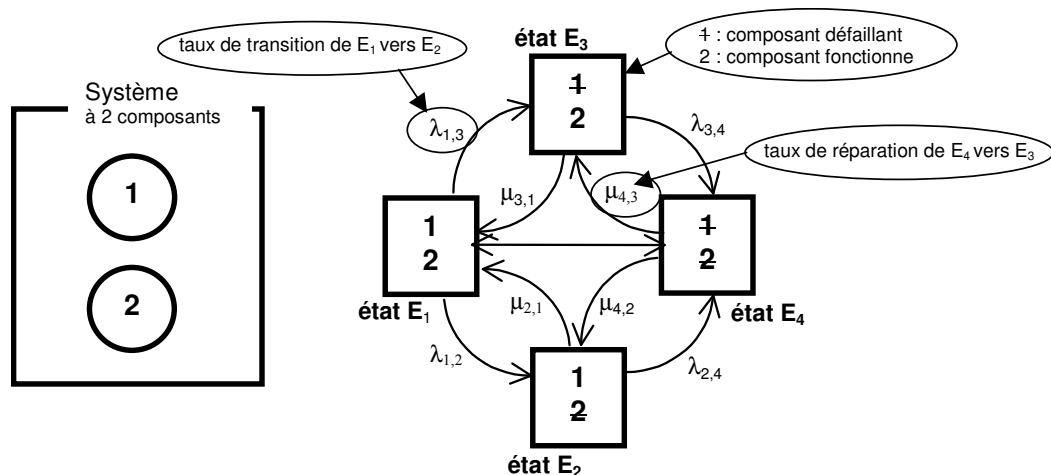


Figure 2.3. Graphe d'état d'un système à deux composants et deux états possibles (marche ou défaillant) [LEROY,92]

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 (n²)**, 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).

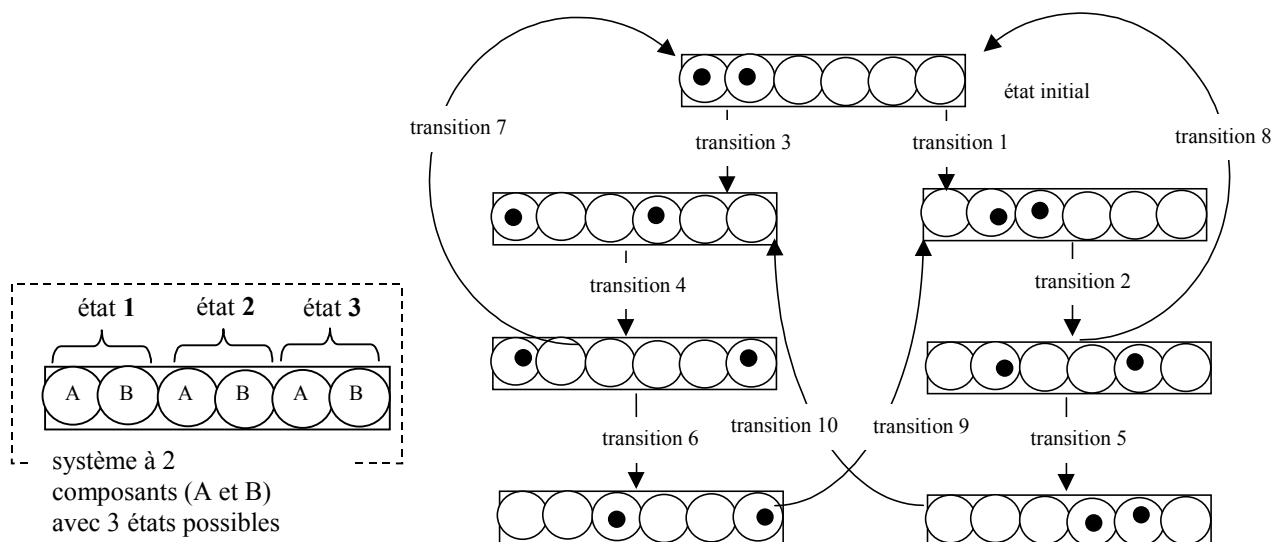


Figure 2.4. Exemple de réseau de Petri pour un système à deux composants et trois états possibles [LEROY,92]

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.

Nous proposons donc d'adapter cette méthode aux barrages.

Annexe 2 - L'analyse structurelle des digues

L'analyse structurelle permet de lister tous les composants constitutifs du système, de repérer leur position physique au sein de l'ouvrage et de déterminer les interactions avec les autres composants.

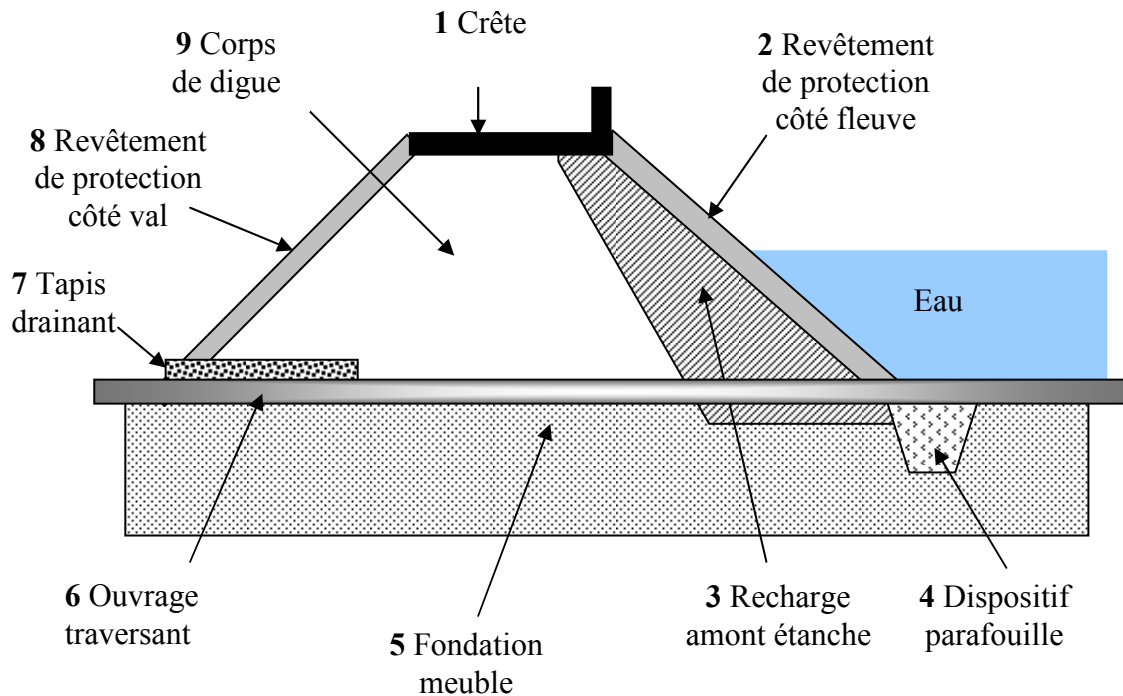
Elle consiste à découper l'ouvrage, selon les limites données dans la définition, en composants ou sous-composants (ou matériaux), afin d'en construire une vision plus précise. Le découpage est effectué à la granularité adoptée pour l'étude, c'est à dire à l'échelle du composant des digues.

On procède ensuite à l'analyse structurelle des différentes catégories de digues. Nous avons examiné des profils de digues types, telles qu'elles sont observées en situation réelle, et décrit avec tous les composants et équipements afin d'adapter la décomposition structurelle au maximum d'ouvrages existants. Cette analyse a conduit à retenir trois profils en travers types couvrant l'ensemble des digues de protection contre les inondations rencontrés dans le parc français :

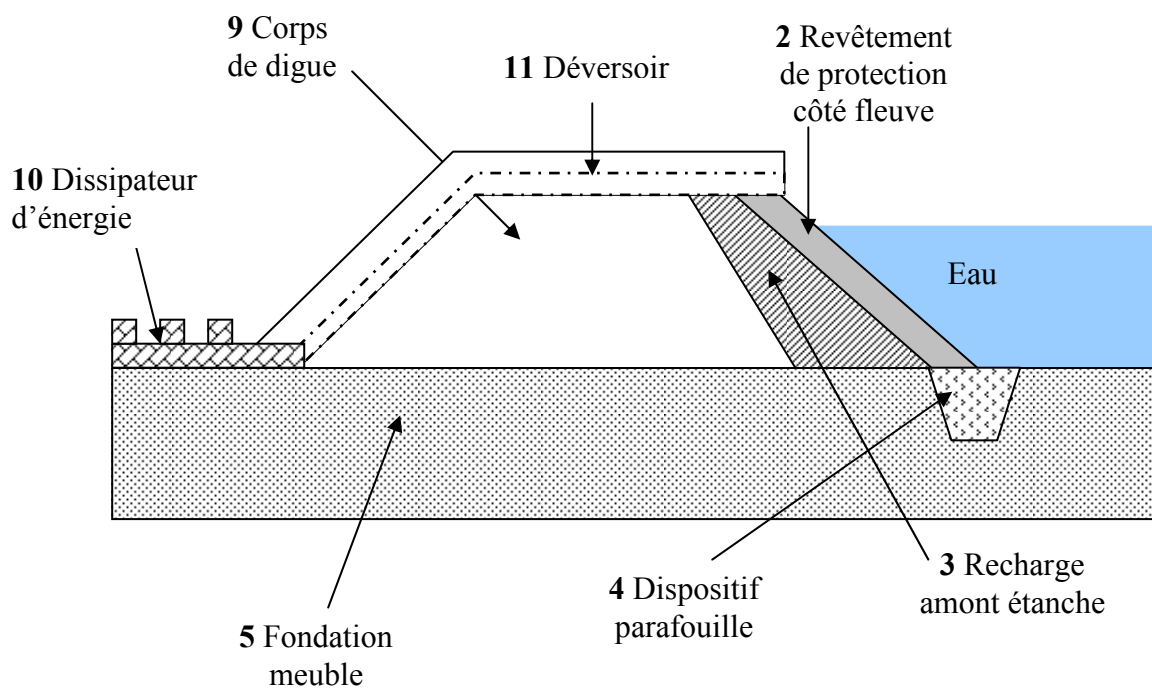
- les digues à étanchéité amont ;
- les digues à étanchéité interne ;
- les digues en maçonnerie.

Modèles structurels :

1. Digue en remblai à étanchéité amont :



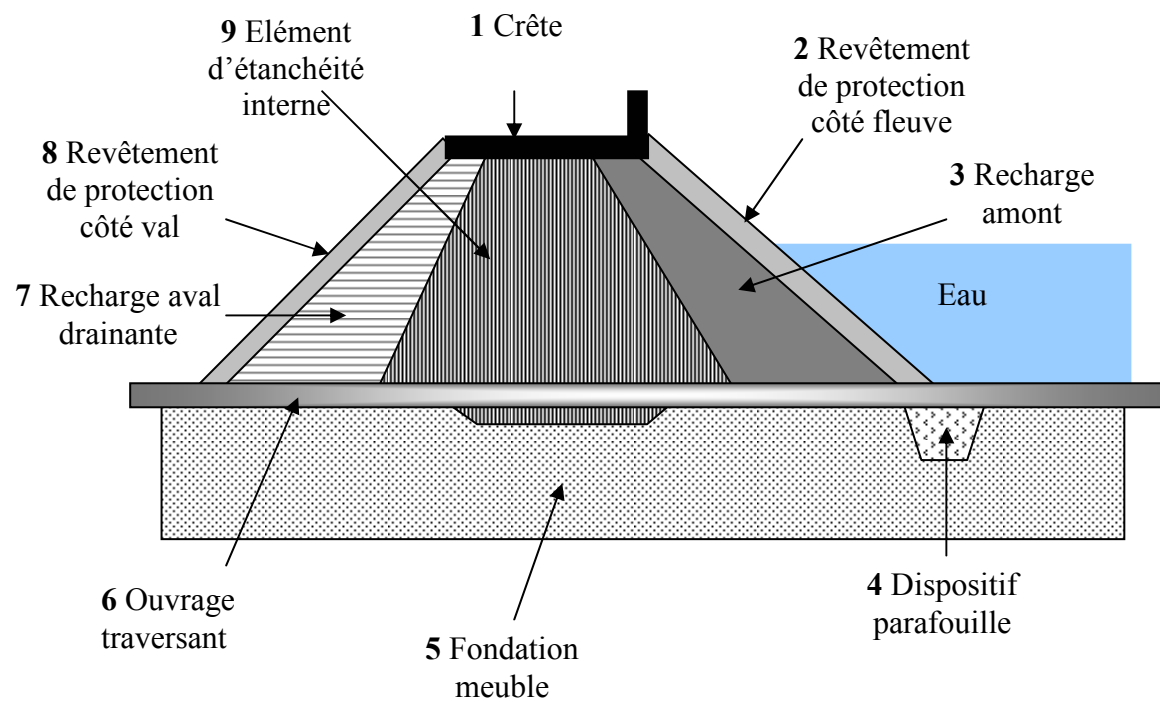
1.1. Digue en remblai à étanchéité amont : déversoir



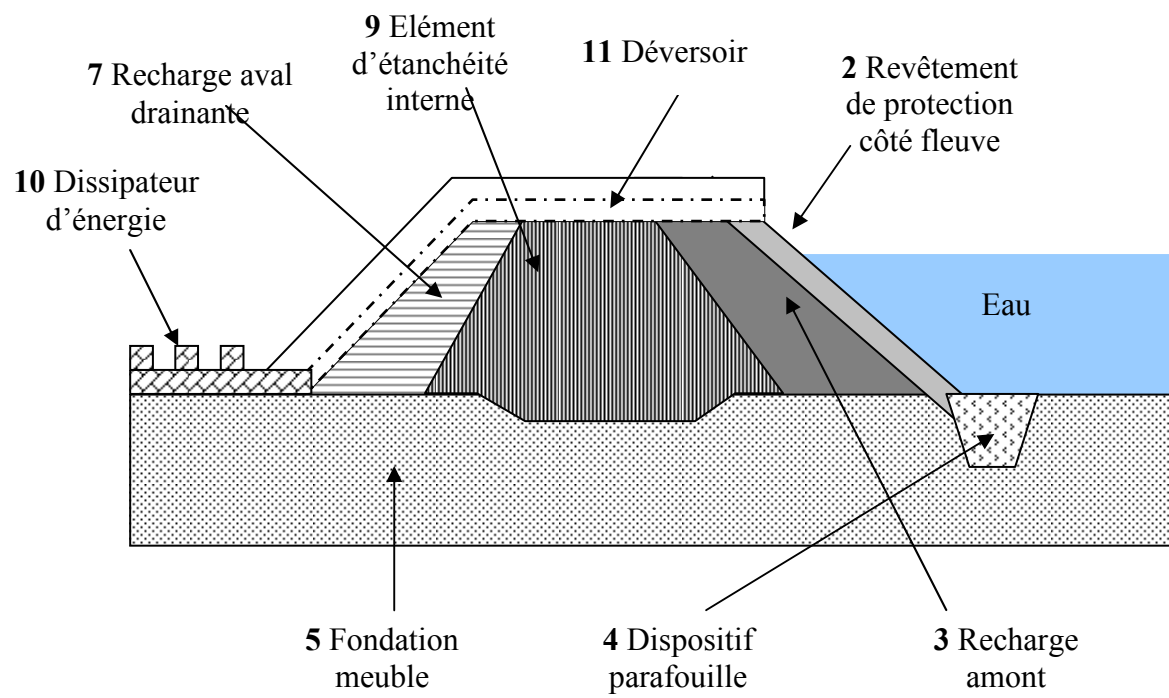
Liste des composants pour les digues en remblai à étanchéité amont :

Numéro	Composant	Nature
1	Crête	Granulats Terre
2	Revêtement de protection côté fleuve	Terre végétale Terre végétale et grillage anti-fouisseur Perré Perré et terre végétale Enrochements Enrochements et terre végétale
3	Recharge amont étanche	Argiles compactées Géomembrane
4	Dispositif para fouille	Enrochements Enrochements et rideau (palplanches ou pieux) Rideau (palplanches ou pieux) Maçonnerie Béton
5	Fondation meuble	Sol
6	Ouvrage traversant	Béton Métal Fonte Plastique Bois
7	Tapis drainant	Géotextile Granulats
8	Revêtement de protection côté val	Terre végétale Terre végétale et grillage anti-fouisseur Perré Perré et terre végétale
9	Corps de digue	Matériaux disponibles sur place
10	Dissipateur d'énergie	Béton Enrochements
11	Déversoir	Béton

2. Digue en remblai à étanchéité interne :



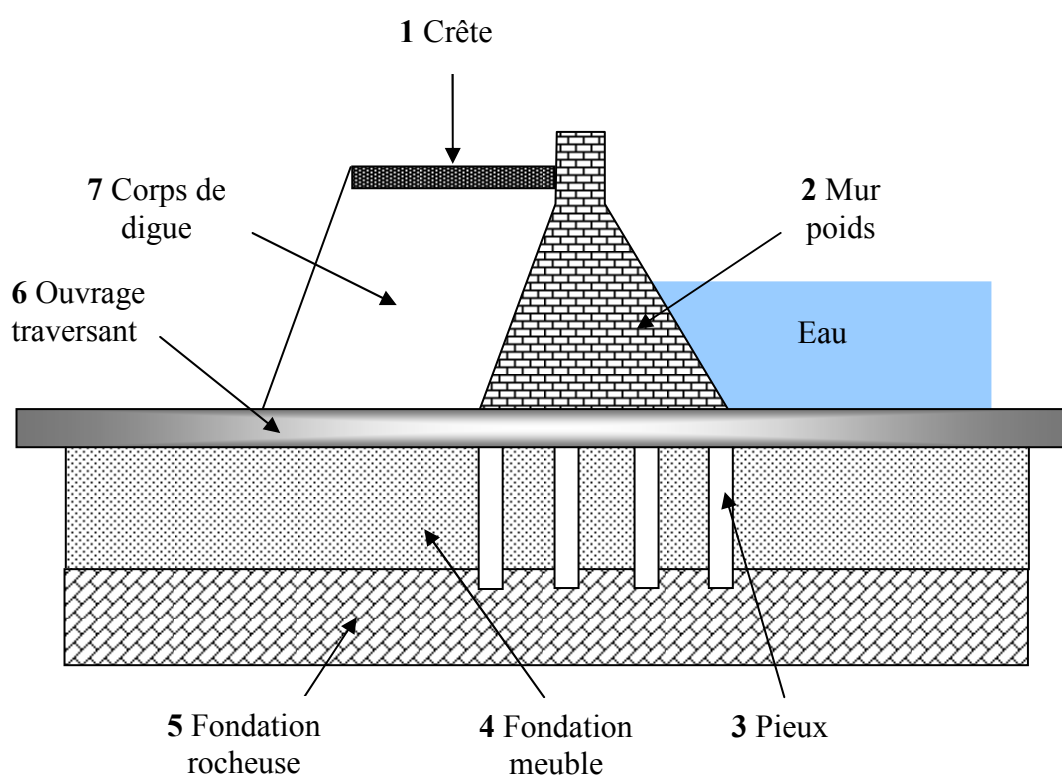
2.1. Digue en remblai à étanchéité interne : déversoir



Liste des composants pour les digues en remblai à étanchéité interne :

Numéro	Composant	Nature
1	Crête	Granulats Terre
2	Revêtement de protection côté fleuve	Terre végétale Terre végétale et grillage anti-fouisseur Perré Perré et terre végétale Enrochements Enrochements et terre végétale
3	Recharge amont	Matériaux disponibles sur place
4	Dispositif para fouille	Enrochements Enrochements et rideau (palplanches ou pieux) Rideau (palplanches ou pieux) Maçonnerie Béton
5	Fondation meuble	Sol
6	Ouvrage traversant	Béton Métal Fonte Plastique Bois
7	Recharge aval drainante	Granulats
8	Revêtement de protection côté val	Terre végétale Terre végétale et grillage anti-fouisseur Perré Perré et terre végétale
9	Elément d'étanchéité interne	Argiles compactées Rideau de palplanche Paroi moulée
10	Dissipateur d'énergie	Béton Enrochements
11	Déversoir	Béton

3. Digue en maçonnerie :



Liste des composants pour les digues en maçonnerie :

Numéro	Composant	Nature
1	Crête	Granulats Terre
2	Mur poids	Béton Maçonnerie Gabions
3	Pieux	Bois Métal Béton
4	Fondation meuble	Sol
5	Fondation rocheuse	Substratum
6	Ouvrage traversant	Béton Métal Fonte Plastique Bois
7	Corps de digue	Matériaux disponibles sur place

Annexe 3 - Les Blocs diagrammes Fonctionnels des digues à étanchéité amont

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.

Ces relations permettent d'obtenir 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 un composant tiers. Enfin, afin de bien mettre en valeur les flux importants, nous avons associé à chaque type de flux une épaisseur différente indiquant son importance (un trait épais indique un flux important).

Les quatre principaux BdF 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).

Au final, chaque BdF a ses particularités :

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 :

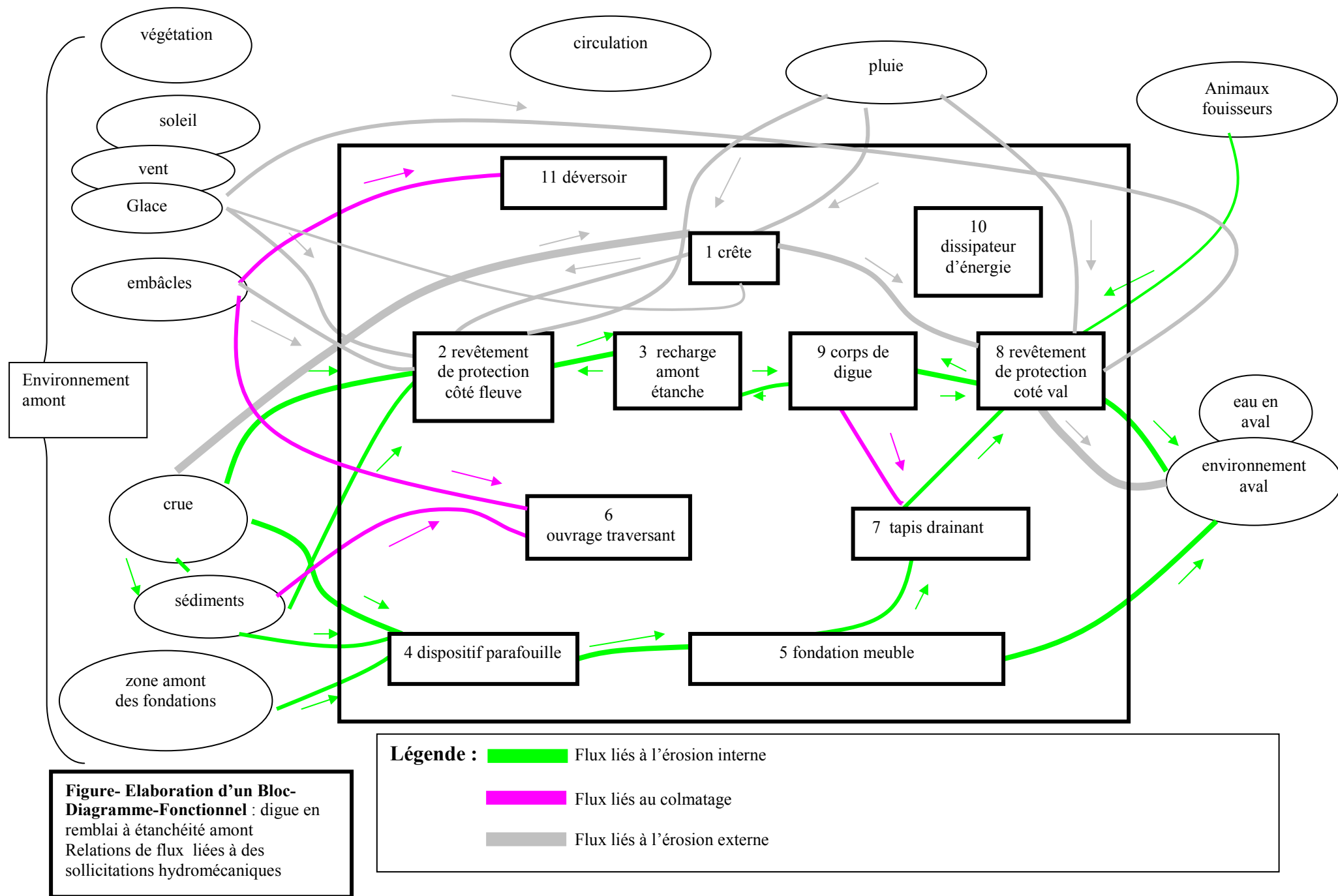
Nous distinguons ici les relations mettant en jeu les mécanismes *d'érosion* des matériaux et des composants et les mécanismes de *colmatage* dus au transport des matériaux par l'eau.

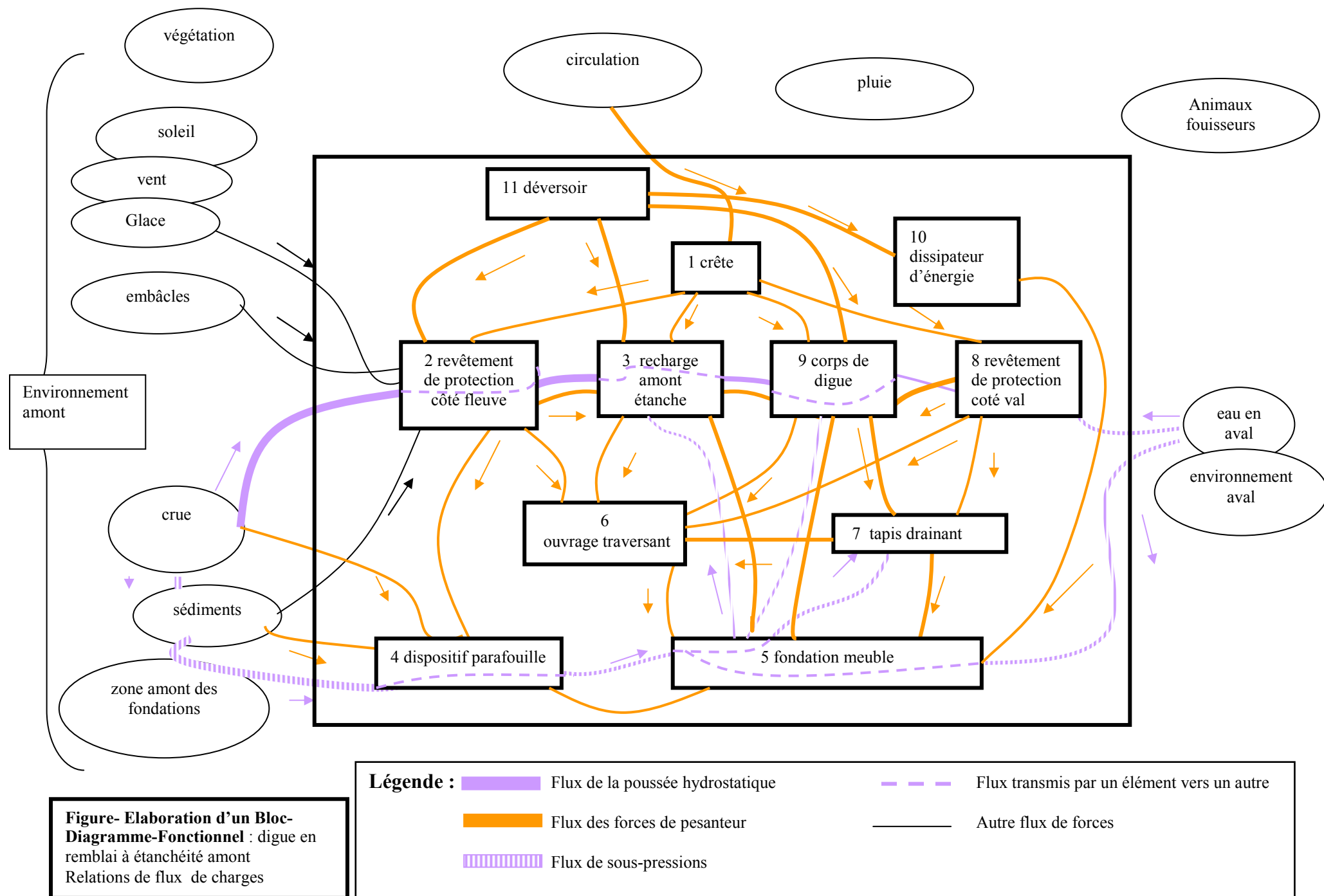
BdF définissant les relations de flux de charges :

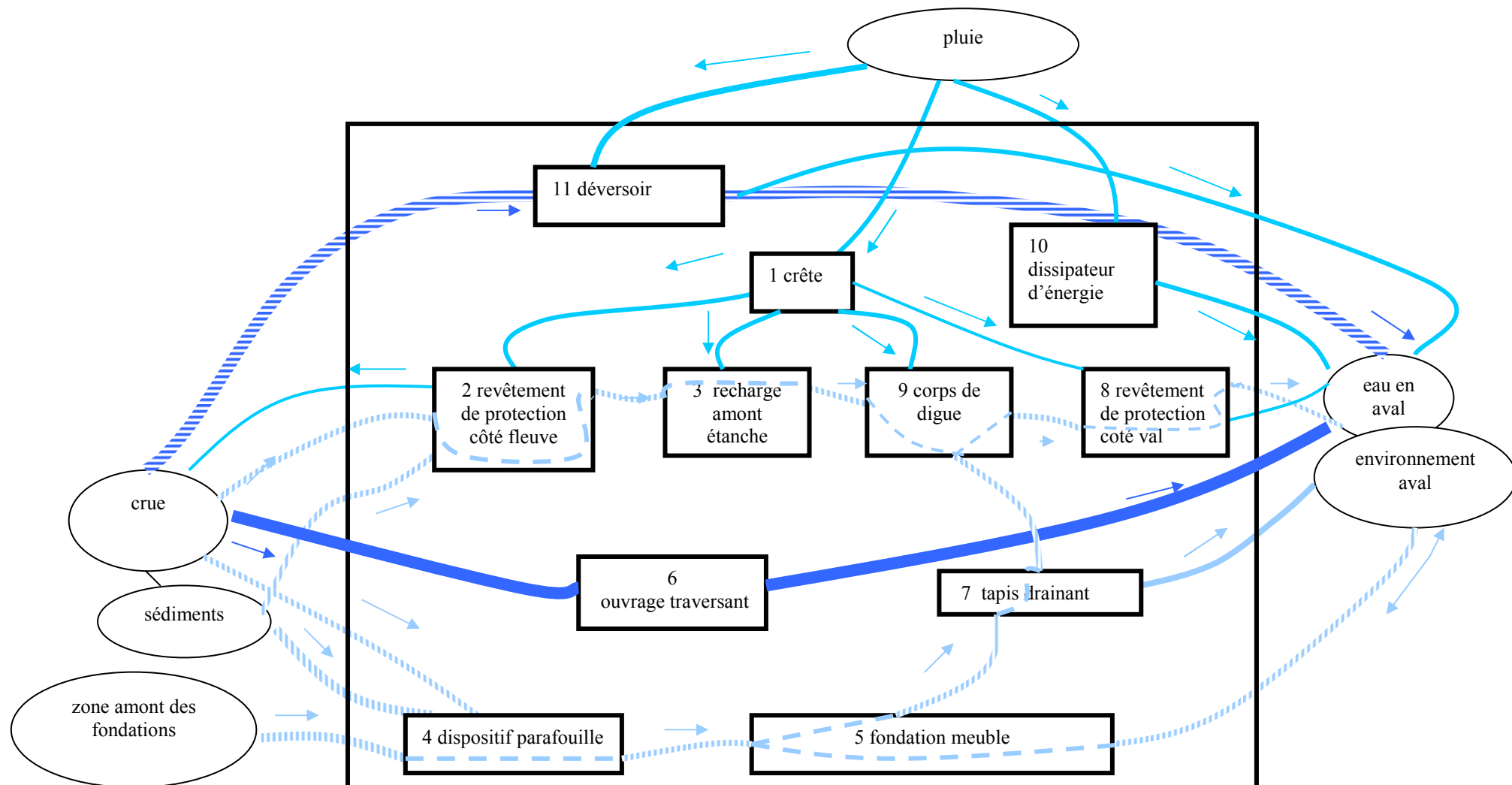
Ce Bloc diagramme Fonctionnel met en évidence les différents actions extérieures agissant sur chaque composant de la digue. Nous distinguons les forces de pesanteur, les poussées hydrostatiques amont et aval, la poussée des sédiments et des glaces, les chocs des embâcles, les sous-pressions agissant 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.







Légende :



Flux liés à l'irrigation

Flux liés à l'évacuation des eaux de drainage

Flux liés aux eaux d'infiltration



Flux liés aux eaux de crue



Flux liés aux eaux d'infiltration



Transmission de flux liés aux eaux d'infiltrations à travers un composant

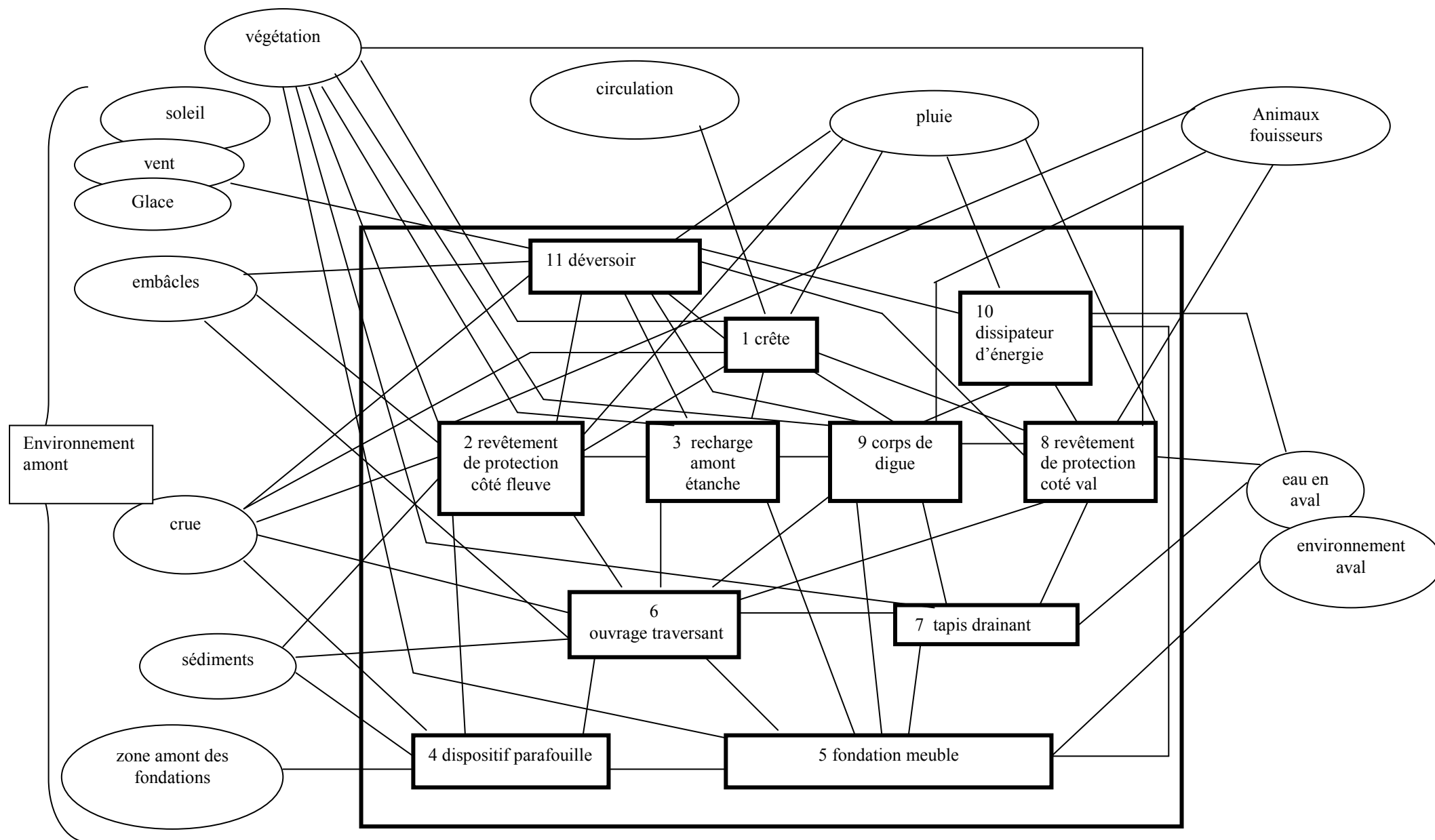


Figure- Elaboration d'un Bloc-Diagramme-Fonctionnel : digue en remblai à étanchéité amont
relations de contacts

Annexe 1 - Les tableaux d'analyse fonctionnelle

A partir des blocs diagrammes fonctionnels, nous déterminons les fonctions de conception des composants du système. Elles correspondent, pour chaque composant de granularité intermédiaire, aux réactions face aux interactions de contact et de flux avec les autres composants et les milieux extérieurs. Ainsi, nous distinguons deux catégories de fonctions de conception : les *fonctions de contact* et les *fonctions de flux*.

Les différentes interactions entre les composants conduisent à distinguer les fonctions de conception suivantes :

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, de drainage 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 ;
- le poids des terres ;
- le poids des sédiments ;

- les charges d'exploitation (circulation) ;
- les sous-pressions ;
- la poussée hydrostatique côté fleuve ;
- la poussée hydrostatique val protégé ;
- la poussée des sédiments ;
- les chocs des embâcles.

Nous regroupons ces fonctions dans deux syntaxes :

- ➔ *résister aux sollicitations mécaniques*
- ➔ *transmettre les sollicitations mécaniques*

1. 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 ;
- collecter les eaux d'infiltration d'un composant (ou un milieu extérieur) vers un autre ;
- 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*
- ➔ *collecter 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 dues à la circulation

.2 résister aux 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

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

**2 revêtement
de protection
côté fleuve**

1 - résister aux sollicitations mécaniques

.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

2 - résister à l'érosion externe

.1 résister à l'affouillement

.2 résister au ruissellement

3 - résister aux sollicitations thermiques

.1 résister au gel-dégel

.2 résister aux gradients thermiques élevés

4- évacuer les flux hydrauliques

.1 évacuer l'eau de pluie vers le fleuve

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
3	<i>recharge amont étanche</i>	1 - résister aux sollicitations mécaniques .1 résister à la poussée hydrostatique transmise par le revêtement de protection côté fleuve .2 résister au poids propre déversoir .3 résister au poids de la crête .4 résister aux charges d'exploitation transmises par la crête .5 résister à la poussée des sédiments transmise par le revêtement de protection côté fleuve .6 résister à la poussée des glaces transmise par le revêtement de protection côté fleuve .7 résister aux chocs des embâcles transmis par le revêtement de protection côté fleuve .8 résister aux sous-pressions provenant de la fondation meuble .9 résister au glissement .10 résister aux développement des racines .11 résister aux animaux fouisseurs 2 - préparer les surfaces de contact .1 préparer la surface de contact de la crête .2 préparer la surface de contact du déversoir 3 - résister à l'érosion interne .1 résister au phénomène d'érosion interne du aux eaux d'infiltration provenant du revêtement de protection côté fleuve 4 - limiter les flux hydrauliques .1 limiter les infiltrations provenant du revêtement de protection côté fleuve .2 limiter les infiltrations d'eaux pluviales provenant de la crête

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

dispositif
4 para fouille

1 - limiter les flux hydrauliques

- .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 limiter les flux d'infiltration provenant des sédiments
- .4 empêcher les écoulements au contact de la fondation
- .5 empêcher les écoulements au contact de la recharge amont étanche

2 - résister aux sollicitations mécaniques

- .1 résister aux sous- pressions de la zone amont des fondations
- .2 résister au poids propre de la crue
- .3 résister au poids propre des sédiments
- .4 résister au poids propre du revêtement de protection côté fleuve
- .5 assurer la stabilité du revêtement de protection côté fleuve

3 - résister à l'érosion externe

- .1 résister à l'affouillement

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

5 *Fondation
meuble*

1 - résister aux sollicitations mécaniques

- .1 résister aux poids du corps de digue
- .2 résister au poids propre de l'ouvrage traversant
- .3 résister au poids propre du déversoir transmis par le corps de digue
- .4 résister aux poids propre de la crête transmis par le corps de digue
- .5 résister au poids propre du revêtement de protection côté fleuve
- .6 résister au poids propre de la recharge amont étanche
- .7 résister au glissement
- .8 résister au poids propre du revêtement de protection côté val
- .9 résister au poids propre du dissipateur d'énergie
- .10 résister au poids propre du tapis drainant
- .11 résister aux développement des racines

2 - préparer les surfaces de contact

- .1 préparer la surface de contact du tapis drainant
- .2 préparer la surface de contact du dispositif parafouille
- .3 préparer la surface de contact de l'ouvrage traversant
- .4 préparer la surface de contact du corps de digue
- .5 préparer la surface de contact de la recharge amont étanche
- .6 préparer la surface de contact du dissipateur d'énergie

3 - résister à l'érosion interne

- .1 résister à l'érosion interne des eaux d'infiltration provenant du dispositif parafouille
- .2 résister à l'érosion interne des eaux d'infiltration provenant du tapis drainant

4 - limiter les flux hydrauliques

- .1 limiter les flux hydrauliques provenant l'environnement aval
- .2 limiter les flux hydrauliques provenant du dispositif parafouille

5 - évacuer les flux hydrauliques

- .1 évacuer les eaux de fuites vers l'environnement aval
- .2 évacuer les eaux de fuites vers le tapis drainant

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
6	ouvrage traversant	.1 assurer la circulation hydraulique à travers l'ouvrage .1 permettre l'irrigation des cultures .2 permettre le rejet des eaux usées .3 limiter les flux hydrauliques 2 - résister aux sollicitations mécaniques .1 résister au poids propre du corps de digue .2 résister au poids propre du revêtement de protection côté fleuve .3 résister aux sous pressions dans les fondations .4 résister au poids propre de la crête transmis par le corps de digue .5 résister au poids propre de la recharge amont étanche .6 résister au cisaillement .7 résister au poids propre du revêtement de protection côté val .8 résister au poids propre du tapis drainant .9 résister au développement des racines 3 - préparer les surfaces de contact .1 préparer la surface de contact avec de la recharge amont étanche

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

7 tapis drainant

1 - collecter les flux hydrauliques

- .1 collecter les flux hydrauliques provenant de la fondation
- .2 collecter les flux hydrauliques provenant du corps de digue

2 - évacuer les flux hydrauliques

- .1 évacuer les débits de drainage vers le milieu extérieur

3 - résister aux sollicitations mécaniques

- .1 résister au poids propre du corps de digue
- .2 résister au sous pressions dans la fondation meuble
- .3 résister au poids propre de l'ouvrage traversant
- .4 résister aux développement des racines

4 - préparer les surfaces de contact

- .1 préparer la surface de contact du corps de digue
- .2 préparer la surface de contact de l'ouvrage traversant

5 - résister à l'érosion interne

- .1 résister au colmatage par des fines provenant de la fondation meuble
- .2 résister au colmatage par des fines provenant du corps de digue
- .3 filtrer les fines contenues dans les eaux de fuites provenant du corps de digue
- .4 filtrer les fines contenues dans les eaux de fuites provenant de la fondation meuble

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

8 *revêtement
de protection
côté val*

1 - résister à l'érosion externe

- .1 résister aux actions des animaux fouisseurs
- .2 résister au ruissellement

2 - résister aux sollicitations thermiques

- .1 résister au gel-dégel
- .2 résister aux gradients thermiques élevés

3- évacuer les flux hydrauliques

- .1 évacuer l'eau de pluie vers l'aval

4 - résister aux sollicitations mécaniques

- .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
9	<i>corps digue</i>	de 1 - résister aux sollicitations mécaniques .1 résister à la poussée hydrostatique transmise par la recharge amont étanche .2 résister au poids propre du déversoir .3 résister au poids de la crête .4 résister aux charges d'exploitation transmises par la crête .5 résister à la poussée des sédiments transmise par la recharge amont étanche .6 résister à la poussée des glaces transmise par la recharge amont étanche .7 résister aux chocs des embâcles transmis par la recharge amont étanche .8 résister aux sous-pressions provenant de la fondation .9 résister au glissement .10 résister aux développement des racines .11 résister aux actions des animaux fouisseurs 2 - préparer les surfaces de contact .1 préparer la surface de contact de la recharge amont étanche .2 préparer la surface de contact de la crête .3 préparer la surface de contact du déversoir .4 préparer la surface de contact de l'ouvrage traversant .5 préparer la surface de contact du revêtement de protection côté val 3 - résister à l'érosion interne .1 résister au phénomène d'érosion interne du aux eaux d'infiltration provenant de la recharge amont étanche 4 - résister à l'érosion externe .2 résister au phénomène d'érosion externe du aux eaux de ruissellement 5 - limiter les flux hydrauliques .1 évacuer les eaux de fuites provenant du dispositif de drainage .2 évacuer les eaux d'infiltration de la crête

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

10 *dissipateur d'énergie*

1 - résister à l'érosion externe

.1 résister au phénomène d'érosion externe du aux eaux de crue

2 - résister aux sollicitations mécaniques

.1 résister aux chocs d'embâcles

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
----	-----------	--

11 *déversoir*

1 - résister à l'érosion externe

.1 résister au phénomène d'érosion externe du aux eaux de crue

2 - résister aux sollicitations mécaniques

.1 résister aux chocs d'embâcles

Annexe 5 - L'AMDE des digues à étanchéité amont

L'AMDE Produit 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 très 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.

Nous ne présentons ici que l'AMDE des composants concernés par le mécanisme de rupture par érosion interne d'une digue à étanchéité amont.

AMDE Produit							
1 n°	2 COMPOSANT	3 FONCTION	4 MODE DE DEFAILLANCE	5 CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	6 EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	7 INDICATEURS	8 MOYEN DE DETECTION
1	Crête	1 - limiter les flux hydrauliques	la fonction	~ Processus conception-réalisation :	~ Flux hydrauliques		
		.1 limiter les infiltrations d'eau de pluie	" limiter les infiltrations d'eau de pluie"	. composition	. eaux d'infiltration dans le corps de digue	. fuites sur le revêtement de protection côté val	. observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante		. eaux d'infiltration dans la recharge amont étanche		
				~ Etat intrinsèque du composant	~ Flux de charges		
				. fissuration	. sous-pressions dans le corps de digue	. piézométrie	. piézomètres
				. déformation	. sous-pressions dans la recharge amont étanche		
				~ Flux hydrauliques			
				. stagnation d'eau sur la crête			
		2 - évacuer les flux hydrauliques	la fonction	~ Etat intrinsèque du composant	~ Flux hydrauliques		
		.1 évacuer les eaux de ruissellement vers l'environnement amont ou aval	"évacuer les eaux de ruissellement"	. colmatage des drains	. stagnation d'eau sur la crête	. constat de stagnation d'eau sur la crête	. observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante				
				~ Processus conception-réalisation :			
				. composition			
		3 - résister aux sollicitations mécaniques	la fonction	~ Processus conception-réalisation :	~ Etat intrinsèque du composant		
		.1 résister aux charges d'exploitation	"résister aux charges dues à la circulation"	. composition	. fissuration	. fissures en forme d'écailles	. observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante	~ Flux de charges	. déformation	. mesures du développement des fissures	. levés de fissures
				. charges d'exploitation			. fissuromètres
		.2 résister au développement des racines	la fonction	~ Processus conception-réalisation	~ Etat intrinsèque du composant		
			"résister au développement des racines"	. composition	. fissuration	. fissures en forme d'écailles	. observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante	~ Flux de charges	. déformation	. mesures du développement des fissures	. levés de fissures
				. charges de végétation			. fissuromètres
		4 - résister à l'érosion externe	la fonction	~ Flux hydrauliques	~ Etat intrinsèque du composant		
		.1 résister à l'érosion externe provenant des eaux de ruissellement	"résister à l'érosion externe provenant des eaux de ruissellement"	. Érosion des revêtements de protection	. fissuration	. fissures en forme d'écaille	. observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante			. mesures du développement des fissures	. levés de fissures
				~ Processus conception-réalisation :			. fissuromètres
				. composition			
		.2 résister à l'érosion externe au cours d'une crue	la fonction	~ Flux hydrauliques	~ Flux de charges		
			"résister à l'érosion externe au cours d'une crue"	. Érosion des revêtements de protection	. sous-pressions dans le corps de digue	. piézométrie	. piézomètres
			est dégradée ou est défaillante		. sous-pressions dans la recharge amont étanche		
				~ Processus conception-réalisation :			
				. composition			

1 n°	2 COMPOSANT	3 FONCTION	4 MODE DE DEFAILLANCE	5 CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	6 EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	7 INDICATEURS	8 MOYEN DE DETECTION
2	<i>Revêtement de protection côté fleuve</i>						
		1 - évacuer les flux hydrauliques	la fonction	~ Etat intrinsèque du composant	~ Flux hydrauliques		
		.1 assurer l'évacuation des eaux vers le cours d'eau	"évacuer les flux hydrauliques"	. perméabilité	. eaux d'infiltration vers la recharge amont étanche	. détection de fissures dans le revêtement	. observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante	. déformation		. détection de déformation du revêtement	. observation visuelle
				. fissuration			
		2 - résister à l'érosion externe	la fonction	~ Processus conception-réalisation :	~ Etat intrinsèque du composant		
		.1 résister à l'affouillement	"résister à l'érosion externe"	. composition	. glissement	. lentille de glissement	. observation visuelle
		.2 résister aux eaux de ruissellement	est dégradée ou est défaillante				
					. érosion	. fissures	. observation visuelle
		3 - résister aux sollicitations mécaniques	la fonction	~ Processus conception-réalisation	~ Etat intrinsèque du composant		
		.1 résister aux actions des racines	"résister à l'érosion interne"	. composition	. perforation	. présence de végétation	. observation visuelle
		.2 résister aux animaux fouisseurs	est dégradée ou est défaillante	. composition	. perforation	. présence de terriers	. observation visuelle
		.3 résister aux chocs d'embâcles	"résister à l'érosion externe"	. composition	. déformation	. constat de déformations superficielles	. observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante				

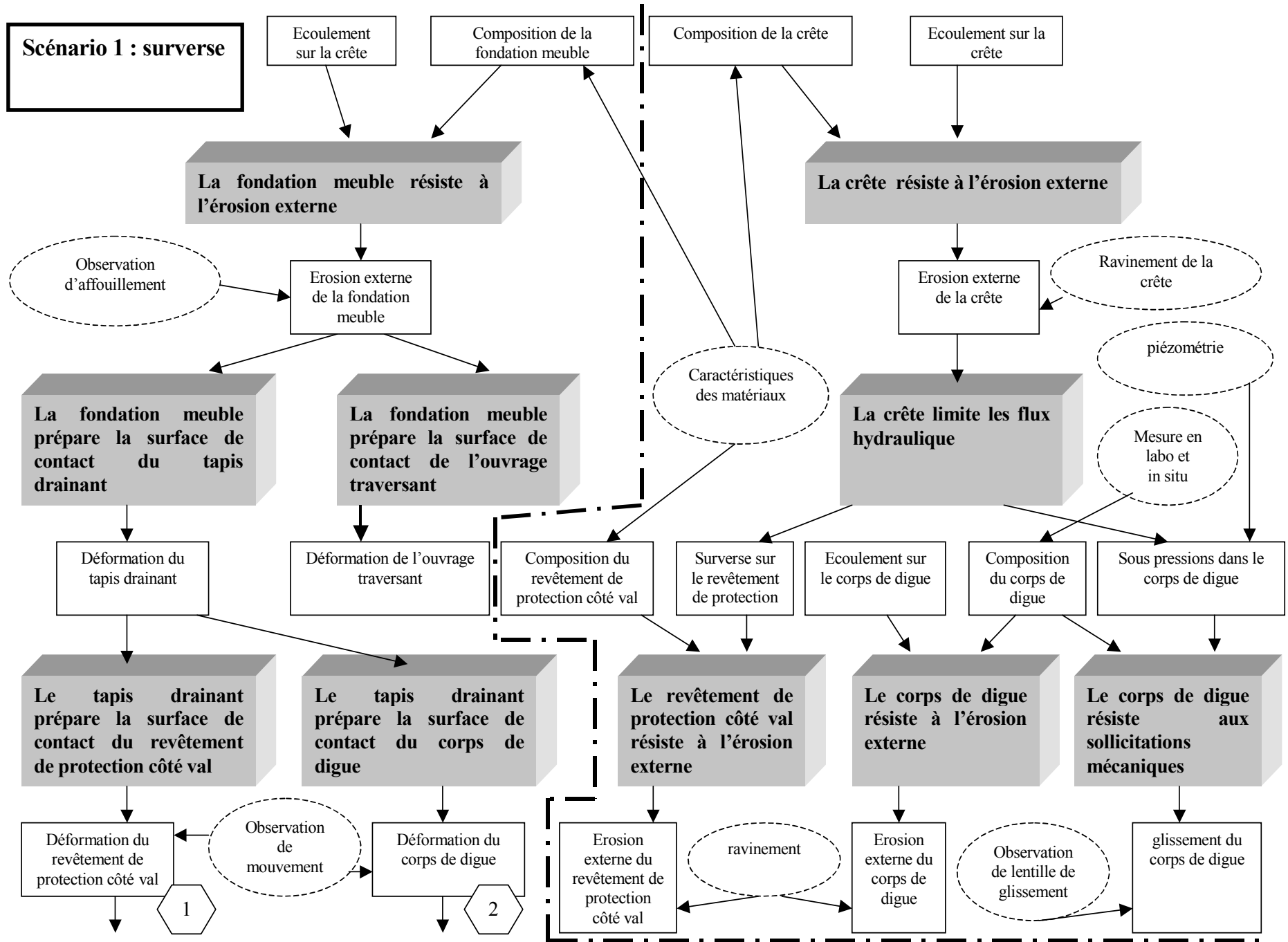
1 n°	2 COMPOSANT	3 FONCTION	4 MODE DE DEFAILLANCE	5 CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	6 EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	7 INDICATEURS	8 MOYEN DE DETECTION
3	<i>Recharge amont étanche</i>						
		1 - résister aux sollicitations mécaniques	la fonction	~ Flux de charges	~ Etat intrinsèque du composant		
		.1 résister à la poussée hydrostatique transmise par le revêtement de protection côté fleuve	" résister aux sollicitations mécaniques"	. sous-pressions dans la recharge amont étanche	. fissuration	. fissures	~observation visuelle
		.2 résister au poids propre déversoir	est dégradée ou est défaillante	. Charges agissant sur la crête	. glissement	. Lentilles de glissement	~observation visuelle
		.3 résister au poids de la crête		~ Processus conception-réalisation	. déformation	. mesures du tassement	~ mesures topographiques
		.4 résister aux charges d'exploitation transmises par la crête		. composition			. planimétrie
		.5 résister à la poussée des sédiments transmise par le revêtement de protection côté fleuve					. nivellement
		.6 résister à la poussée des glaces transmise par le revêtement de protection côté fleuve		~ Etat intrinsèque du composant			. mesures d'alignement
		.7 résister aux chocs des embâcles transmis par le revêtement de protection côté fleuve		. déformation			
		.8 résister aux sous-pressions provenant de la fondation meuble					
		.9 résister au glissement					
		.10 résister aux développement des racines					
		.11 résister aux animaux fouisseurs					
		2 - préparer les surfaces de contact	la fonction	~ Etat intrinsèque du composant	~ Contacts		
		.1 préparer la surface de contact de la crête	" préparer les surfaces de contact"	. déformation	. Déformation de la crête	. mesures du tassement	~observation visuelle
		.2 préparer la surface de contact du déversoir	est dégradée ou est défaillante				~observation visuelle
		.2 préparer la surface de contact du corps de digue					~ mesures topographiques
		3 - résister à l'érosion interne					
		.1 résister au phénomène d'érosion interne du aux eaux d'infiltration provenant du revêtement de protection côté fleuve					. mesures d'alignement
			est dégradée ou est défaillante				. planimétrie
							. nivellement
		4 - limiter les flux hydrauliques	la fonction	~ Etat intrinsèque du composant	~ Flux hydrauliques		
		.1 limiter les eaux d'infiltrations dans le remblai (assurer l'étanchéité du remblai)	"limiter les flux hydrauliques"	. Fissuration	. eaux d'infiltration dans le corps de digue	. Traces d'humidité ou fuite	. Observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante	. Erosion			

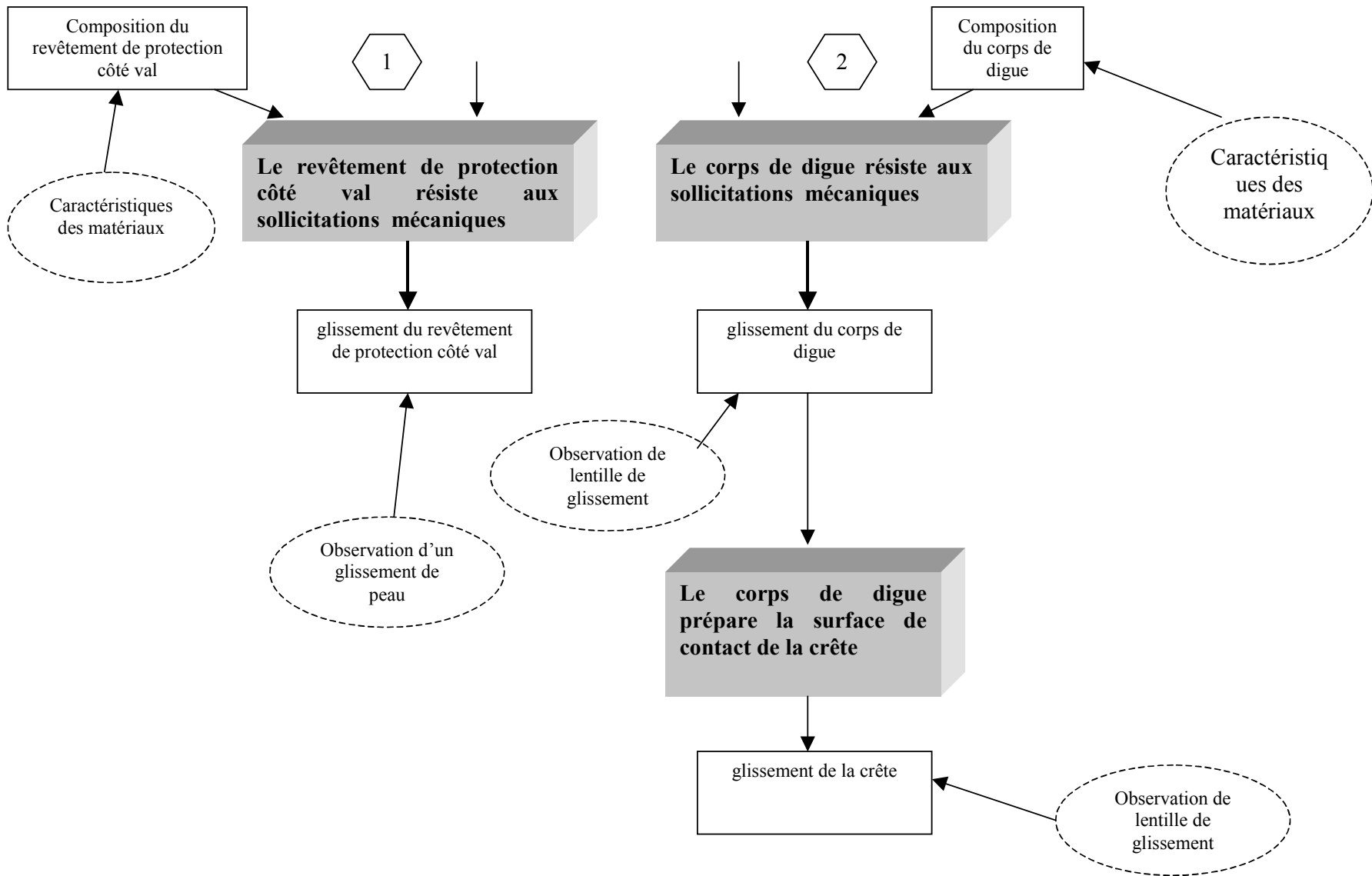
1 n°	2 COMPOSANT	3 FONCTION	4 MODE DE DEFAILLANCE	5 CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	6 EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	7 INDICATEURS	8 MOYEN DE DETECTION
9	corps de digue						
		1 - résister aux sollicitations mécaniques	la fonction	~ Flux de charges	~ Etat intrinsèque du composant		
		.1 résister à la poussée hydrostatique transmise par la recharge amont étanche	"résistance aux sollicitations mécaniques"	. sous-pressions dans la recharge amont étanche	. fissuration	. fissures	~observation visuelle
		.2 résister au poids propre du déversoir	est dégradée ou est défaillante		. glissement	. Lentilles de glissement	~observation visuelle
		.3 résister au poids de la crête		~ Processus conception-réalisation	. déformation	. mesures du tassement	~ mesures topographiques
		.4 résister aux charges d'exploitation transmises par la crête		. composition			. planimétrie
		.5 résister à la poussée des sédiments transmise par la recharge amont étanche					. nivellement
		.6 résister à la poussée des glaces transmise par la recharge amont étanche		~ Etat intrinsèque du composant			. mesures d'alignement
		.7 résister aux chocs des embâcles transmis par la recharge amont étanche		. déformation			
		.8 résister aux sous-pressions provenant de la fondation		. érosion			
		.9 résister au glissement					
		.10 résister aux développement des racines					
		.11 résister aux actions des animaux fouisseurs					
		2 - préparer les surfaces de contact	la fonction	~ Etat intrinsèque du composant	~ Contacts		
		.1 préparer la surface de contact de la recharge amont étanche	" préparer les surfaces de contact"	. déformation	. Déformation de la crête	. mesures du tassement	~observation visuelle
		.2 préparer la surface de contact de la crête	est dégradée ou est défaillante				~observation visuelle
		.3 préparer la surface de contact du déversoir					~ mesures topographiques
		.4 préparer la surface de contact de l'ouvrage traversant					. planimétrie
		.5 préparer la surface de contact du revêtement de protection côté val					. nivellement
							. mesures d'alignement
		3 - résister à l'érosion interne	la fonction	~ Etat intrinsèque du composant	~ Etat intrinsèque du composant		
		.1 résister au phénomène d'érosion interne du aux eaux d'infiltration provenant de la recharge amont étanche	" résister à l'érosion interne"	. fissuration	. érosion	. Traces d'humidité ou fuite	. Observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante	~ Flux hydrauliques			
				. eaux d'infiltration dans le corps de digue			
		4 - résister à l'érosion externe	la fonction	~ Etat intrinsèque du composant	~ Etat intrinsèque du composant		
		.2 résister au phénomène d'érosion externe du aux eaux de ruissellement	" résister à l'érosion externe"	. fissuration	. érosion	. Traces d'humidité ou fuite	. Observation visuelle
			est dégradée ou est défaillante	~ Flux hydrauliques			
				. eaux d'infiltration dans le corps de digue			
		5 - évacuer les flux hydrauliques	la fonction	~ Processus conception-réalisation	~ Flux hydrauliques		
		.1 évacuer les eaux de fuites provenant du dispositif de drainage	"évacuer les flux hydrauliques"	. composition	. stagnation d'eau sur la crête	. constat de stagnation d'eau sur la crête	. observation visuelle
		.2 évacuer les eaux d'infiltration de la crête	est dégradée ou est défaillante				

Annexe 6 - Les scénarios de rupture des digues à étanchéité amont

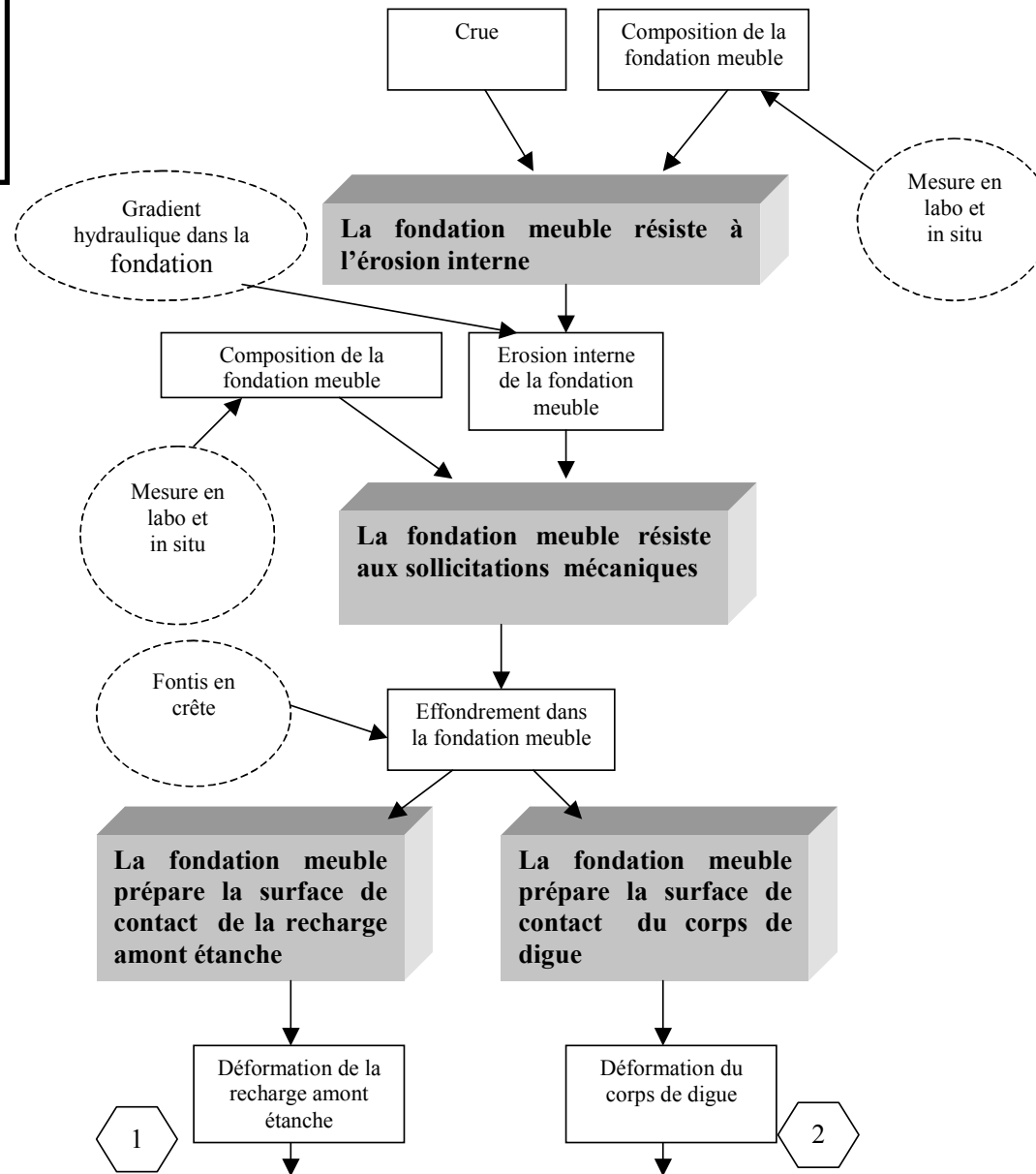
Nous présentons dans cette annexe les scénarios de rupture des digues à étanchéité amont sous la forme de graphes causaux :

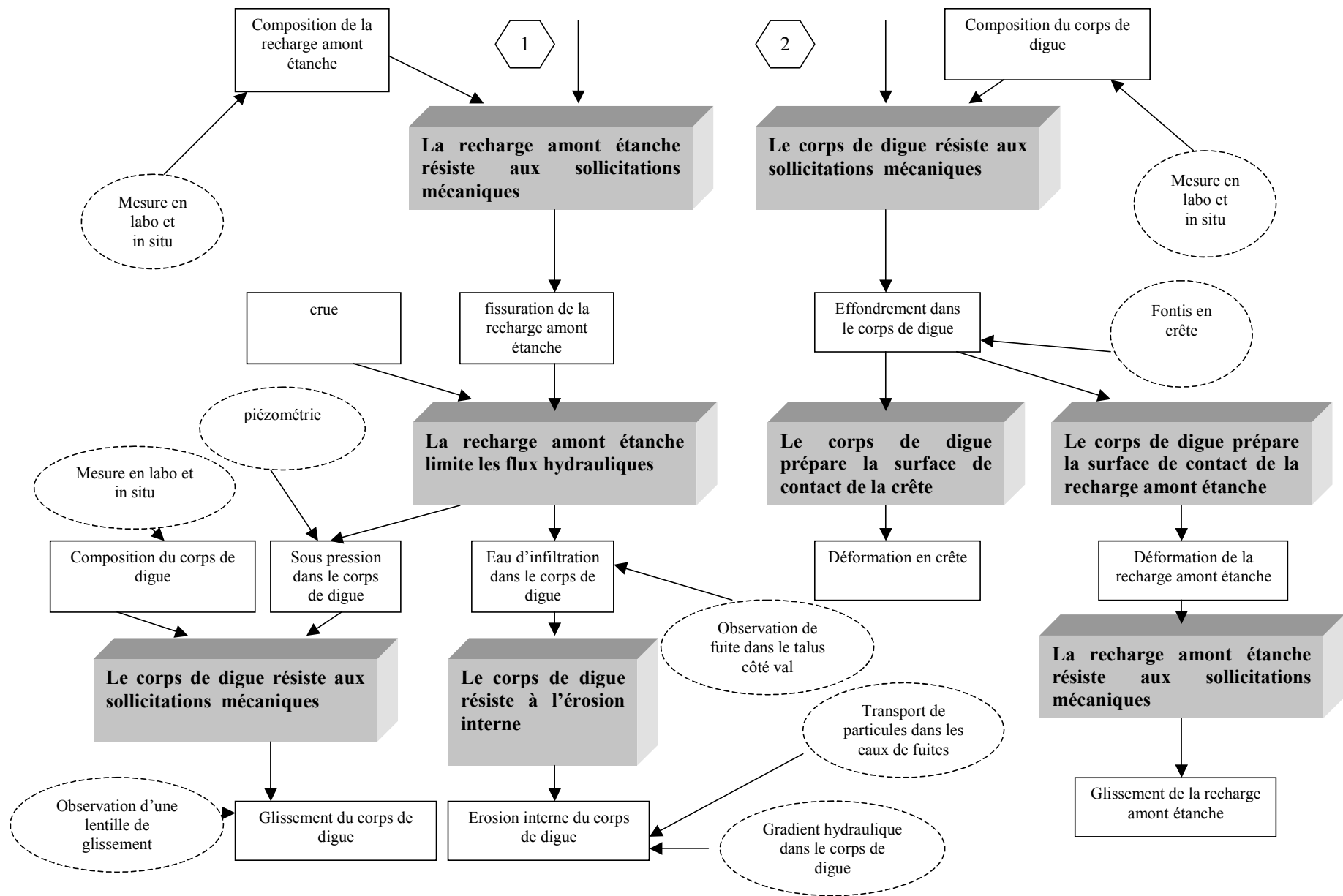
- la surverse ;
- l'érosion interne en fondation ;
- l'affouillement ;
- la perte d'étanchéité de la recharge amont étanche ;
- le glissement.



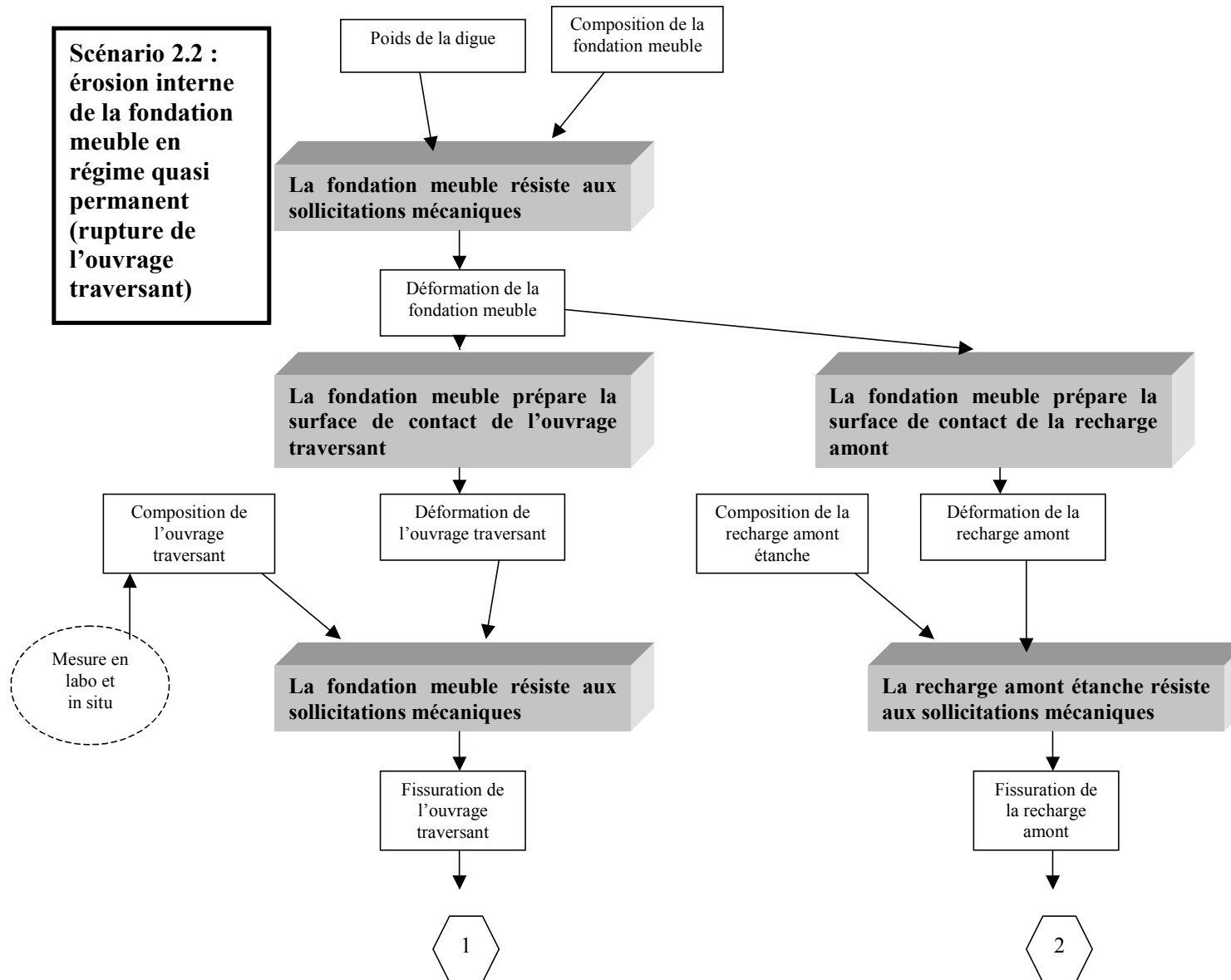


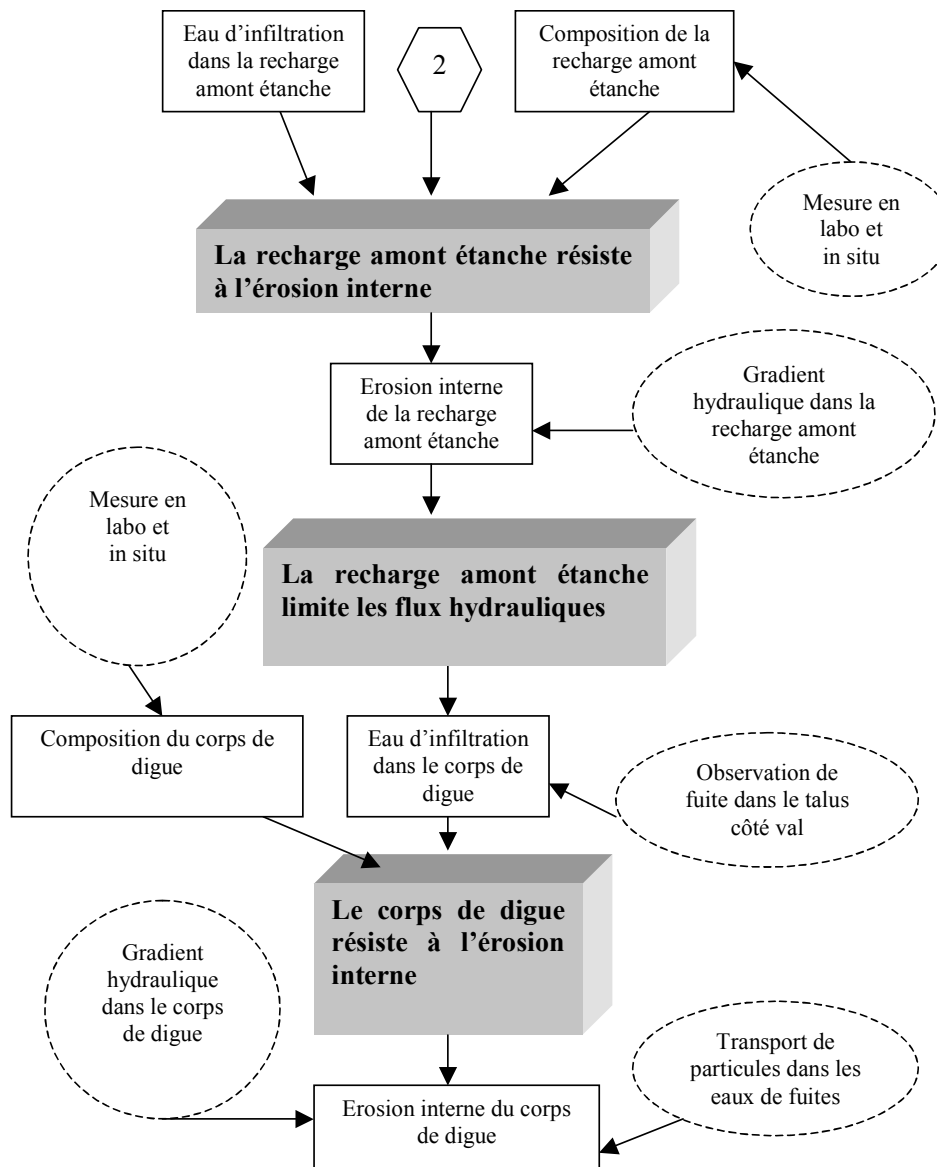
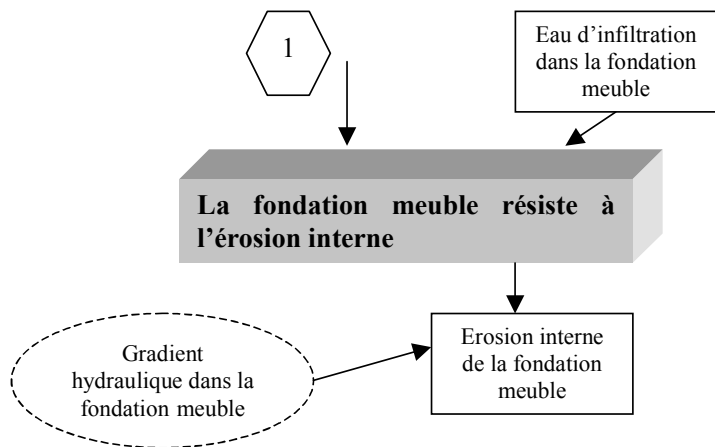
**Scénario 2.1 :
érosion interne de la
fondation meuble en
crue**



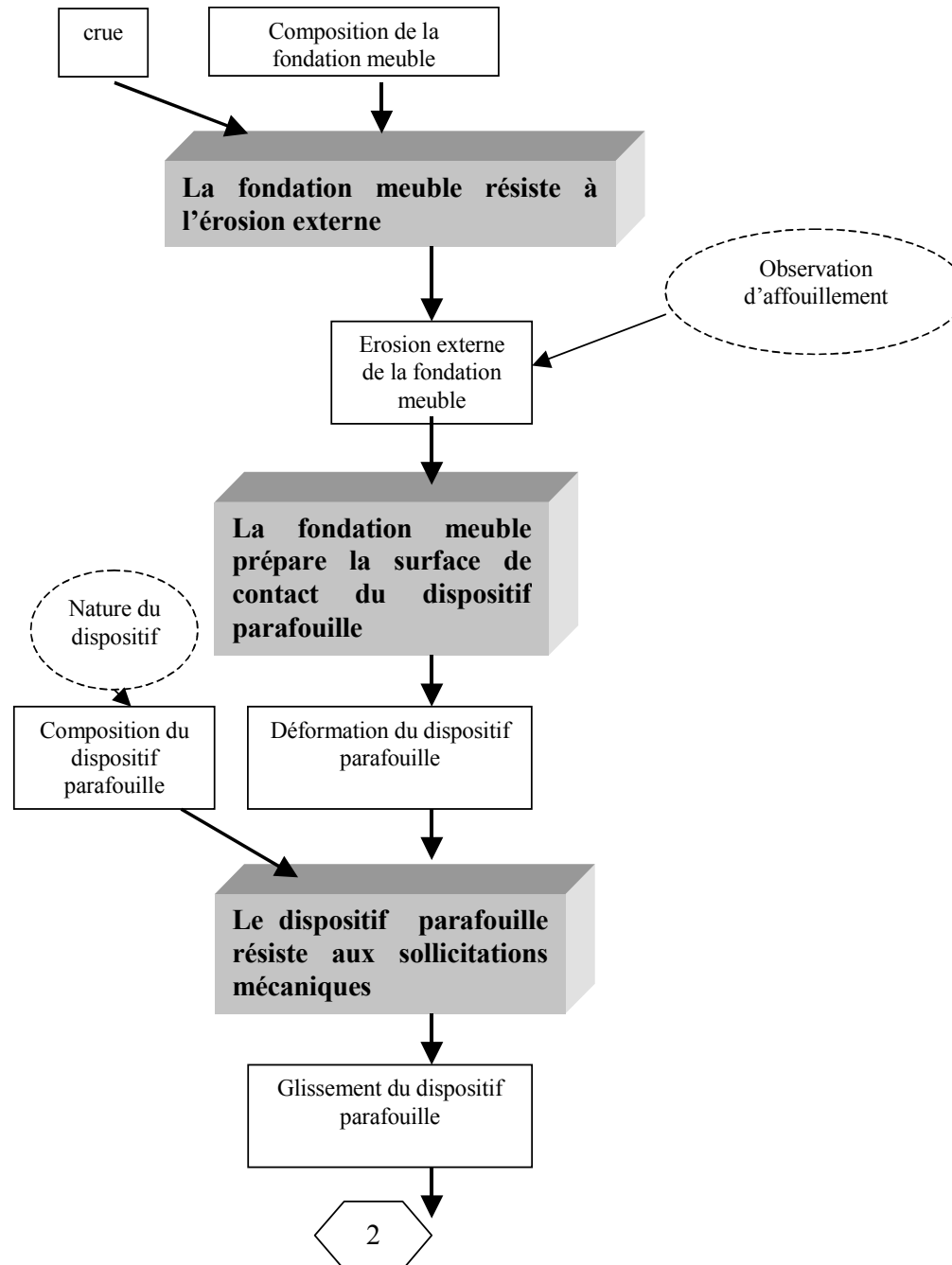


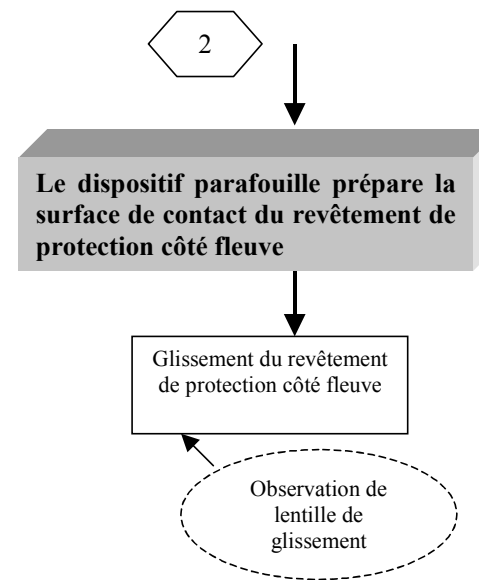
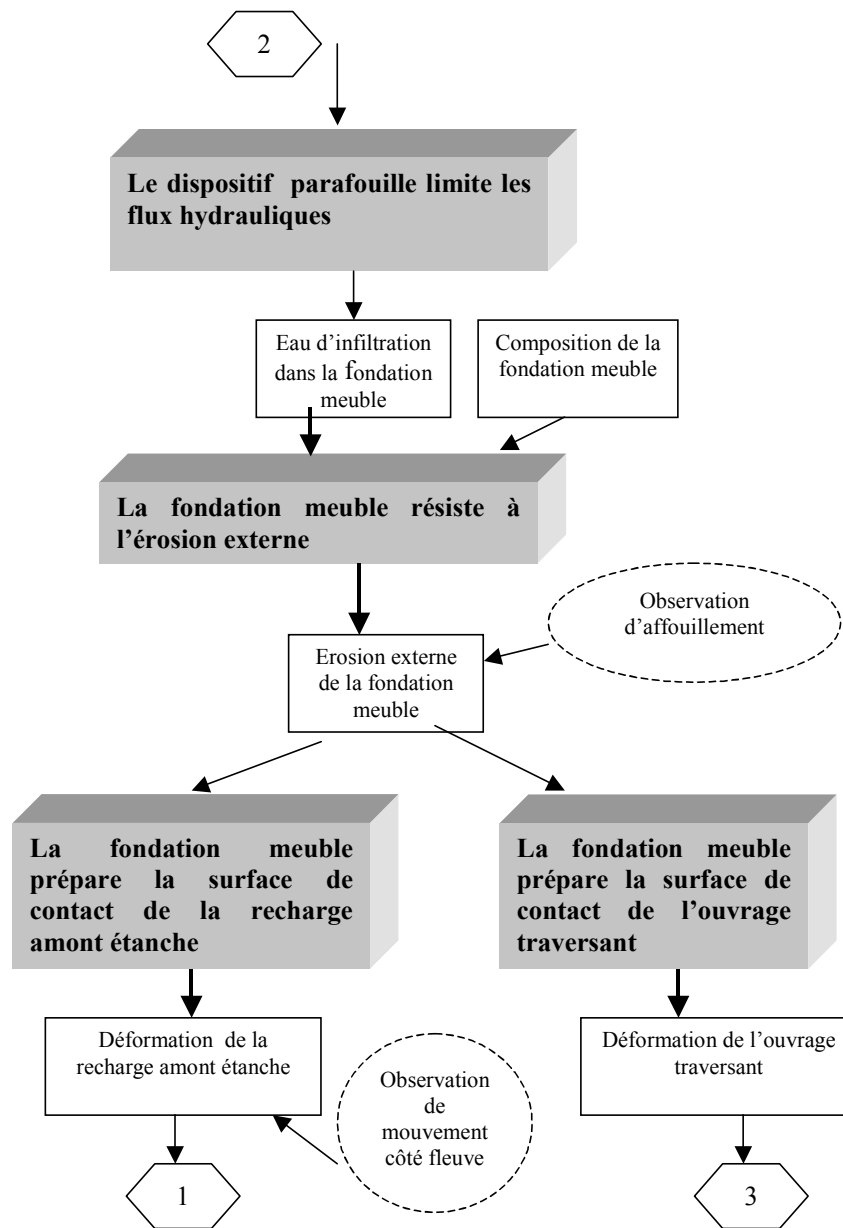
**Scénario 2.2 :
érosion interne
de la fondation
meuble en
régime quasi
permanent
(rupture de
l'ouvrage
traversant)**

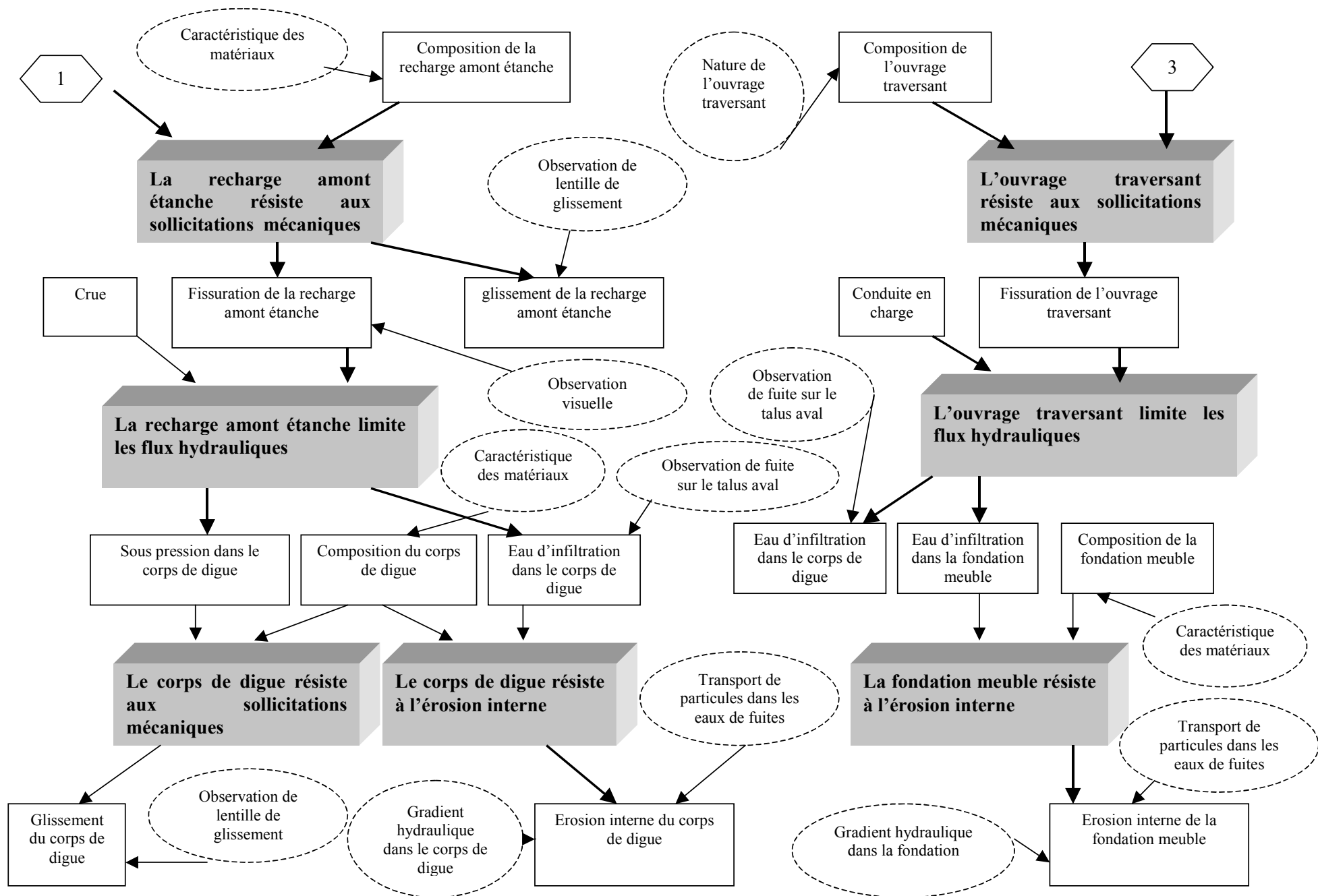




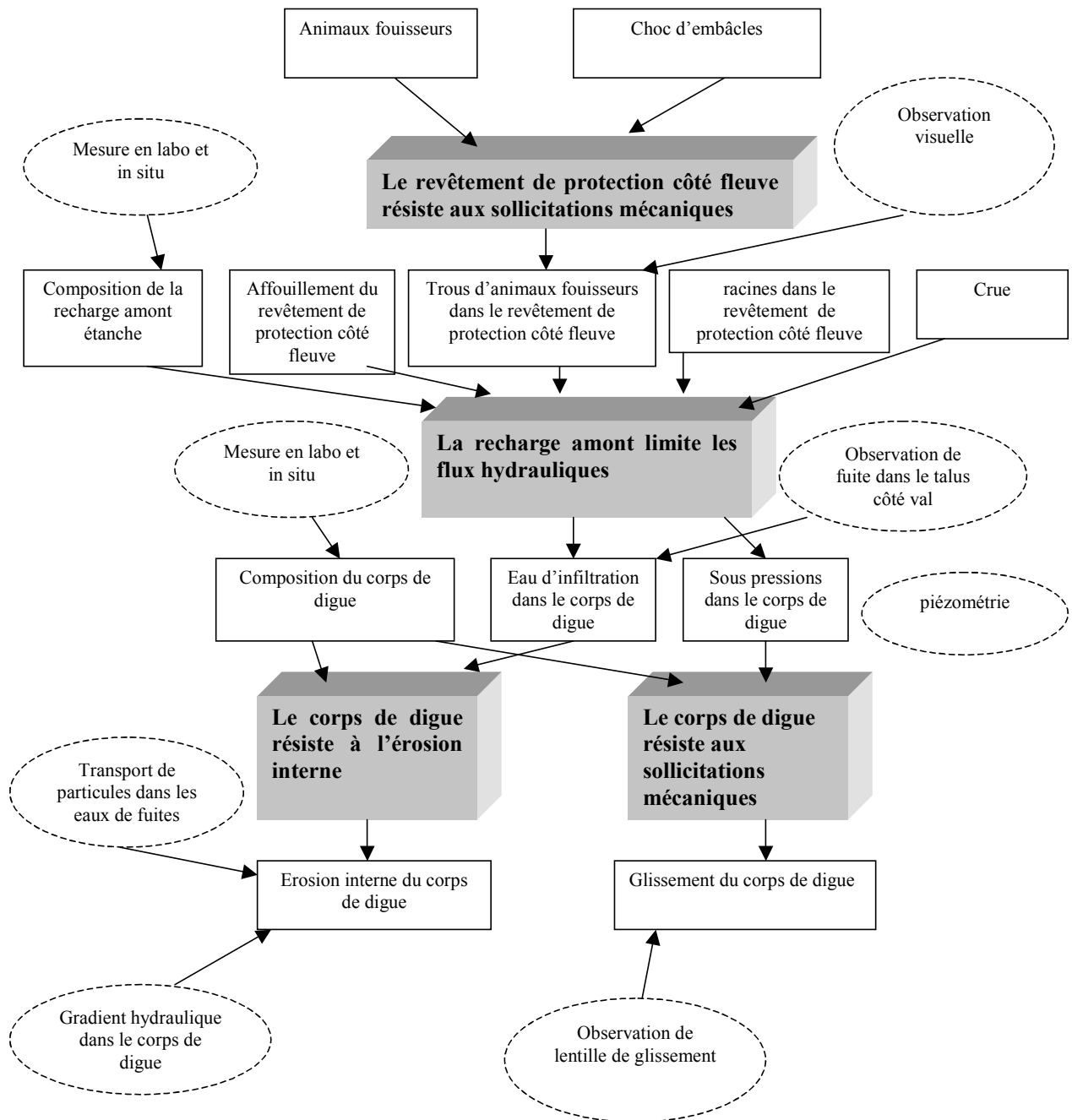
**Scénario 3 :
Affouillement**



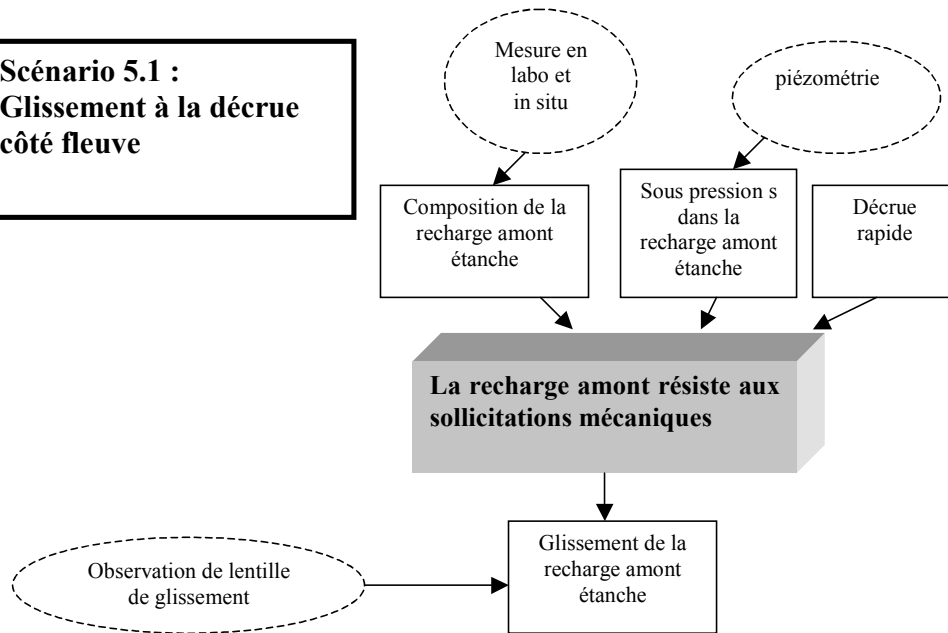




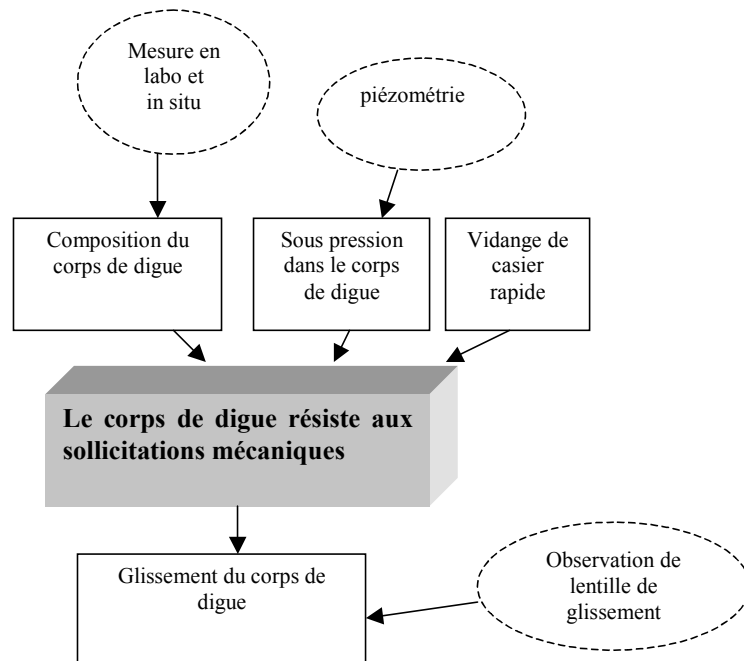
Scénario 4 : perte d'étanchéité de la recharge amont étanche



Scénario 5.1 :
Glissement à la décrue
côté fleuve



Scénario 5.2 :
Glissement à la décrue
côté val



Annexe 7 - Compte rendu des réunions d'experts des digues destinées à l'évaluation multicritère de la performance

Cette annexe présente tout d'abord le mode d'évaluation de chacun des critères du scénario représentant le mécanisme d'érosion interne d'une digue à étanchéité amont.

Puis est présentée la méthode multicritère d'évaluation de la performance de la digue.

Evaluation experte des critères du scénario « perte d'étanchéité de la recharge amont étanche », et agrégation multicritère pour l'évaluation de la performance des digues.

Damien Serre

Unité de Recherche "Ouvrages Hydrauliques"
Cemagref, groupement d'Aix en Provence
B.P. 31, 13612 Aix en Provence Cedex 1
France

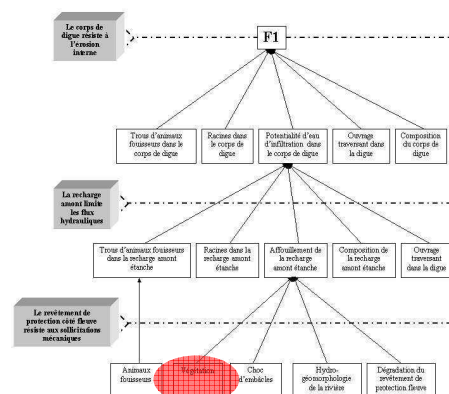
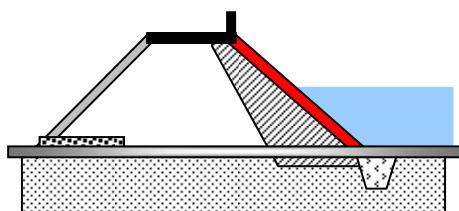
Règles de base

- tous les indicateurs, sous-critères et critères sont évalués avec la même échelle de scores ;
- les scores peuvent varier de 0 à 10, soit 11 niveaux, 0 correspond à la situation idéale, tandis que 10 à la situation la plus critique ;
- la correspondance des scores par rapport aux informations relevées est fixée par un panel d'experts ;
- la fonction de la personne censée relever l'information est indiquée en gras entre parenthèse en face de chaque indicateur ;
- l'importance relative des indicateurs, sous-critères et critères est prise en compte par la possibilité de faire varier à l'intérieur de l'échelle des scores les scores maximum et les scores minimums : pour un critère donné on utilisera toute l'amplitude de l'échelle (0 à 10), pour un autre critère on utilisera un intervalle : les scores pourront varier de 0 à 5 par exemple ;
- les indicateurs et sous-critères sont agrégés avec l'utilisation d'un opérateur simple : MAX ;

Echelle des scores :

score	qualification	code couleur
0	excellent	
1	bon	
2	bon	
3	passable	
4	passable	
5	médiocre	
6	médiocre	
7	mauvais	
8	mauvais	
9	mauvais	
10	inacceptable	

Evaluation du critère « végétation sur le revêtement de protection côté fleuve »



Critère "Végétation"												
sous-critère	indicateur											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
perré excellence												
				X	X	X	X					
	X											
terre excellence												
				X		X	X					
	X											

Règles générales :

Est considérée ici la végétation sur la digue (côté fleuve) et à ses abords, limités à 2 mètres de la digue. Concernant ce critère végétation, l'incertitude est latente : des recherches sont actuellement en cours pour déterminer les essences les plus néfastes pour une digue.

Il faut raisonner en taille adulte de l'espèce : si une jeune pousse est repérée, il faut la considérer dans sa taille adulte.

Le score dépend de la nature du revêtement de protection côté fleuve (perré ou terre). La densité n'est pas considérée pour les grands et petits arbres.

Conditions excellentes :

- 0** absence totale de végétation dans le cas d'un perré
 ou herbe dans le cas de la terre

Conditions inacceptables :

- 10** présence d'un grand arbre dans le cas d'un perré
 ou présence d'un petit arbre dans le cas d'un perré
-

Règles d'évaluation des indicateurs :

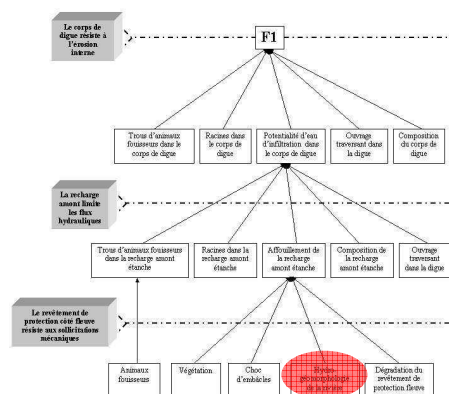
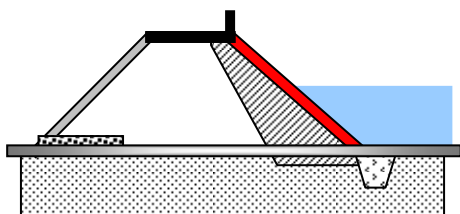
<i>perré :</i>	(garde digue)
5 grand ou petit arbre	
4 buissons	
3 herbe généralisée	
2 herbe éparse	
0 pas de végétation	

<i>terre :</i>	(garde digue)
5 grand arbre	
4 petit arbre	
2 buissons	
0 herbe	

Règles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation du critère :

MAX : le score le plus élevé est retenu

Evaluation du critère « géomorphologie de la rivière »



Critère "hydrogéomorphologie"												
sous-critère	indicateur											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	largeur ségonnal	X				X	X	X				X
	excellence	X										

Règles générales :

Globalement, le critère « hydrogéomorphologie » est à laisser à l'appréciation de l'expert en géomorphologie. Toutefois, le garde digue pourra relever des informations relatives à la largeur du ségonnal.

Si on dispose seulement des informations relevées par le garde digue, on les utilise pour l'évaluation du critère. Si on dispose d'études menées par des experts, on les utilise pour l'évaluation du critère. Si on dispose des deux (expert et garde digue), on utilise les informations de l'expert pour évaluer le critère.

Si l'observateur ne peut se prononcer entre la stabilité ou l'évolution du ségonnal, on retient la situation la plus défavorable.

Un ségonnal étroit a une largeur inférieure à 10% de la largeur du lit.

Un ségonnal large a une largeur supérieure à 10 % de la largeur du lit ou supérieure à 10 mètres.

Conditions excellentes :

0 largeur de ségonnal supérieure à 5 mètres

Conditions inacceptables :

10 absence de ségonnal
ou largeur de ségonnal comprise entre 0 et 1 mètre évolutive (tendance à l'érosion)

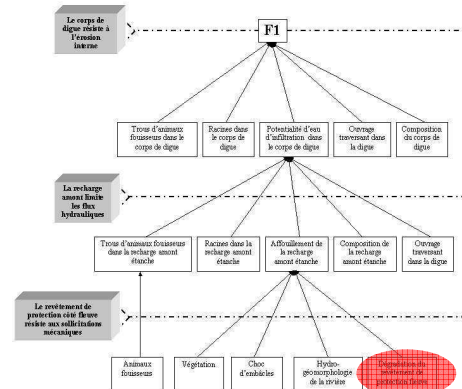
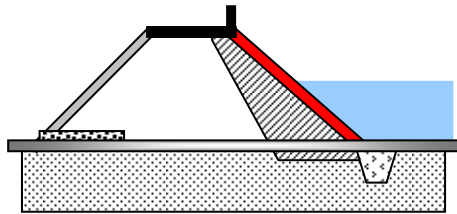
Règles d'évaluation des indicateurs :

Largeur du ségonnal :

(garde digue)

10 absence de ségonnal stable dans le temps ou largeur de ségonnal comprise entre 0 et 1 mètre évolutive
6 largeur de ségonnal comprise entre 0 et 1 mètre et stable
5 largeur de ségonnal comprise entre 1 et 5 mètres et évolutif
4 largeur de ségonnal comprise entre 1 et 5 mètres et stable
0 largeur de ségonnal supérieure à 5 mètres

Evaluation du critère « composition du revêtement de protection côté fleuve »



Critère "Composition du revêtement de protection côté fleuve"											
sous-critère	indicateur										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	résistance érosion	X		X		X		X	X		X
	excellence	X									

Règles générales :

Le critère « composition du revêtement de protection côté fleuve » est évalué par rapport à sa résistance à l'érosion. La résistance à l'érosion dépend de la nature du revêtement : perré, terre végétale, enrochement, dalle béton.

Si nous sommes en présence d'une couche de protection en enrochements sans transition (filtre), les scores sont majorés de 2. Le problème d'un perré sans transition n'est à ce jour pas résolu.

Conditions excellentes :

0 perré ou enrochement ou dalle béton en parfait état

Conditions inacceptables :

10 absence de protection
ou perré ou enrochement ou dalle béton avec trous
ou terre végétale érodée par pants

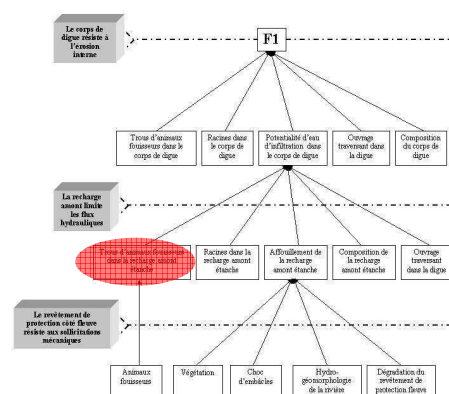
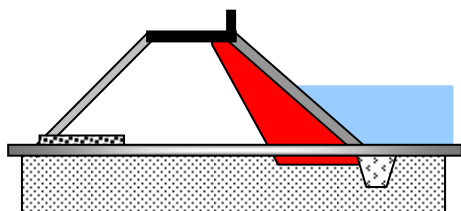
Règles d'évaluation des indicateurs :

Résistance à l'érosion :

(garde digue)

10 perré ou enrochement ou dalle béton avec trous ou terre non engazonnée (terre nue)
7 perré avec pierres localement absentes ou décalées
ou terre végétale nue
6 perré ou enrochement ou dalle béton avec quelques dégradations **ou** terre mal engazonnée (mitage)
4 dégradations superficielles localisées du perré
ou terre mal engazonnée (mitage)
2 terre parfaitement engazonnée
0 perré ou enrochement ou dalle béton en parfait état

Evaluation du critère « trous d'animaux fouisseurs dans la recharge amont étanche »



Critère "Trous d'animaux fouisseurs dans la recharge amont étanche"										
sous-critère	indicateur	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	profonds									
	superficiels					X			X	X
	excellence	X								

Règles générales :

La densité des terriers n'est pas prise en compte. En effet, un seul terrier peut provoquer des flux d'eau dans la recharge amont étanche : à un seul terrier peut correspondre un ensemble de galeries dans la digue. La densité de terrier n'est donc pas un critère.

Conditions excellentes :

- 0** aucun trou d'animaux fouisseurs
 ou revêtement de protection côté fleuve en perré, plaque de béton, matériaux granulaires
 ou grillage antifouisseur en bon état.

Conditions inacceptables :

- 10** trou profond dans la recharge amont étanche peu épaisse
 ou trou superficiel dans la membrane non protégée
 ou trou et grillage antifouisseur en mauvais état
 ou impossibilité d'observer l'information (ex : présence de végétation trop dense)
-

Règles d'évaluation des indicateurs :

Trou profond (blaireau et ragondin) : (garde digue)

- 10** terriers de blaireau ou ragondin

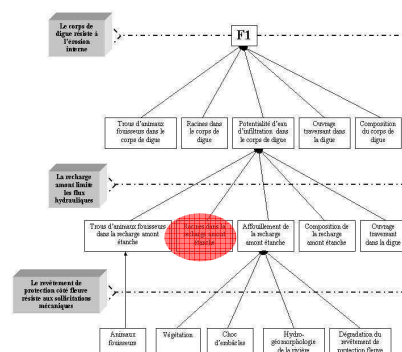
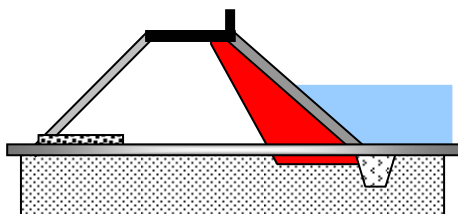
Trou superficiel (autre fouisseur) : (garde digue)

- 10** si la recharge amont étanche est une membrane non protégée
9 si la recharge amont étanche est une membrane peu protégée, par exemple par de la terre végétale
8 si la recharge amont étanche est une membrane avec un confinement métrique
7 si la recharge amont étanche est sub-métrique
4 si la recharge amont étanche a une épaisseur de plusieurs mètres
-

Règles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation du critère :

MAX : le score le plus élevé est retenu

Evaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche »



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										

Règles générales :

Est considérée ici la végétation sur la digue (talus côté fleuve et crête) et à ses abords, limités à 2 mètres de la digue. La position de la végétation est toujours considérée par rapport au dispositif d'étanchéité de la digue. Concernant ce critère végétation, l'incertitude est latente : des recherches sont actuellement en cours pour déterminer les essences les plus néfastes pour une digue.

Il faut raisonner en taille adulte de l'espèce : si une jeune pousse est repérée, il faut la considérer dans sa taille adulte.

Pour les grands arbres, la densité n'est pas retenue comme critère : les racines d'un seul grand arbre peuvent fragiliser fortement la recharge amont étanche.

Conditions excellentes :

0 aucun arbre ou buisson sur la digue ou à moins de 2 mètres

Conditions inacceptables :

10 grand arbre mort en contact de la recharge amont étanche ou à moins de 2 mètres de la recharge amont étanche

Règles d'évaluation des indicateurs :**GRANDS ARBRES : (garde digue)**

Côté fleuve et crête en contact avec le dispositif d'étanchéité :

- 10** si l'arbre est mort
- 9** si l'arbre est vivant et penché
- 8** si l'arbre est vivant et droit

Côté fleuve hors dispositif d'étanchéité :

- 6**
 - 5**
 - 4**
 - 3**
- Une large plage de score est laissée à l'appréciation de l'expert du fait des recherches en cours sur la végétation.

PETITS ARBRES : (garde digue)

Côté fleuve et crête en contact avec le dispositif d'étanchéité :

- 9** si les arbres sont morts et denses (difficilement pénétrable)
- 8** si les arbres sont vivants et denses (difficilement pénétrable) ou morts et épars (facilement pénétrable)
- 7** si les arbres sont épars

Côté fleuve hors dispositif d'étanchéité :

- 4**
 - 3**
- cette plage de score est laissée à l'appréciation de l'expert du fait des recherches en cours sur la végétation.

BUISSONS : (garde digue)

Côté fleuve et crête en contact avec le dispositif d'étanchéité :

- 4**
 - 3**
- cette plage de score est laissée à l'appréciation de l'expert du fait des recherches en cours sur la végétation.

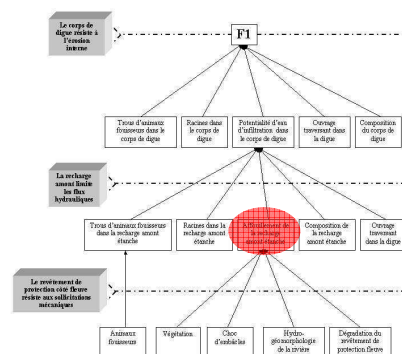
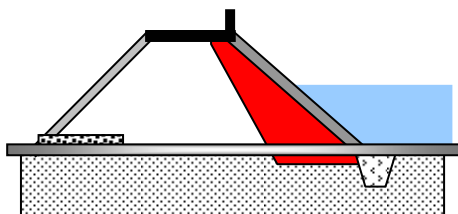
Côté fleuve hors dispositif d'étanchéité :

- 3** les buissons gênent l'inspection
 - 2** bosquets diffus
-

Règles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation du critère :

MAX : le score le plus élevé est retenu

Evaluation du critère « érosion dans la recharge amont étanche »



Critère "Erosion de la recharge amont étanche"												
sous-critère	indicateur											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	érosion observée							X		X		X
	glissement observ							X		X		X
	inobservabilité											X
	calcul stabilité	X		X		X		X			X	X
	excellence	X										
	potentia. affouil	X		X		X		X		X	X	X

Règles générales :

La profondeur de l'affouillement est toujours considérée par rapport à la profondeur maximum vis-à-vis de l'épaisseur de la recharge amont étanche.

Conditions excellentes :

- 0** pas d'érosion et pas de glissement observés
ou géomembrane en parfait état
ou le résultat du calcul de stabilité est excellent
ou la potentialité d'affouillement est exclue (résultat de l'agrégation des critères liés au revêtement de protection côté fleuve)

Conditions inacceptables :

- 10** glissement concernant la totalité de l'épaisseur de la recharge amont étanche
ou érosion concernant la totalité de l'épaisseur de la recharge amont étanche
ou déchirure dans la géomembrane
ou impossibilité d'observer l'information (ex : présence de végétation trop dense)
ou le résultat du calcul de stabilité est inacceptable
ou la potentialité d'affouillement est certaine (résultat de l'agrégation des critères liés au revêtement de protection côté fleuve)
-

Règles d'évaluation des indicateurs :*Erosion observée :* (garde digue)

- 10** la totalité de l'épaisseur de la recharge amont est érodée
8 50% de l'épaisseur de la recharge amont est érodée
6 l'érosion est superficielle, inférieure à 10 cm
ou trou dans la géomembrane

Glissement observé : (garde digue)

- 10** la totalité de l'épaisseur de la recharge amont a glissé
8 50% de l'épaisseur de la recharge amont a glissé
6 le glissement est superficiel, inférieur à 10 cm

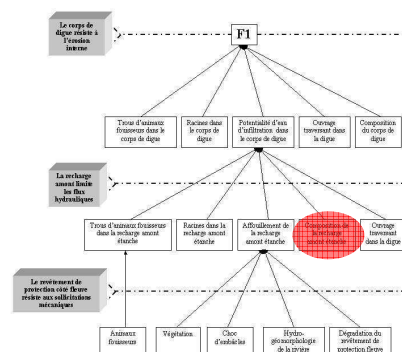
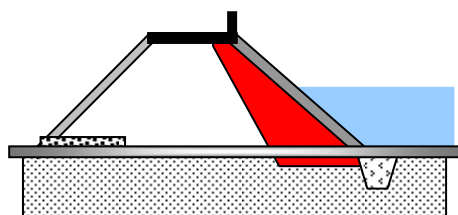
Calcul stabilité : (expert)

- 10**
9
8
6
4
2
0
- A l'appréciation de l'expert
-

Règles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation du critère :

MAX : le score le plus élevé est retenu

Evaluation du critère « composition de la recharge amont étanche »



Critère "Composition de la recharge amont étanche"												
sous-critère	indicateur											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
stab vdange rapide membrane	k*D/E	X	X	X	X	X	X	X	X			
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		X	X	X	X	X						

Règles générales :

La composition de la recharge amont étanche est évaluée avec la formule suivante :

$$k(m/s)*D(s)/E(m)$$

k correspond à la perméabilité

D correspond à la durée de la crue

E correspond à l'épaisseur de la recharge amont étanche

Si les règles de filtre ne sont pas respectées entre le corps de digue et la recharge étanche, le score est majoré de 2 (si $K*D/E > 1$).

Conditions excellentes :

0 conception et réalisation dans le respect des règles de l'art

Règles d'évaluation des indicateurs :

$K*D/E$: (expert)

7	$K*D/E > 1$	} doit faire l'objet d'approfondissements
6	$K*D/E > 1$	
5	$K*D/E > 1$	
4	$K*D/E > 1$	
3	$K*D/E > 1$	
2	$0,1 < K*D/E < 1$	}
1	$0,1 < K*D/E < 1$	
0	$K*D/E < 0,1$	

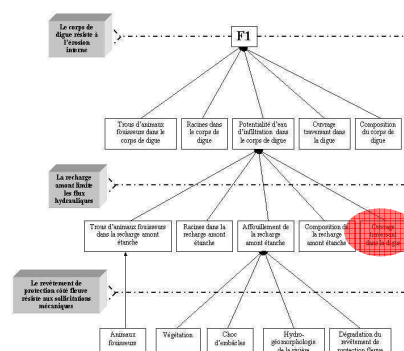
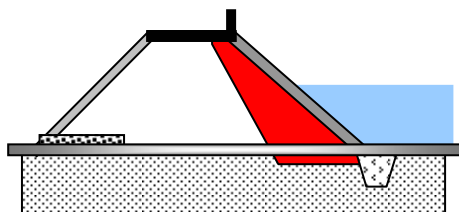
membrane : (expert)

4	} dispositif d'étanchéité par géomembrane mal posé (non respect des règles de l'art
3	
2	
1	
0	} dispositif d'étanchéité par géomembrane posé selon les règles de l'art (couche de pose antipoinçonnante et couche support)

Règles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation du critère :

MAX : le score le plus élevé est retenu

Evaluation du critère « ouvrage traversant dans la recharge amont étanche »



Critère "Ouvrage traversant dans la recharge amont étanche"										
sous-critère	indicateur									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
non en charge		X	X	X					X	X
	en charge		X	X					X	X
	excellence	X								
* les scores d'un ouvrage traversant peu entretenu sont majorés d'1 point. Les scores d'un ouvrage traversant pas entretenu sont majorés de 2 points.										

Règles générales :

Le critère ouvrage traversant est évalué par rapport à la qualité de sa conception.

Les scores d'un ouvrage traversant peu entretenu sont majorés d'1 point.

Les scores d'un ouvrage traversant pas entretenu sont majorés de 2 points.

Si un ouvrage est observé sans aucune information sur sa conception ou son entretien, le score **10** est affecté par défaut.

Conditions excellentes :

- 0** conception selon les règles de l'art pour un ouvrage traversant non en charge et disposé en cavalier

Conditions inacceptables :

- 10** ouvrage traversant en très mauvais état
ou en mauvais état et peu ou pas entretenu*
ou absence d'information sur un ouvrage traversant

*les scores d'un ouvrage traversant peu entretenu sont majorés d'1 point, les scores d'un ouvrage traversant pas entretenu sont majorés de 2 points.

Règles d'évaluation des indicateurs :

Composition de la conduite non en charge :

(expert)

- | | | |
|-----------|---|---|
| 10 | } | Non respect des règles de l'art |
| 9 | | |
| 8 | | |
| 7 | | |
| 2 | | la construction de la conduite respecte les règles de l'art |
| 1 | | la construction de la conduite respecte les règles de l'art |
| 0 | | la construction de la conduite respecte les règles de l'art et est disposée en cavalier |

Composition de la conduite en charge :

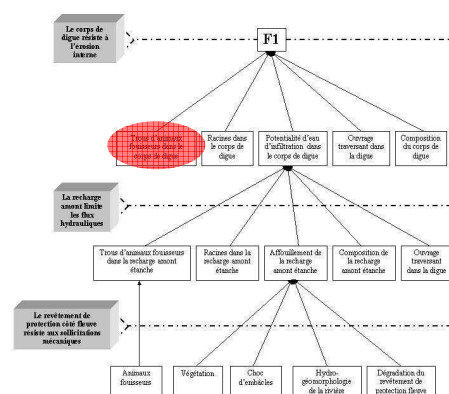
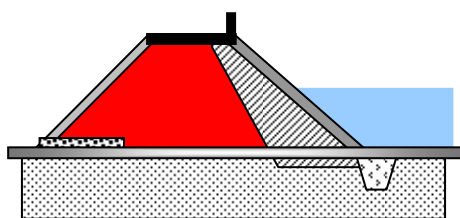
(expert)

- | | | |
|-----------|---|---|
| 10 | } | Non respect des règles de l'art |
| 9 | | |
| 8 | | |
| 2 | | la construction de la conduite respecte les règles de l'art |
| 1 | | la construction de la conduite respecte les règles de l'art et est disposée en cavalier |
-

Règles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation du critère :

MAX : le score le plus élevé est retenu

Evaluation du critère « trous d'animaux fouisseurs dans le corps de digue »



Critère "Trous d'animaux fouisseurs dans le corps de digue"											
sous-critère	indicateur										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	profonds										X
	excellence	X									

Règles générales :

La densité des terriers n'est pas prise en compte. En effet, un seul terrier peut provoquer des flux d'eau dans le corps de digue : à un seul terrier peut correspondre un ensemble de galeries dans la digue. La densité de terrier n'est donc pas un critère.

Les trous superficiels ne sont pas considérés : ils n'ont pas d'incidence.

Conditions excellentes :

- 0** aucun trou d'animaux fouisseurs
 ou revêtement de protection côté val en perré, plaque de béton, matériaux granulaires
 ou grillage antifouisseur en bon état.

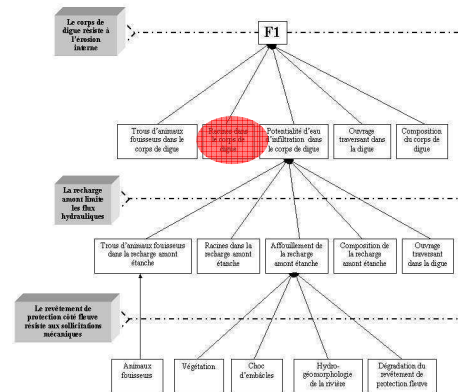
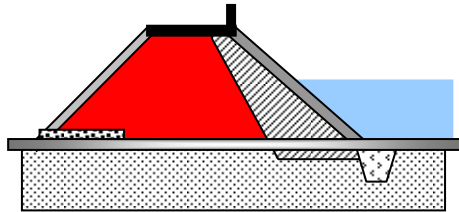
Conditions inacceptables :

- 10** trou profond dans le corps de digue
 ou trou et grillage antifouisseur en mauvais état
 ou impossibilité d'observer l'information (ex : présence de végétation trop dense)
-

Règles d'évaluation des indicateurs :

- | | |
|--|----------------------|
| <i>Trou profond (blaireau et ragondin) :</i> | (garde digue) |
| 10 si le corps de digue est étroit | |
| 9 si le corps de digue est large | |
-

Evaluation du critère « racines dans le corps de digue »



Critère "Racines dans le corps de digue"											
sous-critère	indicateur	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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									

Règles générales :

Est considérée ici la végétation sur la digue (côté val protégé et crête hors dispositif d'étanchéité) et à ses abords, limités à 2 mètres de la digue. Concernant ce critère végétation, l'incertitude est latente : des recherches sont actuellement en cours pour déterminer les essences les plus néfastes pour une digue.

Il faut raisonner en taille adulte de l'espèce : si une jeune pousse est repérée, il faut la considérer dans sa taille adulte.

La densité est prise en compte même pour les grands arbres.

Conditions excellentes :

0 aucun arbre ou buisson sur la digue ou à moins de 2 mètres

Règles d'évaluation des indicateurs :

GRANDS ARBRES : (garde digue)

Crête hors dispositif d'étanchéité et val :

9 si les arbres sont morts et denses

8 si les arbres sont vivants et denses

7 si les arbres sont vivants et épars

PETITS ARBRES : (garde digue)

Crête hors dispositif d'étanchéité et val :

4 si les arbres sont morts et denses

3 si les arbres sont vivants et denses ou morts et épars

BUISSONS : (garde digue)

Crête hors dispositif d'étanchéité et val :

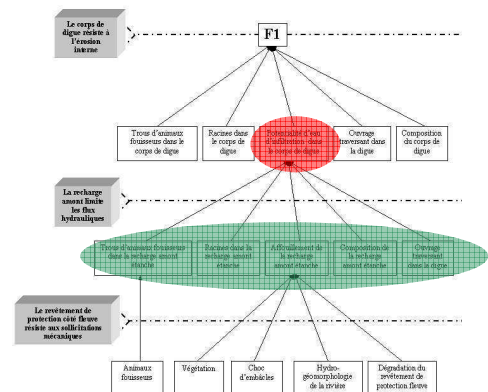
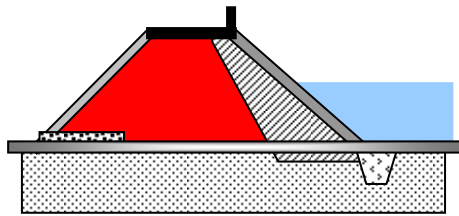
2 si les buissons sont denses

1 si les buissons sont épars

Règles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation du critère :

MAX : le score le plus élevé est retenu

Evaluation du critère « potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digue »



Critère "Potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digue"												
critère	indicateur											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Animaux fouiss	trous profonds											X
	trous superficiels					X			X	X	X	X
Végétation	contact étanchéité									X	X	X
	hors étanchéité				X	X	X	X				
	contact étanchéité								X	X	X	
	hors étanchéité				X	X						
	contact étanchéité				X	X						
	hors étanchéité			X	X							
Affouillement	érosion observée							X		X		X
	glissement observ							X		X		X
	inobservabilité											X
	calcul stabilité	X		X		X		X			X	X
	potentialité affouil	X		X		X		X	X	X	X	X
	Comp rech. am.	X	X	X	X	X	X	X	X			
Ouvrage trav.	stab vdange rapide	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	non en charge	X	X	X					X	X	X	X
	en charge		X	X						X	X	X
	excellence	X										
Eau inf. pot.	eau potentielle	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Règles générales :

Ce critère est particulier. L'évaluation de ce critère ne découle pas de l'observation sur le terrain, sauf cas particulier de l'observation en crue (cf. page suivante).

Son évaluation correspond à l'agrégation des critères qui concernent la recharge amont étanche.

Autrement dit, ce critère « vaut » la performance de la fonction « la recharge amont étanche résiste à l'érosion interne », soit le score **MAX** des critères en vert sur le schéma.

Le score peut varier de 0 à 10.

Conditions excellentes :

0 terriers, racines, affouillement et ouvrages traversant absents, et composition de la recharge amont étanche excellente

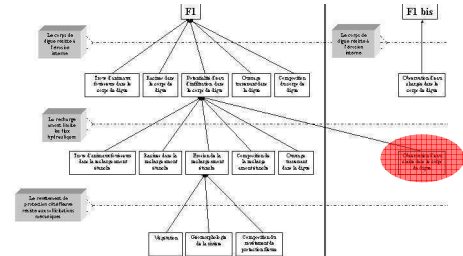
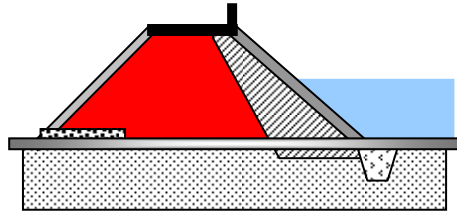
Conditions inacceptables :

10 score de 10 pour un des critères relatif à la recharge. amont. étanche.

Règles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation du critère :

MAX : le score le plus élevé est retenu

Evaluation du critère « eau claire dans le corps de digue »



Critère "Eau claire dans le corps de digue"											
sous-critère	indicateur										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	eau						X	X	X	X	X
	excellence	X									

Règles générales :

Ce critère est observable sur le terrain durant une crue.

Conditions excellentes :

0 absence d'humidité

Conditions inacceptables :

10 grosse fuite à mi-hauteur du talus côté val

Règles d'évaluation des indicateurs :

Eau : (toute personne présente lors de l'événement)

10 grosse fuite à mi-hauteur du talus côté val

9 grosse fuite au bas du talus côté val

8 filet d'eau à mi-hauteur du talus côté val

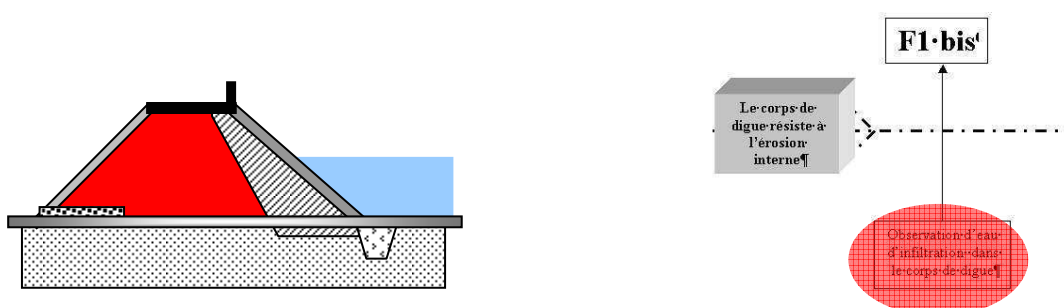
7 filet d'eau au bas du talus côté val

6 suintements à mi-hauteur du talus côté val

5 suintements au bas du talus côté val

0 absence d'humidité

Evaluation du critère « eau chargée dans le corps de digue »



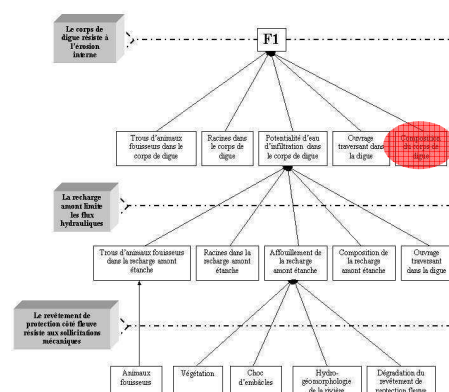
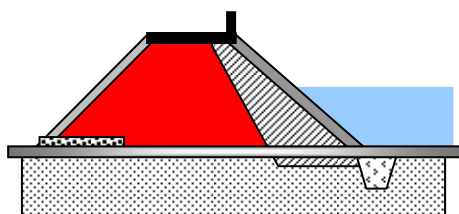
Critère "Eau chargée dans le corps de digue"												
sous-critère	indicateur											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									X		X	X

Règles générales :

Ce critère est observable sur le terrain durant une crue.

322

Evaluation du critère « composition du corps de digue »



Critère "Composition du corps de digue"												
sous-critère	indicateur											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	concept/réal	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	excellence	X										

Règles générales :

Est considéré ici la qualité de la mise en œuvre des matériaux du corps de digue. Le score peut varier de 0 à 10 : seuls des jalons sont fixés pour guider l'expert.

4 pas d'information sur le corps de digue

Conditions excellentes :

0 conception et réalisation dans le respect des règles de l'art

Conditions inacceptables :

10 le corps de digue ne supporte aucune charge
ou absence d'information relatives aux règles de filtre au contact de la recharge amont
étanche et du corps de digue

Règles d'évaluation des indicateurs :

Conception/réalisation :

(expert)

10 le corps de digue ne supporte aucune charge

7 très sensible à l'érosion interne

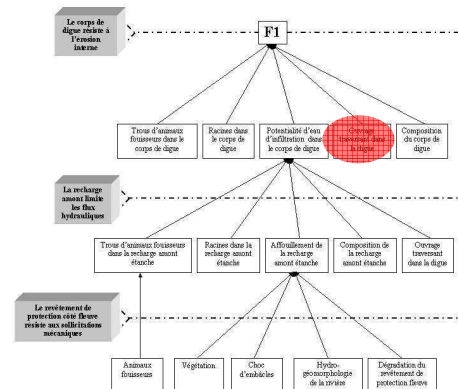
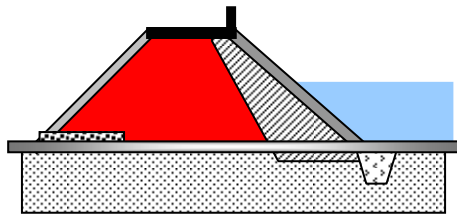
5 sensible à l'érosion interne

3 peu sensible à l'érosion interne

1 très peu sensible à l'érosion interne

0 respect des règles de l'art

Evaluation du critère « ouvrage traversant dans le corps de digue »



Critère "Ouvrage traversant dans le corps de digue"											
sous-critère	indicateur										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
non en charge		X	X	X					X	X	X
	en charge		X	X					X	X	X
	excellence	X									

* les scores d'un ouvrage traversant peu entretenu sont majorés d'1 point. Les scores d'un ouvrage traversant pas entretenu sont majorés de 2 points.

Règles générales :

Le critère ouvrage traversant est évalué par rapport à la qualité de sa conception.

Les scores d'un ouvrage traversant peu entretenu sont majorés d'1 point.

Les scores d'un ouvrage traversant pas entretenu sont majorés de 2 points.

Si un ouvrage est observé sans aucune information sur sa conception ou son entretien, le score **10** est affecté par défaut.

Conditions excellentes :

- 0** conception selon les règles de l'art pour un ouvrage traversant non en charge et disposé en cavalier
ou absence d'ouvrage traversant

Conditions inacceptables :

- 10** ouvrage traversant en très mauvais état
ou en mauvais état et peu ou pas entretenu*
ou absence d'information sur un ouvrage traversant

*Les scores d'un ouvrage traversant peu entretenu sont majorés d'1 point,
les scores d'un ouvrage traversant pas entretenu sont majorés de 2 points.

Règles d'évaluation des indicateurs :

Composition de la conduite non en charge :

(expert)

- 9** }
8 } Non respect des règles de l'art à l'appréciation de l'expert
7 }
2 la construction de la conduite respecte les règles de l'art
1 la construction de la conduite respecte les règles de l'art
0 la construction de la conduite respecte les règles de l'art et est disposée en cavalier

Composition de la conduite en charge :

(expert)

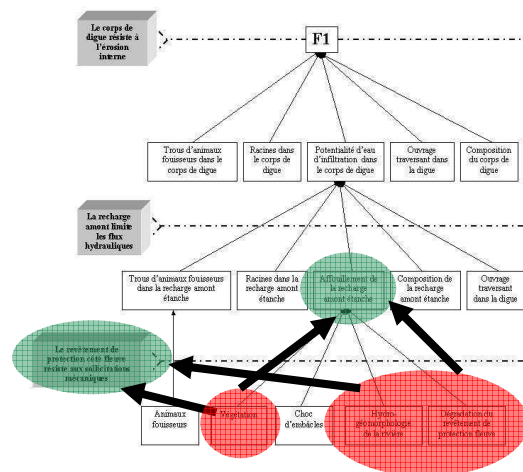
- 10** }
9 } Non respect des règles de l'art
8 }
2 la construction de la conduite respecte les règles de l'art
1 la construction de la conduite respecte les règles de l'art et est disposée en cavalier
-

Règles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation du critère :

MAX : le score le plus élevé est retenu

Agrégation des critères :

Evaluation de la performance du revêtement de protection côté fleuve et donc du critère « affouillement de la recharge amont étanche » :



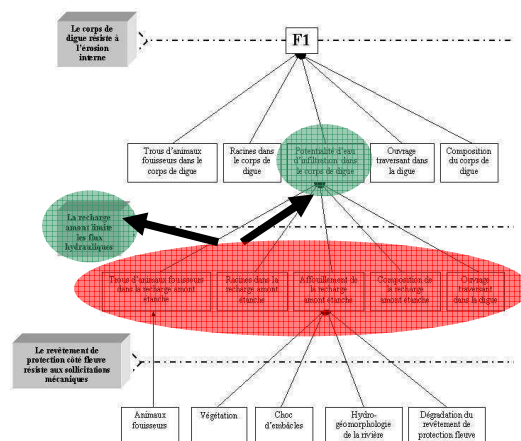
Règles d'agrégation multicritère :

MAX : le score le plus élevé est retenu.

Il donne la performance du **revêtement de protection côté fleuve**.

Il fournit le score du critère « **érosion de la recharge amont étanche** ».

Evaluation de la performance de la recharge amont étanche et donc du critère « potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digues » :



Règles d'agrégation multicritère :

MAX : le score le plus élevé est retenu.

Il donne la performance de la **recharge amont étanche**.

Il fournit le score du critère « **potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digues** ».

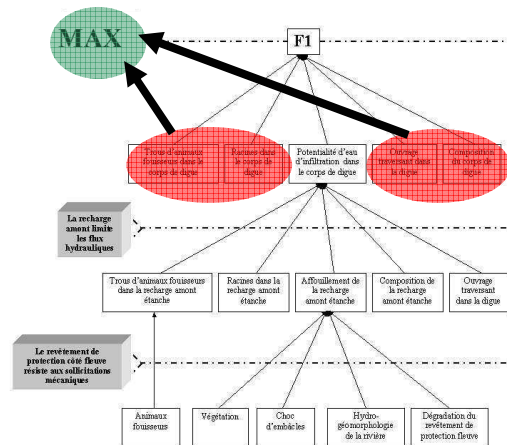
Evaluation de la performance de la de digue :

Règles d'agrégation multicritère :

Etape 1 : évaluation partielle du corps de digue

MAX : le score le plus élevé des critères en rouge est retenu et affecté provisoire au corps de digue.

1

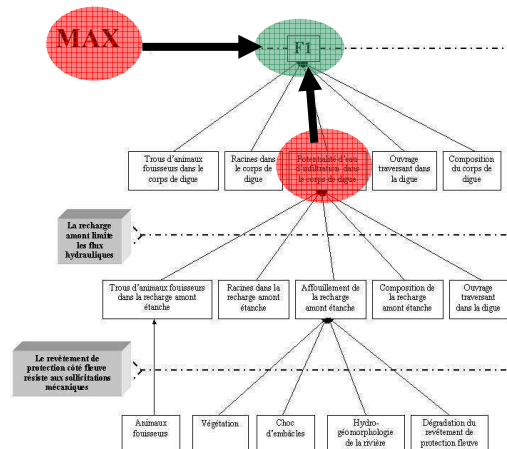


Etape 2 : évaluation de la performance de la digue

Utilisation d'une **table de vérité experte** où est agrégé le score provisoire de la performance du corps de digue obtenu à l'étape 1 et le score du critère « **potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digue** ».

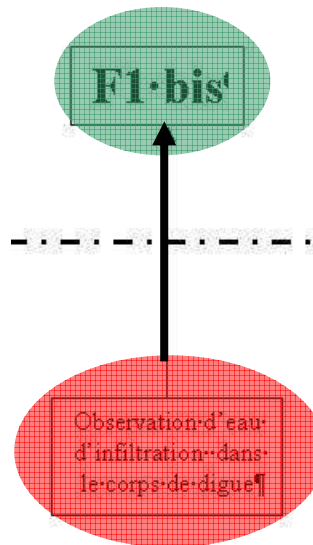
Il en résulte un score évaluant la performance du corps de digue, et donc de la **digue** vis-à-vis du risque d'érosion interne.

2



eau d'infiltration MAX(trou, racine, OT, Compo)											
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
10	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
9	9	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
8	8	8	8	7	6	5	4	3	2	1	0
7	7	7	7	7	6	5	4	3	2	1	0
6	7	7	7	6	6	5	4	3	2	1	0
5	6	6	6	6	5	4	4	3	2	1	0
4	6	6	6	5	4	4	3	3	2	1	0
3	6	5	5	4	4	4	3	3	2	1	0
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0

Evaluation de la performance de la digue pendant la crue :



Evaluation de la performance de la digue

Durant la crue, on affecte directement le score du critère « observation d'eau d'infiltration dans le corps de digue » à F1 bis.

Evaluation de la performance de la digue connaissant F1 et F1 bis :

Règles d'agrégation multicritère :

Evaluation de la performance de la digue

Lorsqu'on a évalué F1 et qu'on a pu observer la digue pendant la crue, et donc évalué F1 bis, on agrège les deux informations en utilisant l'opérateur **MAX**.

Annexe 8 - Proposition de modification de la base de données du SIRS Dignes en vue d'intégrer les critères du scénario « perte d'étanchéité de la recharge amont étanche »

Cette annexe présente sous forme de tableaux la manière dont les critères ont été intégrés dans la base de données du SIRS Dignes.

Ces résultats montrent essentiellement que la base de données du SIRS Dignes, dans son état actuel, permet l'intégration des critères d'un scénario de rupture de digues.

Toutefois cette intégration nécessite quelques adaptations. Pour pouvoir intégrer les critères de tous les scénarios de rupture de digues et pour tous les profils de digues, il faudra à terme apporter une restructuration partielle de la base de données, notamment en ajoutant des tables spécifiques.

Evaluation du critère « végétation sur le revêtement de protection coté fleuve »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères	Ajout de références dans la table
Emplacement sur la digue	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_ELEMENT_STRUCTURE = 2 (Talus digue) ID_TYPE_COTE = 1 (RIV - Rivière)	Digue coté fleuve	
Nature du revêtement	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_NATURE = 2 (RVT - Revêtement sur la digue)	Revêtement de protection	
Matériau	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_MATERIAU = 3 (PMA - Pierres Maçonnées) ou ID_TYPE_MATERIAU = 1 (TEV - Terre Végétale)	Perré Terre	
Type de végétation	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_VEGETATION = 1 (O - Sol nu) ou ID_TYPE_VEGETATION = 13 (E - Herbe éparsée) ou ID_TYPE_VEGETATION = 2 (H - Herbacé) ou ID_TYPE_VEGETATION = 4 (I - Invasive) ou ID_TYPE_VEGETATION = 14 (B - Buisson) ou ID_TYPE_VEGETATION = 3,5,6,7,8,9,10,11,12	Pas de végétation Herbe éparsée Herbe généralisée Buissons Buissons Grand ou petit arbre <i>(à distinguer)</i>	TYPE_VEGETATION TYPE_VEGETATION
Désordre	DESORDRE	ID_TYPE_DESORDRE = 8 (VEG - Présence de végétation)		

Légende

- Les valeurs en gras sont les valeurs à ajouter dans les listes de références correspondantes.
Exemple : ci-dessus, dans la liste de référence TYPE_VEGETATION il faudra ajouter 2 valeurs, prises en compte dans l'analyse multicritère :
13 (E - Herbe éparsée)
14 (B - Buisson)
- Les valeurs en bleu sont des champs à créer dans la table correspondante.
Exemple : pour le critère « trous d'animaux fouisseurs dans la recharge amont étanche » (plus bas) il faudra ajouter un champ ID_TYPE_NATURE dans la table DESORDRE qui pointera vers la table de référence TYPE_NATURE.
- Les valeurs en rouge restent à déterminer.
Exemple : ci-dessus il faudra déterminer dans la liste de référence TYPE_VEGETATION quels sont les grands arbres et quels sont les petits arbres.

Evaluation du critère « géomorphologie de la rivière »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères	Ajout de références dans la table
Largeur Franc-Bord	ELEMENT_GEOMETRIE	ID_TYPE_LARGEUR_FB = 1 (Contact) ID_TYPE_LARGEUR_FB = 2 (< 5m) ID_TYPE_LARGEUR_FB = 3 (> 5m)	Largeur entre 0 & 1 m Largeur entre 1 & 5 m Largeur > 5 m	
Stabilité du ségonnal	ELEMENT_GEOMETRIE	DATE_FIN_VAL = x (si existe → évolutif, sinon → stable)		

Evaluation du critère « composition revêtement de protection coté fleuve »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères	Ajout de références dans la table
Emplacement sur la digue	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_ELEMENT_STRUCTURE = 2 (Talus digue) ID_TYPE_COTE = 1 (RIV – Rivière)	Digue coté fleuve	
Nature du revêtement	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_NATURE = 2 (RVT – Revêtement sur la digue) → ID_TYPE_NATURE = 14 (FIL – Filtre) <i>ou</i> ID_TYPE_NATURE = 9 (ENR – Enrochement) <i>ou</i> ID_TYPE_NATURE = 1 (PNR – Partie non revêtue)	Revêtement (voir matériau) Filtre (Absence → score +2) Enrochement Terre nue	TYPE_NATURE
Matériau	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_MATERIAU = 3 (PMA – Pierres Maçonnées) <i>ou</i> ID_TYPE_MATERIAU = 1 (TEV – Terre Végétale) <i>ou</i> ID_TYPE_MATERIAU = 5 (BET – Béton) <i>ou</i> ID_TYPE_MATERIAU = 7 (VET – Revêtement végétalisé) <i>ou</i> ID_TYPE_MATERIAU = 23 (ABS – Absence de matériau) → <i>ou</i> ID_TYPE_MATERIAU = 18 (GET – Géotextile) → <i>ou</i> ID_TYPE_MATERIAU = 19 (GRF – Granulofiltre) → <i>ou</i> ID_TYPE_VEGETATION = 13 (E – Herbe éparses)	Perré Terre végétale nue Dalle béton Terre parfaitement engazonnée Absence de matériau Filtre géotextile Filtre granulofiltre	TYPE_MATERIAU TYPE_MATERIAU TYPE_MATERIAU
Désordre	DESORDRE	ID_TYPE_DESORDRE = 17 (DEJ – Déjointement...) <i>ou</i> ID_TYPE_DESORDRE = 15 (ALT - Altération des pierres...) <i>ou</i> ID_TYPE_DESORDRE = 33 (TRO – Trous dans perré ou enrochement ou dalle béton) → <i>ou</i> ID_TYPE_DESORDRE = 34 (DEG – Dégénération superficielles localisées du perré) →	Pierres loc. absentes ou décalées Quelques dégradations Perré ou enrochement ou dalle béton avec trous Dégénération superficielles localisées du perré	TYPE_MATERIAU TYPE_MATERIAU

Evaluation du critère « trous d'animaux fouisseurs dans la recharge amont étanche »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères	Ajout de références dans la table
Emplacement sur la digue	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_ELEMENT_STRUCTURE = 2 (Talus digue) ID_TYPE_COTE = 1 (RIV - Rivière)	Digue coté fleuve	
Nature de l'élément	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_NATURE = 15 (EEI – Élément à étanchéité interne) ou ID_TYPE_NATURE = 2 (RVT - Revêtement sur la digue) ou ID_TYPE_NATURE = 9 (ENR - Enrochement)	Recharge amont étanche Revêtement digue Enrochement	TYPE_NATURE
Matériau	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_MATERIAU = 3 (PMA – Pierres Maçonnées) ou ID_TYPE_MATERIAU = 5 (BET – Béton) ou ID_TYPE_MATERIAU = 20 (ARG – Argile compacté) ou ID_TYPE_MATERIAU = 21 (GEO – Géomembrane) ou ID_TYPE_MATERIAU = 1 (TEV – Terre végétale) ou ID_TYPE_MATERIAU = 7 (VET – Revêtement végétalisé) ou ID_TYPE_MATERIAU = 4 (PSE - Pierres sèches) ou ID_TYPE_MATERIAU = 22 (MET – Métal)	Perré Plaque de béton Argile compacté Géomembrane	TYPE_MATERIAU TYPE_MATERIAU
Nature de l'élément	DESORDRE	ID_TYPE_NATURE = 16 (GRU -Grillage antifouisseur)	Grillage mauvais état	TYPE_NATURE
Désordre	DESORDRE	ID_TYPE_DESORDRE = 7 (TRR – Débouché de terriers ou galeries...) ou ID_TYPE_DESORDRE = 35 (EME – Élément en mauvais état) ou ID_TYPE_DESORDRE = 36 (TRS – Trous d'animaux superficiels)	Trous profonds Elément mauvais état Trous superficiels	TYPE_DESORDRE TYPE_DESORDRE
Epaisseur	ELEMENT_STRUCTURE	EPAISSEUR = 1 EPAISSEUR < 1 EPAISSEUR > 1	Confinement métrique Sub-métrique Plusieurs mètres	

Modification/Ajout de table

- Ajouter un champ ID_TYPE_NATURE dans la table DESORDRE qui pointe vers la table de référence TYPE_NATURE

Evaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères	Ajout de références dans la table
Emplacement sur la digue	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_ELEMENT_STRUCTURE = 2 (Talus digue) ID_TYPE_COTE = 1 (RIV – Rivière)	Digue coté fleuve	
Nature de l'élément	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_NATURE = 15 (EEI – Elément à étanchéité interne) →	Recharge amont étanche	TYPE_NATURE
Matériau	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_MATERIAU = 20 (ARG – Argile compacté) ou ID_TYPE_MATERIAU = 21 (GEM – Géomembrane) →	Argile compacté Géomembrane	TYPE_MATERIAU TYPE_MATERIAU
Végétation	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_VEGETATION = ou ID_TYPE_VEGETATION = ou ID_TYPE_VEGETATION = 4 (I – Invasive) ou ID_TYPE_VEGETATION = 14 (B – Buissons)	Grands arbres Petits arbres Buissons Buissons	
Etat sanitaire (cycle de vie)	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_VEGETATION_ETAT_SANITAIRE = 1 (mort) ID_TYPE_VEGETATION_ETAT_SANITAIRE = 2 (déprissant) ID_TYPE_VEGETATION_ETAT_SANITAIRE = 3 (sain) ID_TYPE_VEGETATION_ETAT_SANITAIRE = 4 (vivant et penché) →	Mort Mort Vivant et droit Vivant et penché	TYPE_VEGETATION_ ETAT_SANITAIRE
Densité	ELEMENT_STRUCTURE	DENSITE > 400 tiges/ha ou DENSITE < 400 tiges/ha	Dense Epars	

Evaluation du critère « Erosion dans la recharge amont étanche »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères	Ajout de références dans la table
Element	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_MATERIAU = 20 (ARG – Argile compacté) ou ID_TYPE_MATERIAU = 21 (GEM – Géomembrane)	Argile compacté Géomembrane	
Désordre/Elément	DESORDRE	ID_TYPE_NATURE = 15 (EEI – Elément à étanchéité interne)	Recharge amont étanche	
Désordre	DESORDRE	ID_TYPE_DESORDRE = 35 (EME – Elément en mauvais état) ID_TYPE_DESORDRE = 4 (MVT – Affaissement, glissement, ...)	Elément mauvais état Glissement	
Intensité de l'érosion	DESORDRE_OBSERVATION	ID_INTENSITE_DESORDRE = 1 (Erosion ou glissement superficiel) ou ID_INTENSITE_DESORDRE = 2 (50 % recharge érodée ou glissement) ou ID_INTENSITE_DESORDRE = 3 (Totalité recharge érodée ou glissement)	Erosion ou glissement superficiel 50 % recharge érodée ou glissement Totalité recharge érodée ou glissement	TYPE_INTENSITE_DESORDRE TYPE_INTENSITE_DESORDRE TYPE_INTENSITE_DESORDRE

Modification/Ajout de table

- Créer une table de référence TYPE_INTENSITE_DESORDRE indexée par ID_INTENSITE_DESORDRE
- Ajouter un champ ID_INTENSITE_DESORDRE dans la table DESORDRE_OBSERVATION qui pointe vers la table de référence TYPE_INTENSITE_DESORDRE

Table TYPE_INTENSITE_DESORDRE

ID_INTENSITE_DESORDRE	LIBELLE_INTENSITE_DESORDRE
1	Erosion ou glissement superficiel de la recharge amont étanche (< 10 cm)
2	50% de l'épaisseur de la recharge amont est érodée ou a glissé
3	La totalité de la recharge amont est érodée ou a glissé
4	Ouvrage traversant en très mauvais état
5	Ouvrage traversant en mauvais état peu entretenu
6	Ouvrage traversant en mauvais état pas entretenu

Evaluation du critère « ouvrage traversant dans la recharge amont étanche »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères	Ajout de références dans la table
Emplacement sur la digue	ELEMENT_RESEAU	ID_TYPE_COTE = 5 (DEU – Les 2 cotés) ID_IMPLANTATION = 2 (ENT – Enterré)	Ouvrage traversant la digue	
Elément	ELEMENT_RESEAU	ID_ELEMENT_RESEAU		
Position	ELEMENT_RESEAU	PR DEBUT_CALCULE et PR FIN_CALCULE	Début de l'élément Fin de l'élément	
Qualité de la conception	ELEMENT_RESEAU	ID_QUALITE_CONCEPTION = 1 ou ID_QUALITE_CONCEPTION = 2 ou ID_QUALITE_CONCEPTION = 3	Respect des règles de l'art + disposition en cavalier Respecte les règles de l'art Ne respecte pas les règles de l'art	TYPE_QUALITE_CONCEPTION TYPE_QUALITE_CONCEPTION TYPE_QUALITE_CONCEPTION
Matériau	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_MATERIAU = 20 (ARG – Argile compacté) ou ID_TYPE_MATERIAU = 21 (GEO – Géomembrane)	Argile compacté Géomembrane	
Position	ELEMENT_STRUCTURE	PR DEBUT_CALCULE et PR FIN_CALCULE	Début de la recharge Fin de la recharge	
Désordre	DESORDRE_ELEMENT_RESEAU	ID_DESORDRE		
Désordre	DESORDRE_ELEMENT_RESEAU	ID_ELEMENT_RESEAU		
Désordre	DESORDRE_ELEMENT_RESEAU	ID_TYPE_ELEMENT_RESEAU = 4 (telecom, énergie) ID_TYPE_ELEMENT_RESEAU = 2, 3, 10 (conduite eau)	Non en charge En charge	
Intensité du désordre	DESORDRE_OBSERVATION	ID_DESORDRE		
Intensité du désordre	DESORDRE_OBSERVATION	ID_INTENSITE_DESORDRE = 4 (Ouvrage traversant très mauvais état) ou ID_INTENSITE_DESORDRE = 5 (peu entretenu) ou ID_INTENSITE_DESORDRE = 6 (pas entretenu)	Très mauvais état Peu entretenu Pas entretenu	TYPE_INTENSITE_DESORDRE TYPE_INTENSITE_DESORDRE TYPE_INTENSITE_DESORDRE

Modification/Ajout de table

- Ajouter un champ ID_QUALITE_CONCEPTION dans la table ELEMENT_RESEAU qui pointe vers la table de référence TYPE_QUALITE_CONCEPTION
- Créer une table de référence TYPE_QUALITE_CONCEPTION indexée par ID_QUALITE_CONCEPTION

Table TYPE_QUALITE_CONCEPTION

ID_QUALITE_CONCEPTION	LIBELLE_QUALITE_CONCEPTION
1	La conception de l'ouvrage respecte les règles de l'art et disposition en cavalier
2	La conception de l'ouvrage respecte les règles de l'art
3	La conception de l'ouvrage ne respecte pas les règles de l'art

Évaluation du critère « trous d'animaux fouisseurs dans le corps de digue »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères
Emplacement sur la digue	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_ELEMENT_STRUCTURE = 2 (Talus digue) ID_TYPE_COTE = 1 (TER- Terre) ID_TYPE_COTE = 6 (CRE- Crête)	Digue coté terre et crête : corps de digue
Nature	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_NATURE = 2 (RVT – Revêtement sur la digue)	Revêtement
Matériau	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_MATERIAU = 3 (PMA – Pierres Maçonnées) ou ID_TYPE_MATERIAU = 5 (BET – Béton) ou ID_TYPE_MATERIAU = 2 (GRA - Gravier) ou ID_TYPE_MATERIAU = 4 (PSE – Pierres Sèches) ou ID_TYPE_MATERIAU = 16 (CON – Concassé 0,80 mm)	Perré Plaque de béton Matériau granulaire Matériau granulaire Matériau granulaire
Végétation	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_VEGETATION = 4 (I – Invasive)	Impossibilité d'observer
Epaisseur	ELEMENT_STRUCTURE	EPAISSEUR < ??? EPAISSEUR > ???	Corps de digue étroit Corps de digue large
Nature de l'élément	DESORDRE	ID_TYPE_NATURE = 16 (Grillage antifouisseur)	Grillage antifouisseur
Désordre	DESORDRE	ID_TYPE_DESORDRE = 7 (TRR – Débouché de terriers ou galeries...) ou ID_TYPE_DESORDRE = 35 (EME – Élément en mauvais état)	Trous profonds Élément mauvais état

Evaluation du critère « racines dans le corps de digue »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères	Ajout de références dans la table
Emplacement sur la digue	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_ELEMENT_STRUCTURE = 2 (Talus digue) ID_TYPE_COTE = 2 (TER – Rivière) ID_TYPE_COTE = 6 (CRE – Grête)	Digue coté terre & sur la crête	
Végétation	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_VEGETATION = ou ID_TYPE_VEGETATION = ou ID_TYPE_VEGETATION = 4 (I – Invasive) ou ID_TYPE_VEGETATION = 14 (B – Buissons)	Grands arbres Petits arbres Buissons Buissons	
Etat sanitaire (cycle de vie)	ELEMENT_STRUCTURE	ID_TYPE_VEGETATION_ETAT_SANITAIRE = 1 (mort) ID_TYPE_VEGETATION_ETAT_SANITAIRE = 2 (déperissant) ID_TYPE_VEGETATION_ETAT_SANITAIRE = 3 (sain) ID_TYPE_VEGETATION_ETAT_SANITAIRE = 4 (vivant et penché)	Mort Mort Vivant et droit Vivant et penché	
Densité	ELEMENT_STRUCTURE	DENSITE > 400 tiges/ha ou DENSITE < 400 tiges/ha	Dense Epars	

Evaluation du critère « eau claire dans le corps de digue »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères	Ajout de références dans la table
Emplacement sur la digue	DESORDRE	ID_TYPE_POSITION = 3 (PDI – Pied de digue) ID_TYPE_POSITION = 6 (TAD – Talus digue)	En bas A mi hauteur	
Crue	DESORDRE	ID CRUE	Crue	
Désordre	DESORDRE	ID_TYPE_DESORDRE = 10 (IFU – Indice de fuite,...)	Présence d'eau	
Intensité du désordre	DESORDRE_OBSERVATION	ID_INTENSITE_DESORDRE = 7 (Suintement) ou ID_INTENSITE_DESORDRE = 8 (Filet d'eau) ou ID_INTENSITE_DESORDRE = 9 (Grosse fuite)	Suintement Filet d'eau Grosse fuite	TYPE_INTENSITE_DESORDRE TYPE_INTENSITE_DESORDRE TYPE_INTENSITE_DESORDRE

Note : Si l'info IFU est disponible et que le champ ID_CRUE est rempli alors on évalue l'indicateur.

Gérer eau claire, eau chargée...

Evaluation du critère « ouvrage traversant dans le corps de digue »

Paramètre	Table	Champs	Correspondance Critères	Ajout de références dans la table
Emplacement sur la digue	ELEMENT_RESEAU	ID_TYPE_COTE = 5 (DEU – Les 2 cotés) ID_IMPLANTATION = 2 (ENT – Enterré)	Ouvrage traversant la digue	
Elément	ELEMENT_RESEAU	ID_ELEMENT_RESEAU		
Position	ELEMENT_RESEAU	PR_DEBUT_CALCULE et PR_FIN_CALCULE	Début de l'élément Fin de l'élément	
Qualité de la conception	ELEMENT_RESEAU	ID_QUALITE_CONCEPTION = 1 ou ID_QUALITE_CONCEPTION = 2 ou ID_QUALITE_CONCEPTION = 3	Respect des règles de l'art + disposition en cavalier Respecte les règles de l'art Ne respecte pas les règles de l'art	TYPE_QUALITE_CONCEPTION TYPE_QUALITE_CONCEPTION TYPE_QUALITE_CONCEPTION
Désordre	DESORDRE_ELEMENT_RESEAU	ID_DESORDRE		
Désordre	DESORDRE_ELEMENT_RESEAU	ID_ELEMENT_RESEAU		
Désordre	DESORDRE_ELEMENT_RESEAU	ID_TYPE_ELEMENT_RESEAU = 4 (telecom, énergie) ID_TYPE_ELEMENT_RESEAU = 2, 3, 10 (conduite eau)	Non en charge En charge	
Intensité du désordre	DESORDRE_OBSERVATION	ID_DESORDRE		
Intensité du désordre	DESORDRE_OBSERVATION	ID_INTENSITE_DESORDRE = 4 (Ouvrage traversant très mauvais état) ou ID_INTENSITE_DESORDRE = 5 (peu entretenu) ou ID_INTENSITE_DESORDRE = 6 (pas entretenu)	Très mauvais état Peu entretenu Pas entretenu	TYPE_INTENSITE_DESORDRE TYPE_INTENSITE_DESORDRE TYPE_INTENSITE_DESORDRE

Annexe 9 - Spécifications techniques du modèle d'analyse multicritère couplé au SIRS Digues

Cette annexe détaille :

- l'installation et le lancement du module multicritère dans le SIRS Digues ;
- la structure du programme ;
- les critères pris en compte ;
- les fonctionnalités du module (cartographie et génération de pages HTML) ;
- la symbologie utilisée.

Installation & lancement du module

L'application additionnelle du SIRS Dignes s'installe facilement en copiant le fichier **Indicateur - Erosion interne.mxd** dans le répertoire de votre choix (celui du SIRS Dignes par exemple).

Le programme nécessite également la création de deux répertoires «**Html**» et «**Style**» sous «**C:\Program Files\Strategis\ SIRS Dignes Proto 4 V1.0d \Donnees\Web**».

Pour cela il suffit d'exécuter la commande «**Install.bat**» dans le répertoire «**Méthode AMC**». Les 2 répertoires sont alors créés automatiquement.

Le répertoire «**Html**» permettra à l'application de stocker les tableaux html de résultats.

Le répertoire «**Style**» devra contenir le fichier «**style.css**» qui est la feuille de style des pages html générées par l'application.

Le fichier **Install.bat** copie également la database ACCESS de la digue de Cazouls d'Hérault dans le répertoire «**C:\Program Files\Strategis\ SIRS Dignes Proto 4 V1.0d \Donnees**».

Enfin, le module additionnel du SIRS Dignes se lance en exécutant le fichier : «**Indicateur - Erosion interne.mxd**»

Ce fichier s'ouvre en lançant l'application ArcMap.

Récapitulatif des commandes à exécuter :

- ✓ Copier le fichier **Indicateur - Erosion interne.mxd** dans un répertoire sur le disque (répertoire du SIRS par exemple)
- ✓ Exécuter **Install.bat** dans le répertoire «**Méthode AMC**»
- ✓ Double cliquer sur **Indicateur - Erosion interne.mxd**

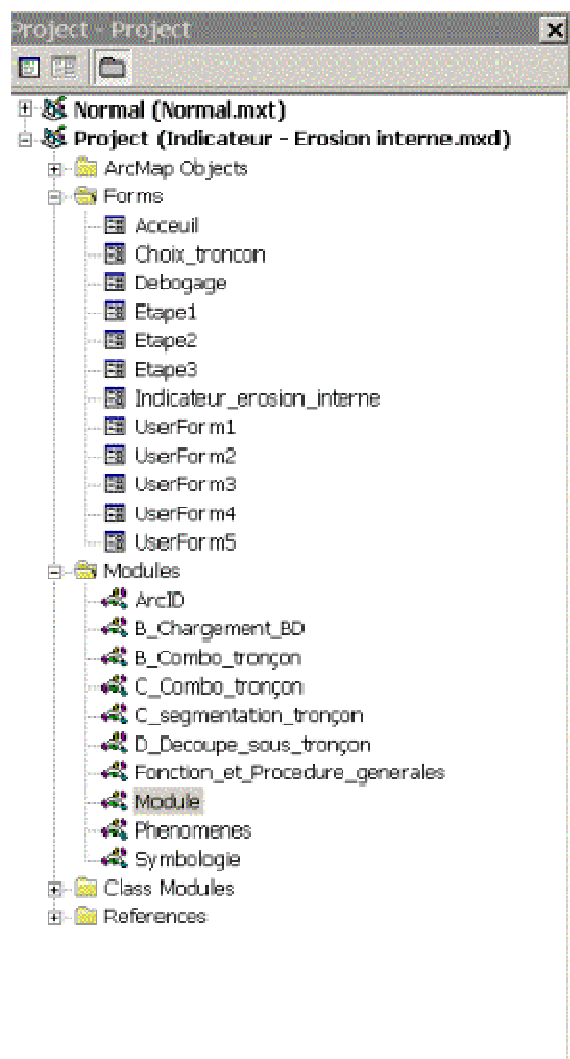
Un répertoire «**indicateur**» est automatiquement créé par l'application dans le répertoire «**C:\Temp**». C'est le répertoire où sont créées et stockées toutes les tables temporaires.

De même un fichier «**indicateur.txt**» contenant l'ensemble des chemins d'accès aux différents fichiers utilisés par l'application (Base de données, tables temporaires etc...) est créé automatiquement à la racine.

Structure du programme

Pour accéder au code source du module, on sélectionne l'option : **Tools → Macros → Visual Basic Editor**

Le contenu du projet s'affiche dans la fenêtre de gauche (le code s'affiche à droite).



Le dossier **Forms** correspond à l'interface graphique du logiciel. Cette partie n'est pas à modifier sauf si on souhaite changer la présentation des fenêtres ou ajouter de nouveaux paramètres.

Le module **Fonction_et_Procedure_generales** comprend les procédures permettant de charger un tronçon ainsi que des procédures de recherche.

Le module **Modules** comprend l'intégralité du code de la méthode AMC ainsi que des procédures de traitement de données. *

Le module **Phenomenes** comprend l'ensemble des procédures de calcul des critères.

Le module **Symbologie** comprend les procédures de génération de couleurs

Le code que j'ai développé est commenté. Aussi je pense qu'il n'est pas nécessaire d'en reprendre les détails ici.

Critères

Ce module comprend l'ensemble des calculs des critères pour l'évaluation du phénomène d'érosion interne.

Les procédures sont les suivantes :

Vegetation()	→ Végétation sur le revêtement de protection coté fleuve
Geomorphologie()	→ Géomorphologie de la rivière
Composition_revêtement_cote_fleuve()	→ Composition du revêtement de protection coté fleuve
Trous_animaux_recharge_amont()	→ Trous d'animaux fouisseurs dans la recharge amont étanche
Racines_recharge_amont()	→ Racines dans la recharge amont étanche
Erosion_recharge_amont()	→ Erosion dans la recharge amont étanche
Ouvrage_traversant_recharge_amont()	→ Ouvrage traversant dans la recharge amont étanche
Trous_animaux_corps_digue()	→ Trous d'animaux fouisseurs dans le corps de digue
Racines_corps_digue()	→ Racines dans le corps de digue
Eau_claire_corps_digue()	→ Eau claire dans le corps de digue
Eau_chargée_corps_digue()	→ Eau chargée dans le corps de digue
Ouvrage_traversant_corps_digue()	→ Ouvrage traversant dans le corps de digue
Generer_table_final(TABLE_dbase As String, CHAMP_SCORE As String)	

→ Cette fonction se charge de fusionner les tables et crée une table *_FINAL contenant les scores finaux pour un phénomène donné sur l'ensemble du tronçon traité

Chaque procédure exécute une ou plusieurs requêtes sur la base du SIRS Dignes pour récupérer les informations permettant le calcul du critère.

Ces informations sont stockées dans des table temporaire à laquelle on ajoute un champ score. Ces tables sont enregistrées dans le répertoire « **C:\Temp\indicateur** »

Ensuite le programme calcule les scores (et affecte le champ correspondant dans la table temporaire) et renseigne une table **COMMENTAIRE** décrivant les phénomènes, afin de générer par la suite les tableaux HTML résultats.

NB : Dans certains cas, plusieurs requêtes sont exécutées et des intersections entre tables sont effectuées mais le principe du calcul des scores reste le même.

Module

Insere_commentaire(Debut As Double, Fin As Double, Critere As String, Comment As String, Score As Integer)

→ Insère un commentaire dans la table **COMMENTAIRE** sous la forme suivante :

PR Debut PR Fin Critère Commentaire Score

Cette procédure permet d'associer à chaque score un commentaire qui l'explique afin de générer à la fin de l'exécution les tables HTML.

GenererHTML(PR_DEBUT As Double, PR_FIN As Double, Partie As Integer, Couleur As String)

→ Génère une page HTML pour une portion de digue. Cette procédure nomme automatiquement la page HTML à partir du paramètre « Partie »

Nom : PagePartie.html

Le programme exécute une requête sur la table COMMENTAIRE qui récupère l'ensemble des informations comprises entre 2 PR (PR_DEBUT & PR_FIN) et génère un tableau HTML contenant ces valeurs mises en forme.

NB : La mise en forme finale est gérée par un fichier CSS situé dans le répertoire C:\Program Files\Strategis\SIRS Dignes Proto 4 V1.0d\Donnees\Web\Style

couche_d_evenement_lineaire(
 Table_evenementielle As String,
 Nom_champ_Troncon As String,
 Nom_champ_debut_Troncon As String,
 Nom_champ_fin_Troncon As String,
 Nom_de_la_couche As String,
 Optional Couche_de_reference As String = "CARTO_TRONCON_GESTION_DIGUE",
 Optional Nom_champ_troncon_couche_reference As String = "ID_TRONCON_GESTION")

→ Permet de créer une couche d'événements linéaires à partir d'une table

Cette procédure complexe permet de découper une entité linéaire en plusieurs sous entités en fonction des données contenue dans une table.

C'est cette procédure qui réalise la segmentation dynamique du tronçon.

PERFORMANCE(Optional Mode_Tronçon_ou_Sous_Tronçon As Integer = 0)

→ C'est le programme principal de l'analyse multicritère qui appelle toutes les sous procédures de calcul de critères selon le modèle de l'arbre de défaillance.

Une fois les scores calculés il réalise l'agrégation de toutes les valeurs et le redécoupage du tronçon.

Enfin il appelle les fonctionnalités de symbologie pour la représentation graphique finale.

Symbologie

Cette partie du code gère la présentation finale des résultats et notamment l'échelle des couleurs.

Symbologie_tronçon(Nom_de_la_couche As String)

→ Affecte un couleur à chaque portion de tronçon en fonction de la valeur du score retenue.

Annexe 10 - Valorisation des compétences – un nouveau chapitre de la thèse

Qu'est-ce que la valorisation des compétences – un nouveau chapitre de la thèse ?

C'est un véritable inventaire et une mise en valeur des compétences qui ont été nécessaires au bon déroulement de la thèse. Il n'a aucun caractère académique et n'entre ni dans l'évaluation de la thèse, ni dans l'obtention du diplôme.

Ce travail inclut une analyse critique du déroulement de la thèse dans une optique de projet, une identification et une mise en valeur des acquis professionnels et compétences développés pendant la thèse, illustrés par des exemples puisés dans sa préparation.

L'exercice qui est proposé au doctorant s'effectue avec l'appui de son équipe d'accueil et de son directeur de thèse et avec l'accompagnement d'un mentor généralement proposé par l'école doctorale. L'ABG (Association Bernard Grégory) peut, le cas échéant, aider l'école doctorale à en identifier un. Celui-ci sera généralement un consultant en ressources humaines. Il doit être extérieur au système de recherche et avoir une bonne connaissance des pratiques de recrutement en entreprise et du contexte de l'insertion professionnelle des docteurs. Il aidera le doctorant à identifier et à valoriser les acquis de sa thèse et à élaborer le *nouveau chapitre de la thèse*. Tous les mentors sont formés par l'ABG.

Cette analyse débouche sur une synthèse aisément compréhensible par des non-spécialistes du domaine de recherche du doctorant et exploitable par le jeune docteur pour se valoriser durant sa recherche d'emploi. Ce travail mobilise le doctorant l'équivalent d'environ 5 à 6 jours de travail essentiellement personnel.

Valorisation des compétences – un nouveau chapitre de la thèse

Doctorant : Damien Serre

Ecole doctorale : Ville et Environnement, université de Marne la Vallée

Mentor : Barbara Filler

Sujet de thèse : Développement de méthodes et d'outils pour une gestion optimisée des digues de protection contre les inondations.

Directeur de thèse : Youssef Diab

Date probable de soutenance : décembre 2005

1. Cadre général et enjeux de la thèse

1.1. Présentation

1.1.1. Titre de la thèse

« Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique. »

1.1.2. Résumé

La France, l'Europe, et plus généralement le monde, subissent de fréquents *épisodes de crues* dévastatrices. Les inondations provoquent d'importants dégâts et les coûts induits sont considérables. En effet, la pression urbaine a abouti à autoriser la construction d'habitations dans le lit majeur des rivières, et les digues, souvent sous-dimensionnées et mal entretenues, ont montré leurs faiblesses à plusieurs reprises. La *rupture de digues* augmente la violence des inondations et peut accroître les conséquences des inondations.

L'ancienneté des digues et l'absence de gestion raisonnée de nombreux propriétaires ont provoqué une perte significative de l'information relative aux digues : la constitution de la digue, les travaux de confortement ultérieurs, etc. De plus, le *linéaire important de digues* en France complique leur gestion. Les gestionnaires et les services de contrôle sont conscients de l'importance de la mise en place de plans de gestion visant à *mettre à niveau et à maintenir la sécurité des digues*. Mais ce long linéaire pose une question majeure : *par où commencer les actions de maintenance ?* Les gestionnaires ont un budget limité et il convient donc d'optimiser ce budget en planifiant les actions d'inspection et de maintenance.

Dans ce contexte, les gestionnaires de digues ont *besoin de méthodes et d'outils d'aide à la décision*. Un *premier Système d'Information Géographique (SIG)*, maintenant opérationnel dans les structures gestionnaires, a été développé. Il contient les informations de base sur les ouvrages : géoréférencement des digues à l'échelle 1/10000ème et informations relatives aux zones protégées et à leur vulnérabilité (zones rurales, densité de l'habitat, secteurs particulièrement sensibles...).

Ma recherche vise à améliorer l'outil existant et à y intégrer des méthodes pour évaluer la performance des digues. L'objectif est maintenant de fournir aux gestionnaires un véritable outil d'aide à la décision pour *l'optimisation des programmes d'inspection, de maintenance et de réparation*. Il s'agit de pouvoir visualiser et repérer à l'aide du SIG les tronçons de digue les plus critiques sur lesquels il convient *d'engager prioritairement des actions* de remise à niveau ou d'entretien.

Pour améliorer nos connaissances sur le fonctionnement et évaluer la performance des digues, je développe, dans une première étape, une méthodologie permettant de *modéliser les mécanismes de rupture des digues*. Pour cela, j'utilise des méthodes de la *Sûreté de Fonctionnement* : l'analyse fonctionnelle (AF) et l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE). Ces méthodes, appliquées aux digues, vont permettre de modéliser les mécanismes de rupture sous forme de *scénarios*.

Je cherche ensuite à *évaluer la performance des digues* vis-à-vis de chaque scénario de rupture. Les scénarios vont nous indiquer quelles informations doivent être retenues pour construire les *indicateurs de performance*. Les *méthodes multicritères d'aide à la décision*, appuyées par l'*expertise*, vont me permettre d'établir des règles pour évaluer les indicateurs de performance et pour les agréger. L'objectif est d'aboutir à l'évaluation de la performance globale d'une digue, en tenant compte de l'ensemble des mécanismes susceptibles de l'affecter.

1.1.3. Enjeux

En une génération, les enjeux liés aux aménagements hydrauliques ont profondément évolué, à l'instar d'autres domaines du génie civil. Les questions liées à la conception et à la réalisation des ouvrages ont évolué, d'une part, vers la gestion et l'exploitation, et, d'autre part, vers la **maîtrise des risques** qu'ils induisent. Ces nouvelles préoccupations sont dorénavant considérées à différentes échelles, au niveau de l'ouvrage lui-même, mais également au niveau du bassin versant, nécessitant alors une démarche **d'analyse systémique**.

Pour les enjeux liés à la gestion et l'exploitation des ouvrages en service, il s'agit **d'optimiser et d'améliorer les actions de maintenance** à l'échelle d'un ouvrage, mais aussi de gérer et d'exploiter au mieux un aménagement hydraulique pouvant être composé de plusieurs ouvrages, ou un parc diversifié appartenant à un même gestionnaire, dans le souci de **maintenir sur le long terme un niveau de sécurité optimal** pour le dit aménagement.

Les enjeux liés à la maîtrise des risques sont fondamentaux. De ce point de vue, la problématique d'analyse de risques des ouvrages hydrauliques se situe à l'interface entre **aléa naturel et risque technologique**. Les événements portant atteinte aux ouvrages sont susceptibles de conduire à des conséquences humaines ou économiques lourdes, comme l'ont montré les crues et inondations récentes dans le sud de notre pays : Languedoc-Roussillon en 1999 (36 victimes et 620 M€ de dommages), Gard (23 victimes et 1 200 M€ de dommages) en 2002 et basse vallée du Rhône (7 victimes et 1 000 M€ de dommages) en 2003.

Les **nombreuses ruptures de digues** survenues lors de ces événements ne doivent pas faire oublier que des barrages (heureusement de petite taille) se sont également rompus ces dernières années en France et que divers incidents surviennent régulièrement sur les barrages en service de toutes catégories. **Pour les digues et barrages en remblai, les mécanismes liés à l'érosion, interne ou par surverse, sont en cause dans la quasi totalité des incidents majeurs recensés de par le monde.**

Par ailleurs, un certain nombre d'ouvrages et d'aménagements méritent d'être réévalués dans une démarche multidisciplinaire. Cela concerne en particulier les aménagements de ralentissement dynamique, les seuils en rivières, les endiguements (implantation de déversoirs, augmentation de l'emprise, insertion dans l'environnement, ...), les anciens barrages ayant changé d'usage. Les solutions à envisager peuvent inclure le déplacement voire la suppression d'ouvrages. Cela nécessite d'élargir la réflexion technique aux aspects organisationnels et socio-économiques, avec un double souci de **rationalisation économique et d'acceptabilité des interventions** à conduire. L'aspect organisationnel comprend en particulier l'intégration de la surveillance et de la gestion des ouvrages dans les plans communaux ou intercommunaux de sauvegarde, institués par la **Loi du 13 août 2004** sur la modernisation de la sécurité civile.

L'Etat conserve un rôle majeur en France, d'une part d'affichage des risques, et d'autre part de contrôle de ces ouvrages. Le MEDD, qui est en charge des ouvrages soumis au régime de l'autorisation, a récemment publié une circulaire étendant aux digues "intéressant la sécurité publique" les obligations existant de longue date sur les barrages. Deux missions d'inspection générale devraient très bientôt rendre des conclusions renforçant encore l'ensemble de ces dispositions. En appui à ses services, ce même ministère a confié depuis dix ans au Cemagref un rôle essentiel dans son dispositif technique, avec des avancées importantes, qu'il s'agit de consolider :

- dispositif opérationnel pour les barrages intéressant la sécurité publique, en cours de déploiement pour les digues et s'élargissant aux ouvrages de ralentissement dynamique ;
- **développement de nombreux outils méthodologiques pour le diagnostic, la surveillance, l'analyse des risques.**

Enfin, les compagnies d'assurance sont intéressées par le développement de démarches préventives pour une meilleure sécurité des ouvrages dont elles couvrent les risques.

1.1.4. Résultats

Ma recherche a consisté à produire une *méthode d'analyse de la performance des digues* destinée à être *utilisée dans un SIG*. Ce travail comprend plusieurs résultats qui ont permis d'aboutir à un *outil prototype destiné, à moyen terme, aux gestionnaires locaux de digues*.

Les méthodes de la *Sûreté de Fonctionnement* m'ont permis de *modéliser la structure des digues*, de *connaître les fonctions de conception des digues et de leurs composants*, et de *définir leurs modes de défaillance, leurs causes et leurs effets*. A partir du recueil et de la formalisation de la connaissance experte, j'ai modélisé les principaux mécanismes de rupture des digues sous forme de scénarios. Pour chaque mécanisme, j'obtiens ainsi les différents *indicateurs et critères* qui interviennent dans l'évaluation de la performance des digues. En terme de résultats, j'ai *modélisé les principaux mécanismes de rupture des digues* (17 scénarios pour 3 types de digues représentant l'essentiel du parc d'ouvrages en France) et j'ai déterminé, pour chaque mécanisme, les *critères* (environ 150 critères au total) permettant *l'évaluation de la performance des digues*.

L'étape suivante a consisté à agréger les indicateurs et critères pour évaluer la performance des digues. La méthode utilisée est une *méthode multicritère d'affectation à base de règles*, alternant des étapes de discussions avec un *groupe d'experts* et des étapes de calcul. En terme de résultats, cette démarche a permis d'établir les règles d'évaluation et d'agrégation des critères pour chaque scénario de rupture, permettant d'évaluer ainsi la performance d'une digue.

Pour la future application opérationnelle de ces méthodes par les gestionnaires de digues, nous avons *développé un système d'information géographique* dans lequel j'ai *intégré les règles multicritères* d'évaluation de la performance des digues. Cet outil d'aide à la décision est en phase de développement et les gestionnaires de digues pourront l'utiliser pour connaître la performance de leur parc d'ouvrages. Ils pourront ainsi, à moyen terme, *optimiser leurs opérations de maintenance*.

1.2. La thèse dans son contexte

La thèse s'est déroulée dans deux unités de recherche (UR) du Cemagref: l'UR « *Ouvrages Hydrauliques* » à Aix en Provence concernant les aspects *génie civil* et l'Unité Mixte de Recherche (UMR) *TETIS* à Montpellier concernant les aspect *Système d'Information Géographique (SIG)*.

1.2.1. Place de la thèse dans le projet global de l'UR « Ouvrages Hydrauliques »

Mon travail de recherche s'inscrit dans un des quatre axes de recherche de l'UR : l'axe 2, « *Analyse de Risques* ».

Dans cet axe, les recherches sont menées essentiellement sur les barrages et les digues pour tenter d'évaluer leurs capacités de fonctionnement et leur état, ainsi que leurs éventuels impacts en terme de risques. Mon travail de recherche s'intéresse aux digues, et plus particulièrement au *développement de méthodes et modèles pour évaluer leur performance*.

1.2.2. Place de la thèse dans le projet global de l'UMR TETIS

Mon travail de recherche s'inscrit dans un des quatre axes de recherche de l'UMR : l'axe 1, « *Structures spatiales et dynamiques des systèmes agri-environnementaux et territoriaux* ».

Plus précisément, à l'intérieur de cet axe, ma recherche concerne pour *40%* le sous axe « *Description et modélisation des dynamiques spatiales et analyse des processus qui les régissent* » et pour *60%* le sous axe « *Construction d'indicateurs et de représentations finalisées* ».

1.2.3. Situation au regard de la concurrence publique, privée et internationale

1.2.3.1. Au niveau national

Pas de concurrence sur le thème des digues en termes de publications. Concurrence potentielle en termes de développement d'outils SIG pour la gestion d'ouvrages linéaires avec des *bureaux d'études privés*.

1.2.3.2. Au niveau international

Concurrence potentielle sur le thème digue en termes de publications et au niveau opérationnel, notamment avec les *Pays-Bas et l'Amérique du Nord*.

1.2.4. Moyens scientifiques, techniques et humains à disposition du projet

Université de Marne la vallée, INSA Lyon, LIRMM Montpellier, SYMADREM, AD-IDR.

1.2.5. Appartenance de l'équipe à des réseaux scientifiques

1.2.5.1. UR « Ouvrages hydrauliques »

Partenaires Nationaux :

Sur Marseille, le Pôle SPI et l'Ecole Doctorale « Physique, Modélisation et Sciences pour l'Ingénieur ». Sur Clermont-Ferrand, le LGC / CUST et l'Ecole Doctorale « Sciences pour l'Ingénieur ». Sur Marne la Vallée, l'Institut Francilien des Géosciences.

Partenaires Internationaux :

Un partenariat est contractualisé avec Institute of water engineering and management, Cracow University of Technology. L'objectif est d'identifier un deuxième partenaire européen pour des collaborations concernant les digues.

1.2.5.2. UMR TETIS

Partenaires Nationaux :

Universités Montpellier 2 et 3, ENSAM, CNEARC, IFR ILEE (Institut Languedocien sur l'eau et l'environnement), Maison de la télédétection (IRD US Espace, US Roselt), Agropolis, GDR SIGMA Cassini, Pôle toulousain de télédétection, INRA (Dpt Environnement & Agronomie), Université de La Réunion.

Partenaires Internationaux :

Réseau PEER, AGILE (association des laboratoires de recherche en IG), Partenariats projets PCRD, Partenariats CIRAD (LERG, ESP et UGB au Sénégal, IFP Inde ...).

1.3. Les raisons de mon choix et mon rôle dans la définition et la programmation du projet

1.3.1. Mon intérêt pour la recherche scientifique

Après mon baccalauréat en « sciences économiques et sociales », je me destine à des études courtes dans le domaine de la gestion des entreprises et des administrations. Très vite, je me rends compte que ce domaine d'activité ne m'intéresse pas du tout, surtout en terme de perspectives de carrière. Cette année d'étude est un échec, je dois faire un premier choix : me confronter au marché du travail ou choisir une filière universitaire qui me plaît.

Je choisis finalement de m'inscrire en premier cycle (DEUG) de géographie, uniquement par intérêt pour les matières enseignées, notamment la géographie physique, la gestion des risques naturels et technologiques, et sous-jacent, l'aménagement du territoire. En cours d'année, le corps enseignant

nous apprend que nous pouvons, si nos résultats aux examens de première année de DEUG sont bons, entrer en IUP (Institut Universitaire Professionnalisé) d'aménagement et de développement territorial. Je suis immédiatement intéressé par cette formation, surtout dans la perspective de pouvoir bénéficier d'enseignements professionnalisant enclins à garantir des perspectives d'insertion dans la vie active. Par conséquent, je me donne les moyens d'entrer dans cette formation : j'obtiens des résultats favorables aux examens, je montre ma détermination lors de l'entretien et je parviens ainsi à intégrer l'IUP.

Vis à vis de cette formation de trois ans, mon sentiment est double. Tout d'abord, je ressens une grande satisfaction lorsqu'on me fait découvrir les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et leurs atouts. Mon intérêt pour ce type d'outil est tel que je choisis d'effectuer un stage dans lequel je montre l'intérêt des SIG pour la gestion de la pollution sonore. Ensuite je ressens une certaine forme de frustration car la notion d'aménagement du territoire était très éloignée de mes idées. Pour moi, aménagement était plutôt synonyme de projets de constructions de génie civil. Du coup, je n'étais pas spécialement intéressé par les débouchés professionnels accessibles après l'IUP. Et puis je me suis rendu compte qu'il était plus intéressant d'obtenir un diplôme de troisième cycle (DESS) plutôt que d'en rester à une maîtrise, même professionnalisée.

Mais j'ai le sentiment que le niveau de mon dossier universitaire ne me permet pas en l'état de prétendre à une formation de troisième cycle. Aussi, je dois réaliser mon service militaire. Je choisis donc de réaliser ce service militaire en tant que « scientifique du contingent » pour pouvoir travailler pendant 10 mois dans mon domaine de compétence. Lors du montage de dossier, j'ai insisté sur mes compétences en SIG. Ce thème porteur m'a permis d'être reçu et de pouvoir travailler pendant 10 mois dans une société d'informatique qui développe des SIG dédiés à la navigation maritime. A l'issue du contrat, fort de cette expérience, et appuyé par mes supérieurs, j'ai monté mes dossiers pour entrer en DESS et un dossier pour entrer en DEA.

J'ai été pris dans le seul DEA que j'ai tenté, alors que cette formation me semblait la plus inaccessible. Il faut dire que j'étais tellement intéressé par cette formation, que j'avais téléphoné spontanément à son directeur afin de montrer ma motivation. La suite logique d'un DEA est la thèse. Or, ce n'était pas spécialement mon objectif au début de la formation. Puis j'ai effectué mon stage en laboratoire de recherche : j'ai découvert ainsi ce milieu professionnel et j'ai tout de suite été attiré par ce type de métier. Pour pouvoir faire de la recherche son métier, la thèse est indispensable...

1.3.2. Mon défi : la thèse

Même si je voyais la thèse comme quelque chose d'insurmontable par rapport à mes capacités, j'ai compris qu'il fallait que je suive ce chemin à tout prix. Mais, classé assez loin de la tête de mon DEA, je n'ai pas obtenu automatiquement une bourse de thèse.

Mon directeur de stage de DEA avait apprécié mon travail mené durant mon stage et a essayé d'obtenir un financement pour que je puisse faire une thèse dans son laboratoire. Malheureusement, pour des raisons financières et administratives, cette tentative a échoué. De plus, j'avais entre temps refusé deux autres propositions de thèses financées, en espérant obtenir un financement pour la thèse proposée par mon directeur. Au final, je n'ai pas pu commencer de thèse cette année là (2001).

Je décide donc d'accepter un contrat de travail d'un an dans un laboratoire de recherche, en Guadeloupe, pour développer mes compétences en SIG, affiner mon expérience et vérifier que le métier de chercheur m'intéresse vraiment. Cette expérience a confirmé mon projet d'effectuer une thèse.

J'étais donc toujours à la recherche d'un sujet de thèse financé et je savais que le Cemagref propose chaque année des sujets. Après avoir sélectionné le sujet qui me plaisait le plus, j'ai postulé. J'ai monté mon dossier, j'ai passé un entretien téléphonique depuis la Guadeloupe et j'ai finalement été sélectionné. J'ai donné le maximum de moi même pour obtenir ce contrat : le sujet proposé combinait SIG et génie civil. Ma pratique des SIG constituait ma compétence essentielle pour le sujet et le génie civil représentait la matière que je pensais apprendre en IUP. Ma motivation pour le sujet était donc palpable, même si mes compétences en génie civil étaient nulles. C'est certainement cette

détermination qui a permis à ma candidature d'être retenue. Réaliser cette thèse représente pour moi un défi : jamais je n'aurais pensé y arriver, et pourtant...

2. Déroulement, gestion et coût du projet

2.1. Préparation et cadrage du projet

2.1.1. Evaluation des facteurs de succès et de risques, stratégies de maîtrise des risques envisagées

Le principal risque dans ce projet était, je pense, une défaillance de ma personne. Défaillance en terme soit de motivation, soit de compréhension des aspects génie civil, dans lequel je n'avais aucune compétence. Ce risque de défaillance du thésard devait être craint par l'ensemble de l'équipe car un précédent candidat avait finalement abandonné le sujet au bout de quelques mois.

Par rapport à ces risques, je pense que ma motivation et ma détermination ont été des facteurs de succès, au même plan que la qualité de l'encadrement. De plus j'ai pu bénéficier de formations de base dans le domaine du génie civil, ce qui m'a au moins permis d'identifier les enjeux de ma recherche et de comprendre le fonctionnement des ouvrages hydrauliques.

Puis, j'ai senti, au delà de la thèse, que mon travail de recherche semblait relativement porteur pour l'avenir. Cet aspect a fait que ma motivation était encore plus grande. Ainsi, cette vision positive et confiante de l'après thèse a également été un facteur de succès.

2.1.2. Choix des partenaires nationaux et internationaux

Nous avons vu que le Cemagref a des partenaires privilégiés. Je n'ai eu aucun rôle dans le choix de ces partenaires, d'autant plus qu'ils étaient déjà choisis pour le précédent thésard. Toutefois, ma recherche m'a amené à identifier et à échanger avec de nouveaux partenaires potentiels, et c'est aussi une des missions du thésard.

2.2. Conduite du projet

2.2.1. Principales étapes (réunions, décisions...)

Outre les échanges réguliers avec mes encadrants, un comité de pilotage du projet a été formé. Le projet a été ponctué de 3 réunions de ce comité de pilotage :

- la première le 30 juin 2003 ;
- la deuxième le 10 mars 2004 ;
- la dernière le 15 octobre 2004.

Ces réunions ont pour but d'orienter le projet et surtout de valider (ou non) les étapes qui ont été réalisées.

2.2.2. Gestion des relations avec les partenaires

Les relations avec les partenaires sont variables. Elles peuvent se limiter aux réunions du comité de pilotage, ou être plus régulières. Cela dépend essentiellement de l'orientation de ma recherche. Par exemple, j'ai eu plus d'échanges avec les partenaires proches du génie civil et de la gestion patrimoniale, qu'avec les partenaires en sciences de l'information géographique.

2.2.3. Problèmes rencontrés et solutions apportées

Le principal problème que j'ai rencontré concerne le démarrage de la thèse et l'ensemble de la première année. En effet, j'ai eu beaucoup de mal à définir clairement mon sujet de thèse et surtout à en cerner les enjeux. J'ai donc traversé une période de « flottement » où les incertitudes étaient omniprésentes. En conséquence, j'ai eu du mal à orienter mes recherches bibliographiques et j'ai eu le sentiment de perdre du temps.

Pour solutionner ce problème, les discussions avec les parties prenantes du projet m'ont permis de sortir petit à petit de cette période de flou. C'est la première réunion du comité de pilotage qui a levé tous les doutes en donnant une orientation plus précise du projet et en validant certaines de mes propositions.

2.3. Evaluation et prise en charge du coût du projet

2.3.1. Ressources humaines

Stagiaire 2004 : 3000 euros / 4 mois, **stagiaire 2005** : 500 euros / 3 mois, **encadrants** : 63000 euros / 4,5 mois.

2.3.2. Dépenses associées au projet

2.3.2.1. Dépenses

Mon CDD coûte au Cemagref : **24000 euros/an** (charges comprises), soit **72000 euros sur 3 ans**, auquel on peut **rajouter 20% de frais généraux** (hors déplacements) pour arriver à **86000 euros**.

Déplacements, matériels et stagiaires : **12000 euros** (cf. détail ci-dessous) :

Coût global de l'encadrement (y compris les comités de pilotage), salaires, charges, frais de structure et de fonctionnement : 1,5 mois d'ingénieur/an, soit, sur 3 ans et en reprenant le coût de facturation de la journée d'ingénieur Cemagref : **90 jours à 700 euros/j = 63000 euros**.

Matériel : 1 licence Arcview + 1 GPS + 1 PC et divers = **4500 euros HT au total**

Mes déplacements : **1500 euros/an**, soit **4500 euros sur 3 ans**.

Soit un coût total d'environ **169 000 euros**.

2.3.2.2. Recettes

Subvention du programme de recherche du **MEDD / RIO 2** : **30 000 euros**. Participation de la DG du Cemagref (bourse sur 3 ans et soutien de base pour accueil de thésards) : **42000 euros**.

3. Compétences, savoir-faire, qualités professionnelles et personnelles illustrées par des exemples

3.1. Domaines d'expertise scientifique

- analyser, à travers les études bibliographiques, les méthodes disponibles dans des domaines scientifiques variés afin de trouver la meilleure possible (ex : analyser et tester les différentes méthodes multicritères et choisir la plus apte à répondre à la problématique de recherche et l'adapter au cas des digues) ;
- avoir une stratégie ciblée et focalisée sur un objectif (ex : soumettre un article dans une revue ciblée à l'avance, rédiger un rapport dans les délais contenant les résultats attendus...) ;
- communiquer sur le travail réalisé : en interne, lors des réunions du comité de pilotage, lors de colloques nationaux ou internationaux ;

- partager, échanger, analyser et synthétiser le discours des chercheurs vis à vis de la problématique de recherche ;
- assurer une veille scientifique permanente sur l'état de l'art au niveau national et international (ex : consultation régulière d'articles, consultation quotidienne de sites Internet, communication et discussion avec des chercheurs du même domaine de recherche) ;
- rechercher et exploiter la connaissance disponible et les travaux déjà réalisés ayant des similitudes avec le projet pour gagner du temps.

3.2. Domaines d'expertise technique

- utiliser des techniques de la Sûreté de Fonctionnement pour analyser un système (ex : analyse fonctionnelle, AMDE, MAC) ;
- utiliser des logiciels informatiques spécialement développés pour l'aide à la décision multicritère (ex : ELTRI) ;
- utiliser et exploiter les SIG (ex : ArcGis) ;
- intégrer des modèles multicritères et des SIG (ex : intégration du modèle multicritère de l'évaluation de la performance des digues avec un SIG dédié à la gestion de ces ouvrages).

3.3. Connaissances acquises au sens large (dans la discipline et dans d'autres domaines)

- comprendre la problématique de gestion des ouvrages de génie civil (ex : digues, barrages, réseau d'eau et routiers) ;
- étudier des modes de gestion de ces ouvrages ;
- participer à la mise en place de dispositifs de gestion patrimoniale des ouvrages répondant aux exigences plus larges du développement durable ;
- innover en apportant des solutions inédites (ex : évaluation de la performance des digues dans un SIG) ;
- diffuser le savoir lors de sessions d'enseignement dans le domaine des SIG.

3.4. Compétences en conduite de projet

- savoir fixer un délai sur chaque étape du projet (ex : réaliser l'analyse bibliographique d'un domaine en 4 semaines, sélectionner les meilleures méthodes pour modéliser les digues et évaluer leur performance en 8 semaines et effectuer des tests sur des ouvrages réels entre deux phases de validation, en deux semaines) ;
- mettre en place un calendrier précis d'avancement des tâches conduisant à l'objectif final (ex : fixer le calendrier d'avancement des travaux des stagiaires et de mes propres travaux) ;
- définir les compétences nécessaires, tenir compte des contraintes, définir les priorités et un cadre de travail, définir les ressources (ex : stagiaires) ;
- faire des choix en fonction du temps imparti, des ressources disponibles et pouvoir prendre une décision de compromis (ex : privilégier un axe de recherche plutôt qu'un autre, même si les deux sont intéressants) ;
- respecter un cahier des charges (ex : nombre de pages pour les articles soumis aux conférences ou aux revues scientifiques) ;

- travailler sur plusieurs sujets en même temps (ex : faire valider par les experts une méthode d'évaluation de la performance des digues et en même temps travailler sur la suite) ;
- réussir à se concentrer sur un détail du projet tout en gardant à l'esprit une vision globale (ex : travailler sur le couplage du modèle multicritère avec les SIG et en même temps rédiger le mémoire de thèse) ;

3.5. Compétences managériales

- organiser et animer des réunions pour l'avancement du projet (ex : réunion des experts du domaine des digues, soit 8 personnes) ;
- gérer les disponibilités des participants pour fixer des dates de réunion compatibles avec les emplois du temps (ex : réunion du comité de pilotage) ;
- encadrer deux stagiaires de fin d'étude ;
- sensibiliser les stagiaires au sujet et montrer que leur rôle est important pour la réussite du projet ;
- motiver et soutenir leurs efforts ;
- écouter, comprendre, encourager et féliciter.

3.6. Compétences en communication

- exposer clairement le domaine de recherche à des personnes qui ne connaissent pas le domaine (ex : les aspects de la gestion des ouvrages de génie civil aux spécialistes des SIG et l'apport des SIG aux spécialistes du génie civil) ;
- savoir communiquer de façon claire sur le projet face à un public de non spécialistes (ex : lors de colloques où les thématiques peuvent être très larges) ;
- communiquer sur le projet en anglais lors de colloque internationaux (ex : lors du colloque international DMUCE4 à Porto en 2004) ;
- convaincre les tenants du projet du bien fondé des méthodes choisies (ex : présenter au comité de pilotage les choix réalisés et les argumenter en se fondant sur la science) ;
- Ecouter, comprendre et reformuler le savoir des experts (ex : réalisation du document d'évaluation de la performance de digues issu de trois réunions d'experts des digues).

3.7. Résolution de problèmes

- Trouver l'information qui permet de résoudre un problème (ex : les références bibliographiques qui traitent du sujet qui nous intéresse sur des sites Internet spécialisés ou alors les personnes ressources) ;
- Savoir demander de l'aide lorsqu'on est pas spécialiste d'une partie du projet (ex : mobiliser les compétences en génie civil de certains membres de l'équipe ou de membres du comité de pilotage pour les aspects d'analyse multicritère) ;
- mobiliser les personnes de l'équipe de recherches pour les problèmes liés à la rédaction de la thèse (ex : connaître les avis sur le sujet pour permettre d'avoir du recul sur les travaux menés) ;

3.8. Qualités personnelles

- capacité de mobilité en France et à l'étranger (ex : basé en Guadeloupe avant la thèse, déménagement durant la thèse d'Aix en Provence à Montpellier, déplacements fréquents pour des séances de travail ou colloques...) ;

- capacité à s'investir dans le travail de façon importante et continue sur une longue durée (ex : rédaction du mémoire de thèse durant toute la semaine, le week-end et parfois la nuit pendant 5 mois) ;
- capacité à s'auto motiver et forte ténacité pour obtenir un résultat escompté (ex : rédaction du mémoire de thèse) ;
- capacité à prendre des risques (ex : travailler sur des thématiques dans lesquelles je suis complètement débutant, comme le génie civil et la gestion patrimoniale, et en même temps croire à l'atteinte des objectifs) ;
- ambition professionnelle, détermination, confiance en soi ;
- volonté de rebondir après un échec (ex : un article refusé à un colloque me pousse à trouver un autre colloque où je peux de nouveau soumettre l'article) ;
- curiosité intellectuelle (s'intéresser au génie civil qui n'est pas de mon domaine de compétences) ;

3.7. Construction d'un réseau personnel

Avec la réalisation de ce projet, j'ai complété mon réseau personnel acquis lors de projets précédents.

Ce réseau est d'abord constitué de mes encadrants proches : au Cemagref puis au sein du laboratoire de mon directeur de thèse. Il est complété par les personnes membres du comité de pilotage du projet puis par d'autres équipes de recherche du Cemagref. Ma recherche est connue au niveau national par la communauté génie civil et SIG.

J'essaie de compléter ce réseau au niveau international, notamment en participant à des colloques internationaux, ou lors de discussion sur des forums, ou par mails avec des personnes clairement identifiées et intéressées par le projet. Je pense que ce réseau international sera plus important après le projet, spécialement lors de publications dans des revues scientifiques internationales.

4. Résultats, impact de la thèse

4.1. Pour le laboratoire

Ce projet a permis le développement d'une base de connaissances sur la pathologie des digues puis de proposer une méthodologie générale pour évaluer la performance d'un tronçon de digue. Elle repose sur l'analyse des mécanismes de rupture de ces ouvrages et le développement d'indicateurs décrivant la performance des digues vis-à-vis des mécanismes de rupture potentiels. Le couplage de ces indicateurs au SIG permet d'obtenir un véritable outil d'aide à la décision pour les gestionnaires de digues et terme de programmation des opérations de maintenance et de travaux.

Cette phase de couplage nécessite encore des développements informatiques et géomatiques. Cette phase sera menée en collaboration avec l'UMR TETIS. Sur l'ensemble de ce projet, le partenariat avec l'Université de Marne la vallée sera poursuivi et éventuellement étendu à une autre équipe.

Outre les communications lors de colloques (une dizaine), le rapport final de recherche « Etude d'un SIRS dédié au diagnostic, à la surveillance et à l'entretien des digues » a été rédigé et publié en avril 2004, dans le cadre du programme RIO2 du MEDD.

4.2. Pour moi (en terme de pistes professionnelles)

En terme de pistes professionnelles, le Cemagref (UR Ouvrages Hydrauliques) me propose un contrat de six mois pour poursuivre le projet.

La thèse m'ouvre les portes de la recherche publique et de l'enseignement supérieur, sous réserve de réussir les concours.

Je pense pouvoir trouver un stage post doctoral en Amérique du Nord ou en Europe.

Des possibilités d'embauche existent dans le domaine du privé en R&D dans des grands groupes ou dans des bureaux d'études, mais cette option n'est pas ma priorité.

Il existe des possibilités d'embauche chez des gestionnaires d'ouvrages linéaires (EDF, SNCF, DDE...), et peut-être aussi chez des gestionnaires de digues.

Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique.

Résumé :

La France et plus généralement le monde subissent de fréquents épisodes de crues dévastatrices. Les inondations provoquent d'importants dégâts et les coûts induits sont considérables. Les digues de protection contre les inondations, souvent sous-dimensionnées et mal entretenues, ont montré leurs faiblesses à plusieurs reprises et leurs ruptures augmentent la violence des inondations.

A l'échelle nationale, le linéaire conséquent de digues (environ 7 500 km) et le manque de données sur l'ensemble de ce parc d'ouvrages compliquent leur gestion. A l'échelle du gestionnaire local se pose la question de l'optimisation des opérations de maintenance. En effet, un gestionnaire de digues ne dispose généralement pas d'un budget suffisant pour réaliser l'ensemble des opérations de maintenance sur la totalité du parc d'ouvrages. Ce long linéaire pose donc une question majeure : par où commencer les actions de maintenance pour à la fois assurer le bon fonctionnement des digues et optimiser les choix budgétaires ?

Dans ce contexte, les gestionnaires de digues ont besoin de méthodes et d'outils d'aide à la décision. Un premier Système d'Information Géographique (SIG), le SIRS Digues, est opérationnel. Il contient les informations détaillées sur les ouvrages : géoréférencement des digues à l'échelle 1/10 000^{ème} et informations relatives aux digues (constitution, désordres, réseaux, voiries...). Toutefois en l'état, cet outil ne permet pas d'évaluer l'état des digues.

Notre recherche vise à développer des méthodes d'évaluation de la performance des digues. A partir des informations disponibles (inspections visuelles détaillées, essais réalisés, données historiques, etc.), nous proposons des indicateurs capables d'évaluer leur état et leur performance. Notre démarche comporte trois étapes :

- l'élaboration d'un modèle fonctionnel des mécanismes de rupture, bâti à partir de l'Analyse Fonctionnelle (AF) et l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), et utilisant une représentation sous forme de graphes causaux et d'arbres de défaillances ;
- la construction d'indicateurs de performance pour chaque mécanisme de rupture, sur la base de critères et d'une méthode d'aide à la décision multicritère : l'agrégation à base de règles ;
- l'intégration du modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues dans le SIRS Digues. Cette opération permet de cartographier et de visualiser la performance d'un parc d'ouvrages.

Après une application sur une digue existante de ces méthodes, nous proposons divers développements et perspectives à cette recherche, dont la principale est, à moyen terme, le développement d'un outil opérationnel pour l'aide à la décision dans les actions de maintenance des digues de protection contre les inondations.

Mots clés : digue de protection contre les inondations, gestion patrimoniale, analyse fonctionnelle, AMDE, indicateur de performance, aide à la décision multicritère, SIG.

Performance assessment of river levees Decision criteria model in a Geographic Information System.

Abstract:

More and more floods occurred over the last decade in France and in the world, causing important damages and significant costs. Moreover, levees are often not well maintained, so they hardly resist to major floods and can break easily. These failures increase flood consequences.

At french national scale, the length of levees, estimated to 7500 kilometers, and the lack of data all along these infrastructures complicates their management. At a local manager scale, the aim is to optimise maintenance operations. In fact, a levee manager has generally not a sufficient budget to lead all needed maintenance operations. The huge length of these linear infrastructures brings up the following issue: which section of the levee, on one hand has to be inspected, improved and maintained and, on the other hand, to optimise budget distribution?

In this frame, levee managers need approaches and tools in order to be helped in their maintenance decision. A first Geographic Information System (GIS) called « SIRS Digues », is developed. It contains detailed data about infrastructures: levee localisation at a scale of 1/10.000^{ème} and data about levees (constitution, degradations, pipe and street networks...). However, in the current version of this software, levee performance can not be assessed.

The goal of our research is to develop methods allowing the assessment of levees performance. From data collected (detailed visual inspections, laboratory tests, historical data, etc.), we establish indicators able to assess levee condition and performance. Our approach contains three main steps:

- analysing and modeling levees failure mechanisms with a functional model build up from Functionnal Analysis (FA) and Failure Modes and Effctes Analysis (FMEA), represented with causal graphs and fault trees representation;
- establishing of performance indicators according to each failure mechanisms, with the use of criteria and a multicriteria decision method: the affectation based on aggregation rules;
- integrating the levee performance assessment multicriteria model into the SIRS Digues in order to vizualise levee performance on charts.

After showing an application of all these methods on a real levee, we suggest some future developments according to this research. The principal one is the development of an operational tool allowing to assist levee managers in their maintenance operations.

Keywords: river levee, asset management, functional analysis, FMEA, performance indicator, multicriteria decision aid, GIS.
