
Méthode d'aide à la décision pour l'évaluation de la performance de grands linéaires de digue

Marc VUILLET¹, Laurent PEYRAS², Damien SERRE³, Jean-Christophe DE MASSIAC¹, Youssef DIAB⁴

¹G2C ingénierie, 2 avenue Madeleine Bonnaud Parc d'activités Point Rencontre, 13 770 Venelles, France
m.vuillet@g2c.fr ; jc.demassiac@g2c.fr

²Cemagref, unité de recherche « ouvrages hydrauliques » 3275 route Cézanne – CS 40061 – 13 182 Aix en Provence, France
laurent.peyras@cemagref.fr

³Université Paris Est, Ecole des ingénieurs de la Ville de Paris, 15 rue Fénelon, 75010 Paris, France
damien.serre@eivp-paris.fr

⁴Université Paris Est, – LEESU (Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains) - Département génie Urbain, 6 et 8 avenue Blaise Pascal – Cité Descartes – Champs sur Marne 77455 Marne La Vallée CEDEX 2, France
Youssef.Diab@univ-mlv.fr

RESUME : Les digues de protection contre les inondations sont des ouvrages à grands linéaires dont la performance est très variable longitudinalement. Lors de crues, leur rupture même très localisée peut entraîner des inondations catastrophiques. Dans cette communication, nous proposons l'identification, la construction et la mise en œuvre d'une démarche d'aide à la décision permettant le découpage des linéaires de digues en tronçons homogènes et leur tri par niveau de performance. Nous proposons la formulation d'une méthode de type critère unique de synthèse et son application à des cas d'études.

ABSTRACT: Levees of protection against flood are big length structures, for which performance is difficult to asset because of their longitudinal variability. During floods, a single breach can cause catastrophic floods. In this communication, we propose the identification, the construction and the implementation of an approach of decision-making support allowing the cutting of dikes length in homogeneous sections and their ranking by level of performance. We propose the formulation of a unicriterion method and sound the application in study case.

MOTS-CLES : digue, ouvrages à grands linéaires, aide à la décision, critère unique de synthèse.
KEY WORDS: river levee, big length structures, decision aid, unicriterion.

1. Introduction

Les épisodes de crue des cours d'eau conduisent de plus en plus souvent à des ruptures de digues, aggravant les effets des inondations dans les zones qu'elles sont censé protéger. Les digues sont des ouvrages de génie civil spécifiques du fait de leur grand linéaire. La France possède un parc de 7500 km de digue, à l'échelle d'un gestionnaire, les parcs représentent en moyenne quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres. Ces ouvrages induisent des problématiques spécifiques car l'ouverture d'une seule brèche rendra défaillant l'ensemble de l'aménagement. En outre, la performance des digues peut présenter une grande variabilité tout le long du linéaire du fait de l'hétérogénéité intrinsèque des ouvrages ou du fait de la présence de singularités (conduites traversantes, végétation, etc.). Ce long linéaire pose une question majeure : comment évaluer la performance des digues tout le long du linéaire et comment identifier les tronçons les moins performants ? Pour cela, nous souhaitons développer des méthodes d'évaluation de la performance des digues à qui exploitent l'ensemble des informations disponibles sur les ouvrages et leurs environnements. Les questions scientifiques rattachées à cette recherche sont les étapes classiques du traitement d'un problème d'aide à la décision (Roy et Bouyssou, 1993) qu'il faut examiner dans le contexte d'ouvrages à grand linéaire :

- comment modéliser les mécanismes de rupture et comment déterminer un jeu de critères et d'indicateurs d'états pertinent pour notre problème ?
- comment définir les actions, objets de la décision pour les digues ?
- quelles problématiques d'aide à la décision et quelles méthodes d'aide à la décision doit-on utiliser dans notre recherche ?

Nos travaux reprennent les principaux résultats du travail de Serre *et al.* (2009) qui ont répondu à la première question, en proposant un modèle fonctionnel des mécanismes de rupture des digues, l'identification des critères d'évaluation des digues et une méthode permettant leur implémentation. Sur ces bases, notre recherche se focalise donc i) sur une procédure d'identification des actions, objets de l'aide à la décision et ii) sur le choix et la formulation d'une méthode multicritère d'aide à la décision adaptée aux grands linéaires de digue. Il s'agit donc de développer un modèle d'aide à la décision pour identifier les linéaires de digue en fonction de leur performance. En première partie de cette communication, nous présentons le contexte de notre recherche, dans la deuxième partie nous présentons la formulation, la mise en œuvre et les résultats de la construction d'un critère unique de synthèse adaptée à notre problème d'aide à la décision.

2. Contexte méthodologique, formulation du problème d'aide à la décision et identification de méthodes appropriées

Méthode d'aide à la décision pour l'évaluation de la performance des grands linéaires de digue

La section 2.1 constitue un résumé des travaux conduits par Serre *et al.* (2009) pour la modélisation des mécanismes de rupture des digues et des critères de décision. Les sections 2.2 à 2.6 analysent le problème d'aide à la décision qui intéresse notre recherche.

2.1. Modélisation fonctionnelle des mécanismes de rupture des digues

Le modèle fonctionnel des mécanismes de rupture des digues a été développé à partir des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement (Villemeur, 1988) : l'analyse fonctionnelle et l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE). Ces méthodes permettent d'identifier toutes les fonctions que doivent réaliser les composants des digues, les modes de défaillance, leurs causes et effets. L'application de ces méthodes, en interaction avec un groupe d'ingénieurs spécialisés, a permis d'identifier les critères d'évaluation des digues et leurs indicateurs d'états. Enfin la modélisation des mécanismes de rupture a été obtenue par mise en œuvre de méthodes du raisonnement qualitatif et une représentation par arbres causaux (Trave-Messuyes *et al.*, 1997). Nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Serre *et al.*, 2009). Le modèle fonctionnel de défaillance des digues a été déployé pour les différents mécanismes de rupture des digues : l'érosion interne, la surverse, le glissement et l'affouillement. Cela a permis de définir l'ensemble des critères d'évaluation des digues et les indicateurs d'états associés. Le tableau 1 présente les critères identifiés pour le mécanisme de rupture par érosion interne.

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

Tableau 1. Critères d'évaluation des digues pour le mécanisme d'érosion interne

A chaque critères sont correspondent des indicateurs d'états, dans le cas de la perméabilité du corps de digue, il s'agit de « perméabilité du matériau, duré de crue, géométrie de l'ouvrage etc. Pour l'implémentation des critères à partir des indicateurs d'états, nous utilisons une méthode d'affectation à base de règle de type « SI...ALORS » (Serre *et al.* 2009). Mise en œuvre pour le domaine des digues, elle permet une formalisation de l'expertise pour le renseignement des critères d'évaluation des digues.

*Exemple : le critère « géomorphologie de la rivière » renseigne le mécanisme de rupture par affouillement. Un des indicateurs d'états de ce critère est l'indicateur d'état « ségonnal » (espace présent entre la berge et le pied de digue côté fleuve). La règle d'affectation pour ce critère est la suivante : **SI** la largeur du « ségonnal » est supérieure à 5 mètres, **ALORS** l'évaluation du critère « géomorphologie de la rivière » sera bon, avec un score de 9 sur une échelle de 0 à 10.*

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

Après le renseignement des critères d'évaluation des digues à partir des indicateurs d'états, le problème d'aide à la décision consiste à exploiter les critères d'évaluation pour l'évaluation de leur performance des digues. La construction du modèle d'évaluation de la performance des digues repose sur deux étapes distinctes d'aide à la décision, l'aide à la décision 1, « l'exploitation des critères d'évaluation des digues pour l'évaluation de la performance des digues vis-à-vis de chaque mécanisme de rupture (surverse, érosion interne, affouillement, glissement) » et l'étape d'aide à la décision 2 : « l'exploitation des évaluations de performance des mécanismes de rupture pour l'évaluation de la performance globale, c'est à dire vis-à-vis de tous les mécanismes ». Nous détaillons dans les paragraphes qui suivent la démarche adoptée pour le problème d'aide à la décision 1. Nous précisons les actions, objets de l'aide à la décision - c'est-à-dire la notion de tronçons de digues -, identifions notre problématique de référence et une méthode d'aide à la décision adaptées à notre recherche. Enfin, l'application de la méthode identifiée fait l'objet des paragraphes et l'extension de la méthode au problème d'aide à la décision 2 fait l'objet des § 3.1 à 3.6.

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

La définition de l'ensemble des actions A, objets de l'aide à la décision, pose la question d'une démarche de découpage du linéaire de digue en unités d'évaluation de la performance. Il n'existe pas de méthodes reconnues pour le découpage du linéaire de digue en tronçons de performance homogène. De plus il n'y a pas sur le terrain d'éléments ou de singularités physiques faisant l'objet de règles qui fixent le découpage des linaires. Nous proposons donc d'évaluer les digues sur la base de profils ponctuels transversaux infiniment minces, repérés par des points métriques sur le linéaire. Le profil ponctuel constitue donc l'unité minimale sur laquelle la performance est considérée comme homogène. Nous proposons de définir des tronçons de digues homogènes à partir de l'évaluation de la performance des profils ponctuels de digue constitutifs de l'ensemble d'actions A. Un tronçon de digue est donc un ensemble, continu dans l'espace, de profils ponctuels correspondant à une évaluation homogène de performance.

2.4. Elaboration des critères, définition d'une famille cohérente de critère

La modélisation fonctionnelle des mécanismes (§ 2.1) fondée sur les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement garanti, de part le caractère systématique des méthodes d'analyse fonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance, le caractère exhaustif et non redondant des critères d'évaluation des digues. L'échelle de préférence peut être de deux natures : discrète ou continue. Une échelle de

Méthode d'aide à la décision pour l'évaluation de la performance des grands linéaires de digue

préférence discrète a déjà été utilisée dans le cadre de modèles déterministes de la performance d'ouvrages hydrauliques (Serre *et al.* 2009 et Curt *et al.* 2010). Elle favorise la formalisation de la connaissance experte et est compatible avec des manipulations simples de type Max ou Min. Une échelle de préférence continue permet des manipulations plus complexes, opérateurs de type moyenne, traitement et propagation des imperfections sous forme distributionnelle. Nous proposons d'utiliser une échelle de préférence double composée d'une échelle discrète de cinq modalités pour formaliser et modéliser la connaissance experte associée à une échelle de préférence continue entre [0 ; 10].



Figure 2. Les deux échelles de préférence proposées

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

Nous souhaitons trier les tronçons par niveaux de performance, notre étude relève donc d'un problème d'aide à la décision relatif au tri. Nous proposons de mettre en œuvre une méthode de construction d'un critère unique de synthèse, à l'image des méthodes de l'utilité multi attribut (Fishburn, 1970). Des opérateurs d'agrégation de type conjonctifs (Min), disjonctifs (Max) ou de compromis, combinés à des règles simples, permettent d'agréger les évaluations des critères en modélisation des mécanismes de défaillances, de manière transparente.

2.6. Comité d'expertise support du projet de recherche

Pour les besoins du projet de recherche, nous avons constitué un comité d'expertise formé d'ingénieurs spécialisés dans le domaine des ouvrages des hydrauliques. Ce comité d'expertise intervient aux différentes phases du projet, en support de l'analyse AMDE et des terminologies retenues pour les critères et indicateurs d'état et pour la mise en œuvre des règles de l'affectation à base de règles (§ 2.1), pour la construction des règles d'agrégation du critère unique de synthèse, pour les travaux de validation des méthodes à travers des cas d'études.

3. Mise en œuvre d'une méthode du critère unique de synthèse pour les digues

3.1. Cas d'études

Nous proposons de mettre en œuvre la construction d'un critère unique de synthèse pour le mécanisme de rupture par érosion interne. Deux cas d'études correspondant à des profils aux caractéristiques différentes ont été définis et

constituent l'ensemble des actions A utilisé pour la mise en œuvre de la méthode, le cas d'étude (1) : « un profil de digue très perméable mais résistant bien au phénomène d'érosion interne »; et le cas d'étude (2) : « un profil de digue peu perméable car constitué de matériaux fins, avec présence de grandes discontinuités dans le remblai causées par de nombreux travaux au cours de l'histoire de la digue ». Le tableau 2 résume les scores des critères pour chaque cas d'études :

Critères pour le mécanisme d'érosion interne	Cas d'étude 1	Cas d'étude 2
"Perméabilité" du corps de digue	3	8
Singularités dans le corps de digue	8	4
Résistance du corps de digue à l'érosion interne	9	9
"Perméabilité" de la fondation de la digue	3	8
Singularités dans la fondation de la digue	8	4
Résistance de la fondation à l'érosion interne	9	9
Résistance de la digue à la suffusion de contact corps de digue/ fondation	8	4
Singularités à l'interface corps de digue/ fondation	9	9

Tableau 2. Évaluation des profils de digue cas d'études sur chaque critère

3.2. Notation et principe

Soit un profil ponctuel repéré par son abscisse x du linéaire de digue, nous notons : $C_{j, M}(x)$ l'évaluation du critère j du mécanisme M au point x du linéaire ; $A_{k, M}(x)$ le score de l'agrégation k constitutive du mécanisme M ; H un opérateur d'agrégation parmi Min, Max, Moy ou Moy-P ; $IP_M(x)$ le score de performance pour le mécanisme M au point x du linéaire. L'évaluation du critère unique de synthèse est réalisée par des étapes d'agrégations intermédiaires notées $A_{k, S}$ où A est la $k^{\text{ième}}$ agrégation ($k=1, 2, \dots, n$). Dans le cas d'un mécanisme M de critères, nous écrivons l'agrégation quelconque de critères A_k et le critère unique de synthèse IP_M de la façon suivante :

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

$$IP_M(x) = H [A_{1, M}(x), \dots, A_{k, M}(x)] \quad [2]$$

3.3. Application au mécanisme d'érosion interne

Sur la base de la modélisation fonctionnelle du mécanisme d'érosion interne (Tableau 1) et après consultation du comité d'expertise, nous proposons le schéma de construction du critère unique de synthèse suivant :

Méthode d'aide à la décision pour l'évaluation de la performance des grands linéaires de digue

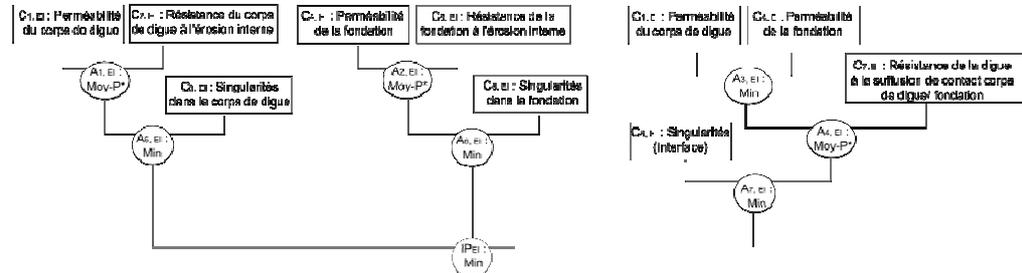


Figure 3. Construction d'un critère unique de synthèse pour le tri des tronçons vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne

La procédure d'agrégation illustrée par la Figure 3 a suivi la logique fonctionnelle du mécanisme de rupture par érosion interne. La première séquence d'agrégation modélise la propension d'une digue à résister à l'érosion interne. Le processus d'agrégation est une compensation entre le critère « perméabilité » et le critère « résistance à l'érosion interne » (tableau 1). Considérant que la résistance à l'érosion interne est prépondérante dans l'évaluation du phénomène, nous proposons donc une moyenne pondérée avec les coefficients suivant : 1/3 pour le critère « perméabilité » et 2/3 pour le critère « résistance à l'érosion interne ». Pour le corps de digues et pour la fondation, nous proposons les agrégations suivantes :

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

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

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

$$A_{4, EI}(x) = \text{Moy-P} [A_{3, EI}(x), C_{7, EI}(x)] = \text{Moy} [(1/3) A_{3, EI}(x), (2/3) C_{7, EI}(x)] \quad [5]$$

$$\text{avec } A_{3, EI}(x) = \text{Min} [C_{1, EI}(x), C_{6, EI}(x)] \quad [6]$$

L'agrégation modélise la présence de singularités susceptibles de provoquer des phénomènes d'érosion interne. Pour cela, nous retenons le plus mauvais score entre les caractéristiques propres à la digue à développer l'érosion interne ($A_{1, EI}$, $A_{2, EI}$ et $A_{4, EI}$) et l'évaluation des singularités susceptibles de provoquer une érosion interne. Nous proposons l'opérateur Min pour l'agrégeons les variables $A_{1, EI}$, $A_{2, EI}$ et $A_{4, EI}$:

$$A_{5, EI}(x) = \text{Min} [A_{1, EI}(x), C_{3, EI}(x)] \quad [7]$$

$$A_{6, EI}(x) = \text{Min} [A_{2, EI}(x), C_{6, EI}(x)] \quad [8]$$

$$A_{7, EI}(x) = \text{Min} [A_{4, EI}(x), C_{8, EI}(x)] \quad [9]$$

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

$$IP_{EI}(x) = \text{Min} [A_{5, EI}(x), A_{6, EI}(x), A_{7, EI}(x)] \quad [10]$$

3.4. Résultats

La mise en oeuvre de la méthode du critère unique de synthèse pour les deux cas d'études donne les résultats détaillés dans les tableaux 3 et 4.

Cas d'étude (1) : profil de digue très perméable mais résistant bien aux phénomènes d'érosion interne	Scores des critères	Scores des agrégations intermédiaires (1)	Scores des agrégations intermédiaires (2)	Score de l'agrégation intermédiaire (3)	Score de l'indicateur de performance
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	3				
C2, EI : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	8	6,3	6,3	6,3	
C3, EI : Singularités dans le corps de digue	9	9			
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	3				
C5, EI : Résistance de la fondation à l'érosion interne	8	6,3	6,3	6,3	
C6, EI : Singularités dans la fondation de la digue	9	9			6,3
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	3				
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	3	3			
C7, EI : Résistance de la digue à la suffusion de contact corps de digue/ fondation	8	8	6,3	6,3	
C8, EI : Singularités interface corps de digue/ fondation	9		9		

Tableau 3. Résultats de la méthode du critère unique de synthèse appliquée au mécanisme de rupture par érosion interne, cas d'étude n°1

Cas d'étude (2) : profil de digue peu perméable en matériaux fins, avec présence de grandes discontinuités dans le remblai causées par de nombreux travaux au cours de l'histoire de la digue	Scores des critères	Scores des agrégations intermédiaires (1)	Scores des agrégations intermédiaires (2)	Score de l'agrégation intermédiaire (3)	Score de l'indicateur de performance
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	8				
C2, EI : Résistance du corps de digue à l'érosion interne	4	5,3	5,3	5,3	
C3, EI : Singularités dans le corps de digue	9	9			
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	8				
C5, EI : Résistance de la fondation à l'érosion interne	4	5,3	5,3	5,3	
C6, EI : Singularités dans la fondation de la digue	9	9			5,3
C1, EI : Perméabilité du corps de digue	8				
C4, EI : Perméabilité de la fondation de la digue	8	8			
C7, EI : Résistance de la digue à la suffusion de contact corps de digue/ fondation	4	4	5,3	5,3	
C8, EI : Singularités interface corps de digue/ fondation	9		9		

Tableau 4. Résultats de la méthode du critère unique de synthèse appliquée au mécanisme de rupture par érosion interne, cas d'étude n°2

Les résultats obtenus sont les suivants, le cas d'étude (1) obtient le score de 6,3 ce qui correspond à la modalité « tolérable » et le cas d'étude (2) obtient le score de

Méthode d'aide à la décision pour l'évaluation de la performance des grands linéaires de digue

5,3 correspondant à la modalité « médiocre ». Ces résultats ainsi que ceux d'autres cas d'études ont été acceptés par l'ensemble de membres du comité d'expertise,

3.5. Perspectives : construction d'un indicateur de performance globale des digues

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

$$IP_{GLOBAL}(x) = \text{Min} [IP_{EI}(x), IP_{AFF}(x), IP_{GLI}(x), IP_S(x)] \quad [11]$$

Avec : IP_{EI} l'indicateur de performance du mécanisme d'érosion interne, IP_{AFF} l'indicateur de performance du mécanisme d'affouillement, IP_{GLI} l'indicateur de performance du mécanisme de glissement et IP_S l'indicateur de performance du mécanisme de surverse. Afin de faciliter l'aide à la décision, l'indicateur de performance global est évalué sur une échelle de décision à quatre valeurs.

Inexistant		Mauvais		Médiocre		Tolérable		Bon			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Prioritaire				Non satisfaisant		A suivre		Pas de suivi particulier			

Figure 4. Échelle de décision proposée pour l'évaluation de la performance globale

4. Conclusions

Notre recherche vise à produire des méthodes d'aide à la décision pour évaluer la performance de grands linéaires de digues. Les questions scientifiques concernent l'identification des objets de l'aide à la décision, le choix et la formulation d'une méthode multicritère adaptée à l'évaluation des digues. Les digues sont évaluées à partir de profils ponctuels repérés par leur abscisse x , sur le linéaire. Un tronçon de digue étant alors un ensemble continu dans l'espace de profils ponctuels correspondant à une évaluation homogène de performance. Ensuite, nous avons identifié une famille cohérente de critères d'évaluation des digues, défini la problématique de référence, le tri, et formulé une méthode de construction du critère unique de synthèse en combinant des opérateurs d'agrégation par règles. Sa mise en œuvre a fait l'objet de plusieurs séances de travail du comité d'expertise et a été réalisé pour chaque mécanisme de rupture des digues. Les résultats obtenus ont été acceptés par l'ensemble des membres du comité et testés sur plusieurs études de cas. La méthode du critère unique de synthèse formulée pour les grands linéaires de

digues permet de modéliser les processus fonctionnels de défaillance des digues. Elle permet également d'établir un tri pour chaque profil ponctuel au moyen du score produit sur une double échelle continue et à modalités qualitatives, à partir de ce tri, le gestionnaire de digue pourra prioriser ces actions d'investigation, maintenance et réparation. Elle offre une transparence dans l'agrégation des différents critères d'évaluation des digues, permettant au décideur de consulter les scores d'évaluation de la performance des profils ponctuels, mais aussi les scores des critères d'évaluation des digues pour chaque mécanisme de rupture.

5. Bibliographie

Azibi R. Vanderpouten D., "Construction of rule-based assignment models", *European Journal of Operational Research*, 138 (2), 274-293, April 2002.

Curt C., Peyras L., Boissier D., "A Knowledge Formalization and Aggregation-Based Method for the Assessment of Dam Performance", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 25 pp, 171-183, 2010.

Fishburn P.C., *Utility theory for decision-making*, New York, Wiley, 1970.

Roy B., Bouyssou D. *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*, Paris : Editions Economica, 1993.

Serre D., Peyras L., Maurel P., Tourment R., Diab Y., "A spatial decision support system aiding levee managers in their repair and maintenance planning" *In Journal of Decision Systems* -, Vol. 18, N°. 3, pp. 347-373, 2009.

Trave-Massuyes L., Dague P., Guerrin F., *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*, Paris : Editions Hermès, 1997.

Villemeur A., *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels Fiabilité – Facteurs humains – Informations*. Paris : Editions Eyrolles, 1988.