



HAL
open science

Évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales soumises au développement d'une végétation arborescente

G. Bambara, C. Curt, P. Mériaux, M. Vennetier, P. Vanloot

► **To cite this version:**

G. Bambara, C. Curt, P. Mériaux, M. Vennetier, P. Vanloot. Évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales soumises au développement d'une végétation arborescente. 32èmes Rencontres universitaires de génie civil, Jun 2014, Orléans, France. pp.379-388. hal-01119026

HAL Id: hal-01119026

<https://hal.science/hal-01119026v1>

Submitted on 20 Feb 2015

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

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

Evaluation de la vulnérabilité des digues fluviales soumises au développement d'une végétation arborescente

Gisèle Bambara^{1a}, Corinne Curt^{1a}, Patrice Mériaux^{1a}, Michel Vennetier^{1b}, Pierre Vanloot²

¹ IRSTEA, 3275 route de Cézanne, 13182; Aix-en-Provence cedex 5, France | (prenom.nom@irstea.fr)

^{1a} UR Ouvrages hydrauliques et Hydrologie

^{1b} UR Ecosystèmes Méditerranéens et Risques

² Aix Marseille Université, LISA, EA4672, Equipe METICA, 13397 Marseille cedex 20, France (pierre.vanloot@univ-amu.fr)

RÉSUMÉ. La végétation arborée, souvent présente sur les digues fluviales accroît leur vulnérabilité. Deux mécanismes de détérioration peuvent résulter de sa présence: l'érosion interne et l'érosion externe. Vuillet (2012) a établi un modèle d'évaluation de la vulnérabilité des digues en remblai mais qui ne prend que partiellement en compte la présence de végétation arborée. Ce modèle comporte trois niveaux hiérarchiques: l'indicateur de vulnérabilité, les critères fonctionnels et les indicateurs d'état. Actuellement, une liste d'indicateurs d'état non formalisés est fournie à l'utilisateur pour réaliser l'évaluation de chacun des critères. Notre étude s'attache d'une part, à identifier, formaliser et agréger les indicateurs d'état et d'autre part, à prendre en compte la présence de végétation ligneuse. Elle permet ainsi une amélioration du modèle en place.

ABSTRACT. Woody vegetation, often present on the river dikes, increases their vulnerability. Two mechanisms of deterioration may result from its presence: internal and external erosion. Vuillet (2012) established a model for assessment of embankment dikes vulnerability but that only partially takes in account of the tree vegetation presence. This model has three hierarchical levels: vulnerability indicator, functional criteria and status indicators. Currently, a list of non-formalized status indicators is provided to the user of the model to carry out the evaluation of each criterion. Our study focuses firstly, to identify, formalize and aggregate the status indicators and secondly, to take into account the woody vegetation presence. It thus allows a model improvement in place.

MOTS-CLÉS : Digues fluviales, vulnérabilité, végétation ligneuse, système à base de connaissance, SPIR.

KEYWORDS: River dikes, vulnerability, woody vegetation, knowledge-based system, NIRS.

1. Introduction

Le parc de digues fluviales français totalise environ 10 000 km de linéaire. Ces ouvrages de génie civil ont un rôle essentiel : protéger la population et ses biens en cas de crue. Cependant, en cas de défaillance de cette fonction c'est-à-dire lors d'une rupture totale de la digue, les conséquences humaines et économiques peuvent être dramatiques. Un tel accident peut résulter de différents scénarios de défaillance correspondant à l'enchaînement d'un ou plusieurs mécanismes de détérioration tels que l'érosion interne, l'érosion externe, la surverse et le glissement. Dans ce contexte, la maîtrise de la vulnérabilité des digues est un enjeu majeur pour les gestionnaires en charge de leur sécurité. Elle consiste à rechercher, évaluer et corriger l'ensemble des facteurs de fragilité qui contribuent à la réalisation des dommages en cas d'occurrence d'un aléa extérieur comme les crues. Parmi ces facteurs de fragilité, la présence de végétation arborescente sur ou aux abords de l'ouvrage pose de nombreux problèmes car elle peut favoriser l'apparition de mécanismes de détérioration à court, moyen et long termes [MER 06]. Le remblai des digues fluviales, étant généralement constitué de dépôts alluviaux et bien souvent mal compacté, est un lieu privilégié d'implantation de la végétation arborescente. Or, ce facteur de fragilité peut entraîner deux mécanismes de détérioration : l'érosion externe et/ou l'affouillement et l'érosion interne. Dans cet article, nous nous penchons spécifiquement sur l'érosion interne. Celle-ci est favorisée premièrement par le développement des systèmes racinaires qui constituent des zones d'hétérogénéité et de perméabilité dans le corps du remblai puis par leur décomposition qui favorise selon la nature du sol soit la création de conduits à travers la digue, susceptibles d'initier une érosion interne de conduit, soit l'augmentation de la perméabilité globale dans le remblai, par la décomposition d'un volume racinaire important [ZAN 08].

Il est donc essentiel pour les gestionnaires de digues de disposer de méthodes et outils leur permettant des prises de décision efficaces afin de réaliser les travaux de maintenance nécessaires à la sécurité de leurs ouvrages, notamment ceux liés à la végétation. Ces décisions reposent sur une évaluation de la vulnérabilité ou de la performance (inverse de la vulnérabilité) de l'ouvrage. Des modèles à base de connaissances pour l'évaluation de la performance des digues ont été proposés par Serre [SER 05] et Vuillet [VUI 12]. Le modèle de Vuillet propose une structure hiérarchique comportant trois niveaux. L'indicateur de vulnérabilité vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration donné est la sortie du modèle. Il est obtenu par agrégation de critères fonctionnels eux même évalués à partir d'indicateurs d'état qui sont ainsi les entrées du modèle. Ces derniers sont issus d'une ou plusieurs données d'entrée, relevant de mesures visuelles, instrumentales, calculées ou issues du dossier de conception-réalisation de l'ouvrage. Actuellement, une liste d'indicateurs d'état, non formalisés est fournie à l'utilisateur pour réaliser l'évaluation de chacun des critères.

En prenant pour base le modèle développé par Vuillet et en s'appuyant sur les méthodologies de recueil et de formalisation des connaissances [AKE 09 ; BOO 04], nous présentons les améliorations apportées à ce modèle. Nous illustrons l'application de notre modèle sur un cas simplifié construit à partir de cas réels afin d'en tester sa cohérence.

2. Démarche méthodologique

Le modèle mis en place par Vuillet [VUI 12] a pour objectif d'élaborer un modèle d'aide à la décision probabiliste pour l'évaluation de la performance (ou vulnérabilité) des digues. Ce modèle a pour vocation d'être utilisé par un ingénieur spécialisé, en situation de diagnostic rapide ou approfondi et en valorisant toutes les données disponibles. Or, ce modèle s'est focalisé sur la formalisation et l'agrégation de critères fonctionnels pour l'évaluation d'un indicateur de vulnérabilité. La figure 1 illustre la structure d'agrégation du modèle pour l'évaluation d'un indicateur de vulnérabilité du corps de digue pour le mécanisme de détérioration par érosion interne. Trois critères fonctionnels sont nécessaires (nous notons C pour critère et EI pour érosion interne) : $C_{1, EI}$ « Perméabilité du corps de digue », $C_{2, EI}$ « Résistance du corps de digue à l'EI », $C_{3, EI}$ « singularité dans le corps de digue ».

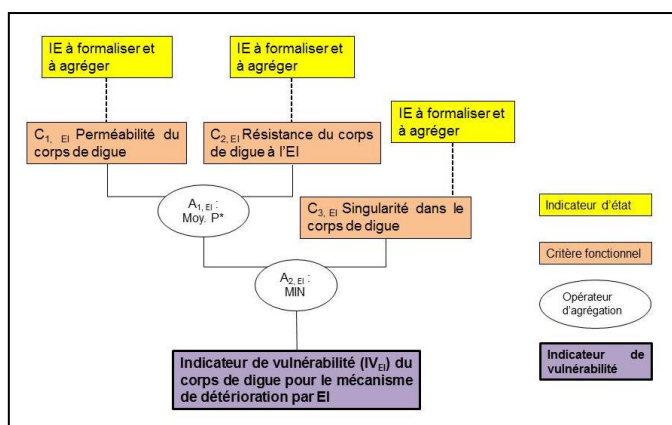


Figure 1. Structure d'agrégation pour l'évaluation d'un indicateur de vulnérabilité du corps de digue vis-à-vis de l'érosion interne (C = critère fonctionnel, IE = indicateurs d'état, A = agrégation, IV = indicateur de vulnérabilité, EI = érosion interne)

Une liste d'indicateurs d'état non formalisés a été mise en place par Vuillet : fournie à l'utilisateur du modèle d'évaluation, elle l'aide à évaluer les critères fonctionnels. Un indicateur donne des indications sur l'état d'un critère. Il est défini comme une information ou une donnée formalisée de manière à rendre son

utilisation répétable et reproductible [CUR 08]. Notre démarche fonctionne en 2 temps. Il s'agit tout d'abord d'identifier et formaliser les indicateurs permettant de caractériser la végétation présente sur les ouvrages. La formalisation de ces indicateurs est réalisée, en utilisant une grille qui repose sur 5 champs : nom de l'indicateur, définition, échelle de mesure et références (différents états possibles de l'indicateur), caractéristiques spatiales (partie de la digue à analyser) et les caractéristiques temporelles (pas de temps pour la mesure de l'indicateur et l'analyse de la tendance de cette mesure) [CUR 08]. Dans un deuxième temps, les agrégations qui permettent le passage des indicateurs d'état à un critère fonctionnel sont formalisées.

La mise en œuvre de la méthode est basée sur des séances de recueil et de formalisation des connaissances auprès d'un groupe de trois ingénieurs du génie civil reconnus comme experts auprès du ministère de l'environnement sur la base de leur savoir et savoir-faire [ZWI 95] qui caractérise l'expertise. Une succession de différentes étapes, illustré par la figure 2, est réalisée pour la construction du modèle et chaque étape donne lieu à une vérification de la part de l'animateur des séances.

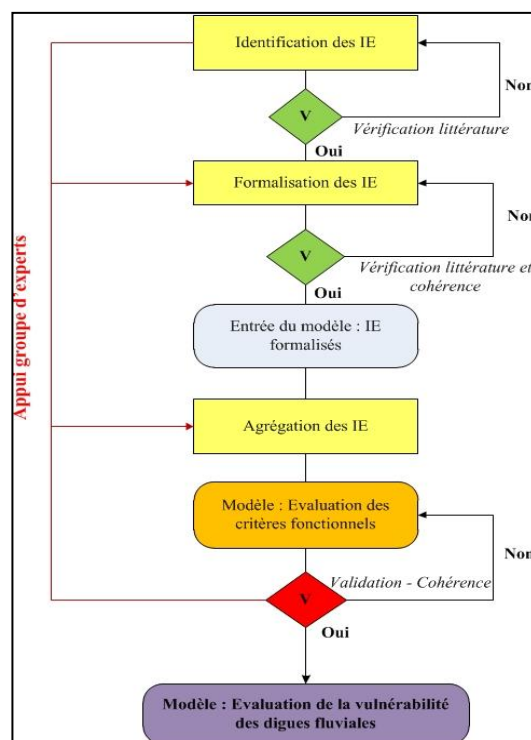


Figure 2. Etapes de construction du modèle d'évaluation des critères fonctionnels (IE : Indicateurs d'état)

3. Identification et formalisation des indicateurs d'état

Notre étude a dans un premier temps pour but de compléter la liste d'indicateurs issus des travaux de Vuillet, notamment en identifiant les indicateurs spécifiques à la végétation arborescente. Afin de déterminer ces indicateurs nous avons déployé deux méthodes de sureté de fonctionnement : l'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) [VIL 88]. Nous avons complété l'analyse fonctionnelle du système de digue en remblai homogène réalisé par Vuillet, ce qui nous a permis d'identifier les fonctions de résistance que doit posséder la digue vis-à-vis des contraintes liées à la présence de végétation ligneuse. Trois types de fonctions sont concernés : la fonction « résister aux sollicitations mécaniques », la fonction « résister à l'érosion interne » et la fonction « limiter les flux hydrauliques ». Une AMDE spécifique à la problématique de la végétation arborée présente sur les digues en remblai a ensuite été réalisée. Cette AMDE a permis d'identifier les indicateurs d'état des digues qui sont issus des indicateurs des causes et des effets des défaillances des composants du système. Au final, 7 indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborée ont été identifiés : *port des arbres, type de structure racinaire des individus, degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu ...* sont des indicateurs d'état spécifique à la végétation arborescente.

L'étape de formalisation des indicateurs nécessite de choisir une échelle de mesure. Nous proposons d'utiliser une échelle d'évaluation double c'est-à-dire une échelle ordinale qui se caractérise par l'ordonnement des catégories en fonction d'un critère d'intensité et une échelle d'intervalle qui permet de travailler sur des grandeurs numériques continues (cf. tableau 2). Tous les indicateurs sont évalués sur cette échelle.

Afin d'obtenir un indicateur de vulnérabilité vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne pour le corps d'une digue en remblai homogène, le modèle de Vuillet totalise 3 critères fonctionnels (cf. figure 1). Pour cette communication nous avons choisi de présenter l'identification et la formalisation des indicateurs d'état permettant d'évaluer le critère fonctionnel N°1 « *Perméabilité du corps de digue* ». Le tableau 1 présente les 7 indicateurs d'état relatifs à ce critère.

Critère fonctionnel	Indicateurs d'état
C1, EI « Perméabilité du corps de digue »	IE1 – Fuites (eau) ou indices de fuites (zones humides) IE2 – Perméabilité du matériau IE 3 – Géométrie de la digue IE4 – Volume racinaire par individu IE5 – Densité des individus IE6 – Type de structure racinaire des individus IE7 – Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu

Tableau 1. Indicateurs d'état pour le critère fonctionnel $C_{1, EI}$

Chacun de ces indicateurs a été formalisé en utilisant une grille de formalisation. Nous présentons ci-dessous, la grille de formalisation de l'indicateur IE5 [C₁, EI] « Densité des individus » en exemple (cf. tableau 2).


Nom	IE5 – Densité des individus
Définition	Plus la densité des individus est élevée, plus les hétérogénéités de perméabilité dans le remblai peuvent apparaître, notamment lors de la décomposition des systèmes racinaires.
Echelle et référence	 10 : absence d'individus 5-4 : présence d'un individu par 10 m ² 3-2 : présence de 2 à 5 individus par 10 m ² 1-0 : présence > 5 individus par 10 m ²
Caractéristique de lieu	Tronçon de digue analysé
Caractéristique de temps	Mesure réalisée lors d'une inspection visuelle

Tableau 2. Grille de formalisation pour l'indicateur « Densité des individus »

Comme indiqué en introduction, les indicateurs d'état sont issus de plusieurs types de données : de mesures visuelles (IE1, IE4, IE5, IE6), de données de conception-réalisation (IE2, IE3), de mesures indirectes (IE7). Dans notre cas, l'indicateur d'état IE7 « degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu » a été identifié par le groupe d'experts comme étant un indicateur important pour l'évaluation de la propension aux écoulements dans le corps de digue et donc pour l'évaluation du corps de digue vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne. Cet indicateur ne peut être obtenu à partir d'une information directement accessible. Une méthodologie permettant l'accès à cette information a donc été mise au point.

Des dispositifs expérimentaux ont été mis en place sur des digues « tests » situées dans différentes zones géographiques. Des échantillons de racines issus d'arbres fraîchement coupés, de différents diamètres (2, 3, 5, 8 et 10 cm) et espèces (chêne, frêne, peuplier, robinier, pin sylvestre et mélèze) ont été placés au sein du dispositif afin de suivre l'évolution de leur décomposition au cours du temps. Une partie des échantillons est récolté environ tous les deux ans. Les analyses menées sur ces échantillons concernent l'évolution de leur densité (estimation par déplacement d'eau) et l'évolution des caractéristiques chimiques par spectrométrie proche infrarouge (SPIR). Le traitement de ces données est réalisé à l'aide de méthodes chimiométriques qui permettent de discriminer les échantillons entre eux en fonction de leur degré de décomposition, de leur espèce et de leur diamètre [BAM 13]. Les premiers résultats acquis (4 années de vieillissement) permettent d'ores et déjà de fournir des premières valeurs pour les tendances de la décomposition des racines et donc de renseigner l'échelle de notation de l'indicateur « Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu ». En effet, le but de ce travail est

de fournir des tendances de décomposition des racines en fonction de l'implantation géographique du dispositif expérimental (facteurs de décomposition « température » et « humidité » partiellement pris en compte), de l'espèce végétale et du diamètre des racines. Les autres facteurs influençant la décomposition des racines ligneuses, tel que les agents de la décomposition (insectes et champignons) ne sont pas pris en compte. La poursuite du suivi des dispositifs expérimentaux, ainsi que la mise en place de nouveaux dispositifs nous permet d'affiner et de compléter cette échelle.

4. Agrégation des indicateurs d'état

La troisième étape pour la construction du modèle d'évaluation des critères fonctionnels est la recherche de structures d'agrégation adéquates permettant d'évaluer chaque critère fonctionnel. En dehors du cas des indicateurs directs (e.g. IE1 de $C_{1, EI}$) qui permettent d'évaluer directement le critère analysé, nous utilisons des modèles d'agrégation décrits lors des séances de recueil (cf. figure 3). Ce type de modèle a pour intérêt d'être proche du raisonnement réalisé par les experts que nous cherchons à mimer et d'être lisible pour les futurs utilisateurs. S'il n'y a pas de fuite c'est-à-dire si l'indicateur direct IE1 de $C_{1, EI}$ est évalué comme étant « bon », le critère fonctionnel $C_{1, EI}$ est évalué. Cette évaluation est faite en utilisant la structure d'agrégation illustrée par la figure 3. A partir de l'analyse experte, nous avons déterminé des règles d'agrégation pour les indicateurs IE2 à IE7 qui sont synthétisées sous la forme de tables de vérité (cf. figure 4). Les tables pour obtenir la perméabilité intrinsèque et une estimation de la propension aux écoulements sont définies et une dernière table vise à évaluer le critère $C_{1, EI}$.

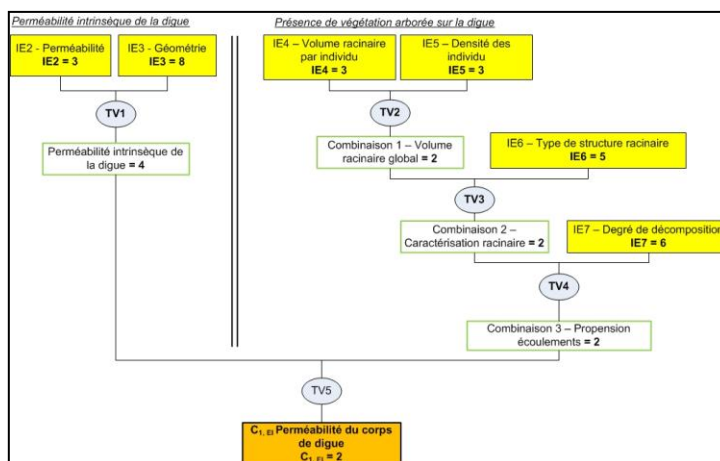


Figure 3. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel $C_{1, EI}$ « Perméabilité du corps de digue » (TV : table de vérité)

La figure 4 présente un exemple de table de vérité (IE2 et IE3) ayant comme résultat l'évaluation de la perméabilité intrinsèque de la digue. Les deux premières lignes de la table sont grisées car IE3 ne prend pas les valeurs [0 ; 1] dans les références qui ont été établies.

		IE2 Perm. du mat.												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
IE3 Géométrie	0													
	1													
	2	0	1	1	1	2	4	4	4	5	5	5		
	3	1	1	1	1	2	4	4	4	5	5	5		
	4	1	1	2	2	3	3	4	5	8	8	8		
	5	1	1	3	3	3	3	5	5	8	8	8		
	6	2	2	4	4	5	6	6	6	8	8	8		
	7	2	2	4	5	5	6	7	7	8	8	9		
	8	3	3	4	5	6	7	8	8	8	9	10		
	9	3	3	4	5	6	7	8	9	9	9	10		
	10	3	3	4	5	6	7	9	9	10	10	10		

Figure 4. Table de vérité experte pour l'agrégation des indicateurs d'état IE2 et IE3

Pour la propension aux écoulements, les indicateurs IE4, IE5, IE6 et IE7 sont agrégés de manière à expliciter le raisonnement expert pas à pas. D'abord, nous cherchons à obtenir le **volume racinaire global** par la combinaison 1 des indicateurs IE4 et IE5. Puis, nous agrégeons le résultat de cette première combinaison avec l'indicateur IE6 afin d'obtenir une première **caractérisation générale des systèmes racinaires** (combi. 2) présent dans le corps de digue. Enfin, nous combinons ce résultat avec l'indicateur IE7, ce qui permet l'estimation de la **propension aux écoulements** (combi. 3) dans le corps de digue soumis à la présence de végétation arborée. L'évaluation du critère fonctionnel $C_{1, EI}$ est finalement réalisée par l'agrégation des résultats obtenus pour la perméabilité intrinsèque de la digue et pour la propension aux écoulements liée à la présence de végétation arborée (cf. figure 3).

5. Validation

A titre d'exemple, nous présentons une simulation de l'évaluation du critère $C_{1, EI}$ réalisée lors d'une séance avec le groupe d'expert. Cette étape permet de valider la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état pour l'évaluation de $C_{1, EI}$. Ce premier travail de validation a été réalisé sur des cas simplifiés. Une description des ouvrages a été donnée aux experts pour chaque cas. Au total, quatre simulations ont été produites. Les trois premières simulations ont fait l'objet d'une notation des experts par consensus pour l'ensemble des indicateurs d'état. Cette procédure a permis de valider avec les experts le modèle d'agrégation produit pour l'évaluation du critère fonctionnel $C_{1, EI}$. La dernière simulation a fait l'objet d'une notation individuelle des experts et ce, afin de tester la répétabilité et la

reproductibilité de l'utilisation des indicateurs d'état, c'est à dire pour valider les formalisations réalisées.

Par exemple, le descriptif suivant a été donné aux experts pour la validation des agrégations du modèle : « *Aucune fuite ou indice de fuites ne sont observés sur la digue, le groupe d'expertise s'attache donc à attribuer un score aux indicateurs IE2 à IE7. Le tronçon de digue analysé a une perméabilité considérée comme mauvaise. Le remblai est constitué de sols granulaires. Par contre sa géométrie est large. Plusieurs arbres, essentiellement des pins sylvestres et des mélèzes, sont présents sur le talus « coté eau » de la digue (la digue est située dans le prolongement de la berge), des arbres et des souches mortes sont également présents sur le talus aval et en pied de digue aval. D'après les observations visuelles, la densité des individus présents sur le talus « coté eau » est élevée. Nous sommes en présence de plusieurs arbres matures dont le diamètre au collet est > 30cm. Coté zone protégée, de nombreux individus (présence de 2 à 5 individus par 10m²) ont été abattus il y a 4 ans.* »

A partir de ce descriptif, les experts ont évalué les indicateurs d'état IE2 à IE7 de C_{1, EI} (cf. tableau 1). La figure 3 présente les résultats. Le résultat obtenu et la validation de ce résultat par le groupe d'experts, permet de valider la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état relatif à l'évaluation du critère C_{1, EI}. La formalisation de chacun des indicateurs assure la répétabilité et la reproductibilité de l'évaluation du critère C_{1, EI}.

6. Conclusion

Le développement d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales soumises au développement de la végétation arborescente revêt d'une importance particulière car ce facteur de fragilité peut mener à deux grands mécanismes de détérioration que sont l'érosion interne et l'érosion externe. La méthode proposée, basée sur l'amélioration du modèle d'évaluation des digues fluviales déjà en place et opérationnelle, représente une avancée scientifique et technique sur plusieurs plans : d'abord, par la prise en compte de la végétation arborée au travers d'indicateurs spécifiques et, parallèlement par le développement de mesures indirectes qui fournissent des sources de connaissances supplémentaires permettant de renseigner les indicateurs d'état, ensuite, par la formalisation et l'agrégation des indicateurs d'état permettant l'obtention des critères fonctionnels qui permettent de rendre le modèle d'évaluation plus robuste. Les aspects de formation des futurs utilisateurs seront importants à prendre en compte et seront développés ultérieurement.

Remerciements : Les auteurs remercient la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur et l'Union Européenne pour leurs soutiens financiers à nos travaux de recherche.

7. Bibliographie

- [AKE 09] AKERKAR R., SAJJA P., *Knowledge-based systems*, Jones and Bartlett, 2009.
- [BAM 13] BAMBARA G., CURT C., VENNETIER M., MÉRIAUX P., ZANETTI C., VANLOOT P., “Characterization of woody roots located in dykes by near-infrared spectroscopy and chemometrics”, in: *AI – Agriculture and Environment, presented at the NIR2013 Proceedings*, La Grande-Motte, 2-7 June 2013, France, pp. 274–279.
- [BOO 04] BOOKER J.M., MCNAMARA L.A., “Solving black box computation problems using expert knowledge theory and methods”, *Reliability Engineering System Safety*, vol. 85, n° (1-3), 2004, p. 331-340.
- [CUR 08] CURT C., Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances : application aux barrages en remblai, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2008.
- [MER 06] MERIAUX P., VENNETIER M., AIGOUY S., HOONAKKER M., ZYLBERBLAT M., “Diagnosis and management of plant growth on embankment dams and dykes”, *Presented at the Vingt-deuxième Congrès des Grands Barrages*, Barcelone, 2006, pp. 1–20
- [SER 05] SERRE D., Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations : modélisation de critères de décision dans un Système d’Information Géographique, Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée, Paris, 2005.
- [VIL 88] VILLEMEUR A., *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité, facteurs humains, informatisation*, Eyrolles, 1988.
- [VUI 12] VUILLET M., Élaboration d’un modèle d’aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l’évaluation de la performance des digues fluviales, Thèse de doctorat, Université PARIS-EST, Paris, 2012.
- [ZAN 08] ZANETTI C., VENNETIER M., MERIAUX P., ROYET P., DUFOUR S., PROVANSAL M., « L’enracinement des arbres dans les digues en remblai: étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages », *Ingénieries-Eat*, n° 53, 2008, p. 49-67.
- [ZWI 95] ZWINGELSTEIN G., *Diagnostic des défaillances : théorie et pratiques pour les systèmes industriels*, Hermès, 1995.