

# **Modèles d'évaluation de la performance des digues soumises à la présence de végétation arborescente – cas de l'érosion interne**

## ***Performance assessment models for dikes subjected to the presence of woody vegetation – case of internal erosion***

**G. Bambara<sup>1</sup>, C. Curt<sup>1</sup>, P. Mériaux<sup>1</sup>, L. Peyras<sup>1</sup>, R. Tourment<sup>1</sup>, M. Vennetier<sup>1</sup>, P Vanloot<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Irstea, Aix-en-Provence, [gisele.bambara@irstea.fr](mailto:gisele.bambara@irstea.fr)

<sup>2</sup>Laboratoire LISA-METICA, AMU, Marseille

### **Résumé**

Plusieurs milliers de digues sont présentes dans le monde, certaines construites depuis plusieurs siècles. La rupture de ces ouvrages peut avoir des conséquences économiques et humaines dramatiques, d'autant plus traumatisantes qu'ils sont censés protéger les populations contre les inondations. Les Etats ont ainsi mis en place des lois et règlements obligeant à évaluer et contrôler la sécurité des ouvrages hydrauliques comme en France. Or, encore aujourd'hui les nombreux événements catastrophiques témoignent de l'intérêt d'améliorer leur performance et donc leur sécurité.

Des travaux de recherche antérieurs ont permis de développer des modèles d'évaluation de la performance des digues fluviales à l'aide de modèles à base de connaissances. Ces modèles ont une structure hiérarchique à trois niveaux. L'indicateur de performance vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration donnée est la sortie du modèle. Il est obtenu par agrégation de critères eux-mêmes évalués à partir d'indicateurs qui sont ainsi les entrées du modèle. Ces modèles présentent deux limites : les indicateurs ne sont pas formalisés ce qui peut créer des problèmes de répétabilité ou de reproductibilité de l'évaluation ; ces modèles traitent essentiellement de facteurs « techniques » c'est-à-dire hydrauliques, géotechniques, géométriques de l'ouvrage et très partiellement de facteurs biologiques générés par l'action d'organismes vivants. Or la végétation arborescente peut mener à des mécanismes de dégradation à court, moyen et long termes comme l'érosion interne.

L'article présente des modèles d'évaluation de la performance des digues potentiellement impactées par la végétation arborescente vis-à-vis de l'érosion interne. Ils améliorent les modèles initiaux en proposant une formalisation pour les différents indicateurs utilisés dans l'évaluation.

### **Mots Clés**

Digues fluviales ; Végétation arborescente ; systèmes à base de connaissance ; érosion interne

### **Abstract**

There are several thousand dikes in the world, some built several centuries ago. The failure of these structures can have dramatic economic and human consequences, all the more traumatic as they are supposed to protect populations against flooding. The States have thus put in place laws and regulations requiring the safety of hydraulic structures to be assessed and monitored, as in France. However, even today, the numerous catastrophic events testify to the interest of improving their performance and therefore their safety. Previous research has developed models for assessing the performance of river dykes using knowledge-based models. These models have a three-level hierarchical structure. The performance indicator for a given deterioration mechanism is the output of the model. It is obtained by aggregating criteria themselves evaluated from indicators which are thus the inputs of the model. These models have two limitations: the indicators are not formalized, which can create problems of repeatability or reproducibility of the evaluation; these models essentially deal with the "technical" factors, i.e. hydraulic, geotechnical, geometric factors of the structure and very partially the biological factors generated by the action of living organisms. However, tree vegetation can lead to short, medium and long-term degradation mechanisms such as internal erosion.

The article presents models for evaluating the performance of dikes potentially impacted by tree vegetation with respect to internal erosion. They improve the initial models by proposing formalization for the various indicators used in the evaluation.

### **Key Words**

River dikes; woody vegetation; knowledge-based system; internal erosion

## Introduction

Plusieurs milliers de digues sont présentes dans le monde, certaines construites depuis plusieurs siècles. La rupture de ces ouvrages peut avoir des conséquences économiques et humaines dramatiques, d'autant plus traumatisantes qu'ils sont censés protéger les populations contre les inondations. Les Etats ont ainsi mis en place des lois et règlements obligeant à évaluer et contrôler la sécurité des ouvrages hydrauliques comme en France. Or, encore aujourd'hui les nombreux événements catastrophiques témoignent de l'intérêt d'améliorer leur performance et donc leur sécurité.

Des travaux de recherche antérieurs ont permis de développer des modèles d'évaluation de la performance des digues fluviales à l'aide de modèles à base de connaissances [1] et [2]. Or, ces travaux antérieurs présentent des limites. Partant des travaux précédents [2], l'article présente des modèles d'évaluation de la performance des digues potentiellement impactées par la végétation arborescente. Il améliore également les modèles initiaux en proposant une formalisation pour les différents indicateurs utilisés dans l'évaluation, y compris en l'absence de végétation sur les ouvrages. Nous nous intéressons plus spécifiquement au mécanisme d'érosion interne.

Notre objectif est de proposer des modèles d'évaluation de la performance vis-à-vis de l'érosion interne au sein des digues. Ces modèles prennent en compte la possible présence d'arbres et plus particulièrement de racines dans les différentes parties de l'ouvrage (remblai, fondation, interface remblai-fondation). Ils permettent une évaluation qui représente mieux la réalité du terrain. La première partie décrit la structure des modèles existants ainsi que leurs limites. La démarche utilisée pour la formalisation des indicateurs et le développement des modèles est ensuite présentée (partie 2). Les indicateurs et les modèles d'évaluation de la performance vis-à-vis de l'érosion interne sont présentés dans la partie 3 et appliqués sur un cas d'étude dans la partie 4.

### Structure et limites des modèles existants

Des modèles pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai vis-à-vis des différents mécanismes de détérioration ont été développés par Vuillet [2] pour les digues fluviales en remblai homogène. Ces modèles ont une structure hiérarchique à trois niveaux. L'indicateur de performance vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration donnée est la sortie du modèle. Il est obtenu par agrégation de critères, eux-mêmes évalués à partir d'indicateurs qui sont ainsi les entrées du modèle. Ces derniers sont issus d'une ou plusieurs données d'entrée : observations visuelles, mesures instrumentales, ou données

issues du dossier de conception-réalisation de l'ouvrage (Figure 1).

Par exemple, pour l'évaluation de la performance vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne (EI), huit critères (C) sont nécessaires. Ils permettent d'évaluer chaque composant de l'ouvrage : le corps de digue, la fondation et l'interface corps de digue – fondation. Le corps de digue est par exemple évalué à l'aide de trois critères : C1, EI « Perméabilité du corps de digue », C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne », C3, EI « Singularités dans le corps de digue ». Ces critères sont agrégés par des opérateurs mathématiques : une moyenne pondérée (Moy-P\*) ou un minimum (MIN).

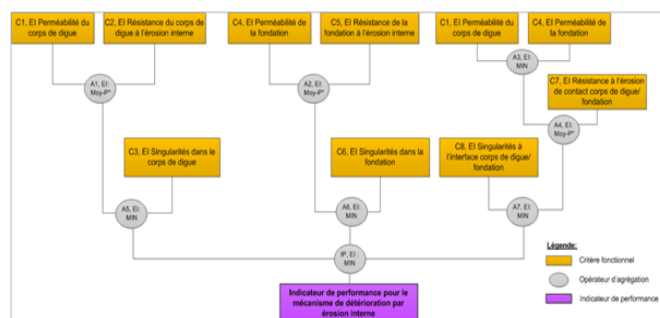


FIGURE 1 : MODELE D'EVALUATION DE LA PERFORMANCE D'UNE DIGUE FLUVIALE VIS-A-VIS DU MECANISME DE DETERIORATION PAR EROSION INTERNE (CI = CRITERE ; EI= EROSION INTERNE ; AI = AGREGATION ; MIN = MINIMUM ; MOY-P\* = MOYENNE PONDEREE ; I = INDICE)

Ces modèles présentent deux limites.

Premièrement, ils fonctionnent avec des indicateurs non formalisés. Une liste de noms d'indicateurs a été proposée [2] : fournie à l'utilisateur du modèle, elle l'aide à évaluer les critères.

L'intérêt de la formalisation des indicateurs est d'éviter les problèmes de répétabilité ou de reproductibilité de l'évaluation [3]. En effet, les indicateurs n'étant pas décrits notamment par une définition mais l'étant seulement par un nom, chacun peut donner à cet indicateur, une interprétation différente : il n'y a aucune garantie que la dimension évaluée soit la même pour chaque évaluateur. Par ailleurs si aucune échelle de notation décrivant le champ possible connu des notes pour cet indicateur, chaque évaluateur crée sa propre échelle de notation qui ne couvre que l'étendue des cas qu'il aura rencontré ou dont il aura pris connaissance.

Deuxièmement, ces modèles traitent essentiellement les facteurs « techniques » liés à l'ouvrage et ses composants (hydraulique, géotechnique, géométrique) et très partiellement les facteurs biologiques générés par l'action d'organismes vivants extérieurs. Or, une végétation arborescente très abondante peut notamment être constatée sur de nombreux ouvrages hydrauliques en remblai. Dans

certains cas, les digues de protection fluviales ont été envahies naturellement par la végétation par manque d'entretien. Cette végétation peut mener à des mécanismes de dégradation à court, moyen et long termes [4]-[7], notamment d'érosion interne. Une coupe des arbres n'est pas la solution car la présence de racines mortes peut entraîner une initiation ou une aggravation des mécanismes de dégradation. Il faut donc mettre en place des modèles d'évaluation de la performance de ces ouvrages intégrant la possible présence d'arbres.

## Démarche pour le développement des modèles

La démarche comprend cinq étapes (Figure 2):

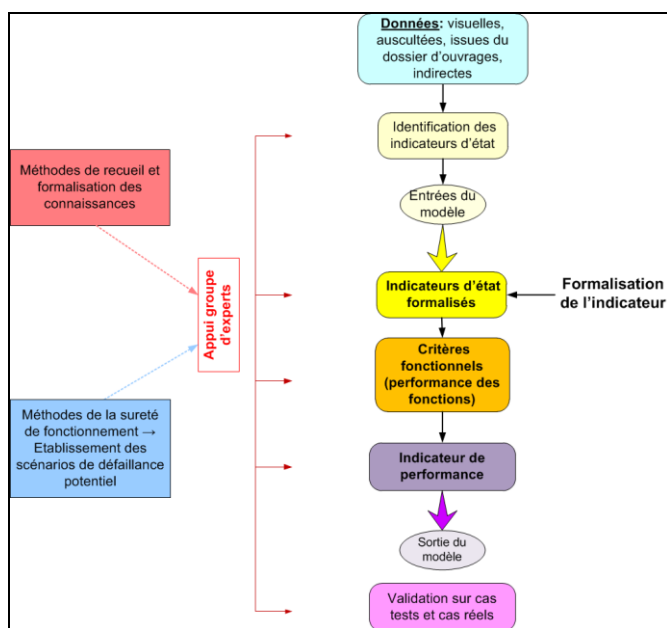


FIGURE 2 : DEMARCHE DE DEVELOPPEMENT DES MODELES

Elle débute par une identification des indicateurs spécifiques à la végétation arborescente qui n'étaient pas recensés précisément dans les travaux de Vuillet [2]. La mise en œuvre de cette démarche basée sur des méthodes de sûreté de fonctionnement (Analyse Fonctionnelle et Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) est présentée dans nos travaux portant aux barrages [9]. Les autres indicateurs relatifs aux caractéristiques « techniques » de l'ouvrage sont repris des travaux de Vuillet [2] mais certains d'entre eux sont supprimés car redondants. Les indicateurs proposés résultent d'une ou plusieurs données d'entrée, relevant d'observations visuelles, de mesures instrumentales ou de données issues du dossier de conception-réalisation de l'ouvrage, pertinentes pour un critère donné.

L'étape suivante concerne la formalisation des indicateurs sur la base d'un recueil des connaissances auprès d'un groupe de

3 experts ayant au moins 20 ans d'expérience dans le domaine du diagnostic des ouvrages hydrauliques. L'un de ces ingénieurs experts a également des compétences en foresterie et il est particulièrement impliqué depuis de nombreuses années dans les travaux de recherche menés vis-à-vis de l'impact de la végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques et des moyens de gestion associés. Les séances se déroulent sur la base d'interviews structurées : elles sont préparées au préalable par l'animateur du panel, des documents sont présentés en séance. L'animateur recueille les connaissances, les formalise et les analyse pour relever d'éventuels manques ou incohérences. En début de séance suivante, ces problèmes sont traités puis le recueil se poursuit. L'objectif de la formalisation est d'obtenir une description non ambiguë des mesures et des évaluations. Il a été montré qu'une grille en 6 champs permettait d'atteindre cet objectif [8] : nom de l'indicateur, définition, mode opératoire, échelle de mesure et références (différents états possibles de l'indicateur), caractéristiques spatiales (lieu d'échantillonnage, lieu de la mesure) et les caractéristiques temporelles (pas de temps de la mesure de l'indicateur et analyse de la tendance de cette mesure). Le mode opératoire précise le type de données utilisées par l'indicateur et le protocole utilisé pour l'évaluation de cet indicateur. Une échelle d'évaluation double, unique pour tous les indicateurs de 0 (inacceptable) à 10 (Très bon) été mise en place (cf. Tableau 1).

Une fois les indicateurs recensés et formalisés, il s'agit d'établir des structures d'agrégation adéquates permettant d'évaluer chaque critère à partir des indicateurs qui lui sont associés. Différentes structures sont proposées : opérateur minimum ou règles SI-ALORS matérialisées sous la forme de tables de vérité. Les agrégations sont mises en œuvre de manière à représenter les phénomènes évalués tel qu'elles soient le plus explicite possible et/ou de mimer pas à pas le raisonnement expert.

La démarche se conclut par des validations des modèles en salle :

- Notation collective par le groupe d'experts des indicateurs et des critères, sur des cas tests : ceux-ci sont des textes courts, théoriques mais réalistes. Il s'agit d'une vérification des formalisations et des agrégations des indicateurs pour les différents critères. Les experts évaluent chaque indicateur et l'accord entre les experts est noté. Ils analysent ensuite la note calculée par le modèle à partir de leur évaluation des indicateurs par rapport à la note qu'ils auraient affecté au critère, sans utilisation du modèle ;
- Notation individuelle des indicateurs et des critères sur des cas réels (descriptif et caractéristiques des ouvrages sont fournis) : analyse de la reproductibilité des mesures entre les experts ; validation des modèles d'évaluation de la performance.

Les critères de validation sont les suivants :

- La définition et les références sur l'échelle sont jugées pertinentes par les utilisateurs ;
- Les écarts de note pour un indicateur, sur un ouvrage donné, sont au maximum de deux points (accord entre les experts relatif aux indicateurs) ;
- L'écart entre les valeurs des critères calculées à partir des évaluations des indicateurs par différents experts est d'un point au maximum (accord entre les experts relatif aux critères) ;
- L'écart entre la note du critère déclarée par les experts et celle calculée par le modèle est au maximum d'un point (accord entre les experts après consensus et le modèle).

Cette étape de validation est très importante dans la démarche. En effet, une formalisation appropriée de chacun des indicateurs et le choix pertinent des agrégations contribuent très largement à la répétabilité et la reproductibilité des évaluations.

L'analyse est menée sur des tronçons considérés comme homogènes.

## Evaluation de la performance des digues vis-à-vis de l'érosion interne

### Indicateurs

La liste d'indicateurs établie par Vuillet [2] a été modifiée. Ces modifications concernent notamment la fusion de deux indicateurs pour n'en faire plus qu'un : par exemple, « Composition du remblai, sensibilité à l'érosion interne » et « Gradients critiques versus gradient de la crue » sont supprimés et remplacés par un seul nommé « Sensibilité du corps de digue à l'érosion interne pour la charge permanente de la crue de référence ». Des indicateurs ont par ailleurs été ajoutés, notamment, ceux liés à la végétation [9] :


- Densité des individus (arbres ou souches) ;
- Volume racinaire par individu ;
- Type de structure racinaire par individu ;
- Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu.

Vingt-sept indicateurs ont été identifiés pour l'évaluation de la performance des digues vis-à-vis de l'érosion interne. La majorité sont des indicateurs visuels, les autres sont des indicateurs de conception-réalisation ou instrumentaux.

Chacun de ces indicateurs, a été formalisé selon la grille en 6 éléments (Tableau 1). Les indicateurs sont décrits sur différentes zones de l'ouvrage : couronnement amont, couronnement aval, talus aval, pied de talus et fondation, talus et pied de digue amont. Certains indicateurs sont qualifiés de « directs » : ils permettent d'évaluer directement un critère donné comme cela sera précisé plus bas.

Le Tableau 1 donne l'exemple de l'indicateur « Géométrie du corps de digue ».

TABLEAU 1 : GRILLE DE FORMALISATION POUR L'INDICATEUR « GEOMETRIE DU CORPS DE DIGUE »

Nom	IE1.3 – Géométrie du corps de digue
<i>Définition</i>	Les caractéristiques géométriques d'une digue sont définies par sa hauteur, sa largeur de base et sa largeur de crête. Il s'agit d'un rapport largeur de base et de crête/hauteur. Selon l'ILH (Sharp et al., 2013) une digue moyenne fait environ 4 mètres en crête.
<i>Mode opératoire</i>	La détermination de la géométrie de la digue est issue des éléments du dossier de conception-réalisation ou bien par défaut, de levés topographiques lors d'une visite.
<i>Echelle et références</i>	 8-10 : géométrie large 6-7 : géométrie moyenne 2-5 : géométrie étroite
<i>Caractéristique de lieu</i>	Le profil en travers du tronçon de digue homogène analysé
<i>Caractéristique de temps</i>	Une fois à la conception ou lors d'un besoin par levé topographique

### Agrégation des indicateurs pour l'évaluation des critères

Une fois les indicateurs recensés et formalisés, il s'agit d'établir des structures d'agrégation adéquates permettant d'évaluer chaque critère à partir des indicateurs qui leur sont associés.

Nous présentons à titre d'exemple, la structure d'agrégation permettant d'obtenir C1. EI (Figure 3) ; ce critère considère la végétation arborée. Il est évalué directement à partir de la note de l'indicateur direct IE1.1 « Fuites ou indices de fuites (eau claire) » si celle-ci est considérée comme « médiocre » à « inacceptable ». Cependant, les digues n'étant pas en charge permanente il est difficile d'affirmer lors d'une visite de terrain hors période de crue qu'il n'y a pas de fuites sur l'ouvrage. L'utilisateur note alors « NR » (Non Renseigné) pour l'indicateur. Dans les deux cas (IE1.1 est évalué en période de crue comme différent de « médiocre » et « inacceptable » ou est évalué NR hors période de crue), C1. EI est évalué par des règles SI-ALORS rassemblées dans les tables de vérité TV1 à TV5 (Figure 2 et Figure 3). Ces tables sont définies pour obtenir (i) la perméabilité intrinsèque du corps de digue sans considérer la végétation, (ii) une estimation de la propension aux écoulements due à la présence de végétation et (iii) l'évaluation de C1. EI. La détermination de la propension aux écoulements est faite selon une logique phénoménologique des différents indicateurs impliqués (IE1.4, IE1.5, IE1.6, IE1.7). En effet, nous cherchons dans un premier temps à obtenir le volume racinaire global par la combinaison 1 d'IE1.4 et IE1.5. Puis nous agrégeons le résultat de cette première combinaison avec IE1.6 (combinaison 2) afin d'obtenir une première caractérisation globale des systèmes racinaires présents dans le corps de digue du tronçon analysé. Enfin, nous combinons ce résultat avec IE1.7 (combinaison 3), ce qui permet l'estimation de la propension aux écoulements dans le corps de digue affecté par la présence de végétation arborée. Cette évaluation de la propension aux écoulements due à la présence de végétation arborescente vient dégrader l'évaluation de la perméabilité intrinsèque du corps de l'ouvrage à l'aide de la table de vérité N°5 (Figure 4).

Dans le modèle, les critères (C3. EI ; C6. EI ; C8. EI – cf. Figure 1) liés aux singularités potentiellement présentes dans les différents composants de digues (corps de digue, fondation et interface corps de digue – fondation) sont déclarés à dire d’experts. Ils correspondent à la possibilité que le tronçon de digue analysé soit pourvu d’un ouvrage traversant ou bien qu’il soit affecté par des terriers d’animaux fouisseurs. Des indicateurs sont listés mais ne sont pas formalisés. Nous laissons ainsi la possibilité de faire évoluer les modèles mais considérerons pour les validations à ce stade, des digues sans ouvrage traversant ni présence de terriers. Les structures d’agrégation ont été construites pour les cinq autres critères.

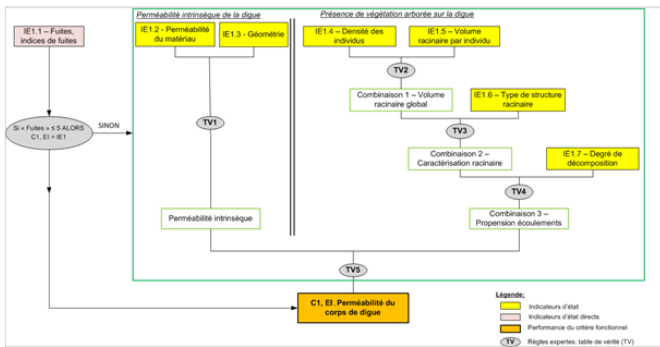


FIGURE 3 : DIAGRAMME D’AGREGATION DES INDICATEURS POUR L’EVALUATION DU CRITERE C1.EI « PERMEABILITE DU CORPS DE DIGUE »

		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 VERITE EXPERTE POUR L’AGREGATION DES INDICATEURS IE1.2 ET IE1.3 DU CRITERE C1.EI « PERMEABILITE DU CORPS DE DIGUE » - LES LIGNES GRISEES CORRESPONDENT A DES VALEURS JUGEES NON PERTINENTES OU POSSIBLES POUR L’INDICATEUR

En phase d’utilisation, les indicateurs sont évalués, les critères sont calculés à partir des indicateurs selon les structures d’agrégation ou sont déclarés. Enfin, les valeurs

des critères sont agrégés selon le modèle de Vuillet [2] (cf. Figure 1) afin d’obtenir le score de l’indicateur de performance du tronçon analysé vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.

## Application à un cas d’étude

### Présentation

Les modèles ont été appliqués in situ sur les digues du Petit Rhône en France. Nous disposons pour ces ouvrages d’un ensemble de données récentes [10] issues des études réalisées dans l’optique du renforcement et du décorsetage limité des digues. Un dossier synthétique a été élaboré et fourni aux ingénieurs sur le terrain. Trois applications ont été réalisées dans différents secteurs : Mas Marignan (rive droite), Mas de Cazeneuve (rive gauche), Bois de Beaumont (rive gauche). Les indicateurs d’état pour l’évaluation de la performance de chacun de ces tronçons ont été notés par huit ingénieurs ayant des niveaux d’expérience différents :

- Trois ingénieurs experts qui constituent notamment le comité d’expertise avec lequel nous avons développé les modèles d’évaluation ;
- Deux ingénieurs confirmés dans le domaine des systèmes experts pour l’évaluation de la performance des ouvrages ;
- Un ingénieur débutant et deux ingénieurs stagiaires.

La diversité des niveaux d’expérience des ingénieurs mobilisés nous permet de vérifier que les formalisations des indicateurs d’état établies sont correctes, c’est-à-dire que leur utilisation est reproductible par différents utilisateurs. Le cas échéant, nous veillerons à améliorer la formalisation de ces indicateurs d’état. Les futurs outils basés sur les modèles développés sont destinés aux gestionnaires d’ouvrages et bureaux d’étude chargés de l’établissement de diagnostics dans le cadre d’une étude de danger par exemple.

### Résultats obtenus sur un cas d’étude

Nous présentons ci-dessous les résultats de l’application portant sur l’évaluation de la performance du tronçon, secteur Marignan vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne. La figure 5 illustre sa localisation.

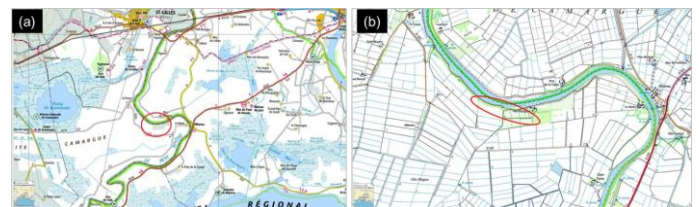


FIGURE 5 : LOCALISATION DE LA DIGUE RIVE DROITE DU PETIT RHONE, SECTEUR DU MAS MARIIGNAN : (A) LOCALISATION (CERCLE ROUGE) A L’ECHELLE DU PETIT RHONE EN AVAL DE SAINT GILLES ; (B) ZOOM SUR LA LOCALISATION DU TRONÇON DE DIGUE CHOISI.

Ce tronçon est considéré comme homogène du point de vue de ses caractéristiques géométriques, géotechniques, hydrauliques et biologiques (présence d'arbres avec densité homogène sur l'ensemble du tronçon). Les caractéristiques géométriques de ce tronçon sont reportées sur la Figure 6.

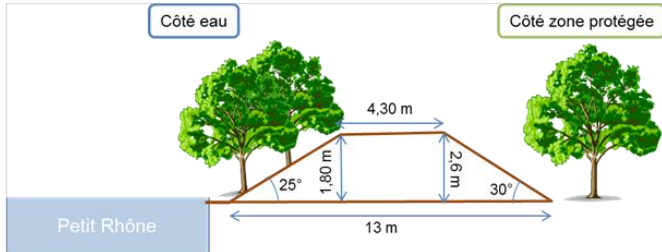


FIGURE 6 : CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES D'UN PROFIL EN TRAVERS DU TRONÇON DE DIGUE HOMOGENE EVALUEE.

Les sondages et essais géotechniques effectués en 2009 au cours de l'étude du renforcement et de décorsetage des digues du Petit Rhône (Digue rive droite du Petit Rhône entre l'écluse de Saint Gilles et le lieudit « Mas Neuf de Capette » comprenant le secteur du Mas Marignan – lot 3), permettent de connaître les caractéristiques géotechniques principales du remblai et de la fondation du tronçon à évaluer.

La végétation arborescente est principalement présente en pied de digue côté eau et côté zone protégée (Figure 7), bien que l'on retrouve quelques individus en milieu de talus côté eau. L'espèce principale est le peuplier.



FIGURE 7 : PHOTO DE LA DIGUE RIVE DROITE DU PETIT RHONE DANS LE SECTEUR DU MAS MARIGNAN, BORDE DE VEGETATION ARBORESCENTE A CHAQUE PIED DE L'OUVRAGE (PHOTO : BAMBARA G., 2015)

Chacun des ingénieurs dispose d'une fiche de notation afin d'évaluer individuellement l'ensemble des indicateurs d'état. Après discussion, les ingénieurs experts donnent une note consensuelle à chaque indicateur d'état pour l'évaluation du tronçon.

Nous présentons ci-dessous les résultats de l'évaluation consensuelle des indicateurs d'état par les ingénieurs experts pour chaque critère fonctionnel relatif aux différents composants de ce tronçon : corps de digue, fondation, interface corps de digue-fondation.

Deux critères sont à évaluer à partir des modèles d'agrégation des indicateurs d'état développés : le critère **C1, EI « Perméabilité du corps de digue »** et **C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne »**. Le critère C3, EI est évalué directement à dire d'expert.

La Figure 8 illustre les notations consensuelles des indicateurs d'état permettant l'évaluation de C1, EI, qui est calculé par le modèle à la suite des combinaisons successives. Aucune fuite (eau) ou indice de fuites (zones humides) n'est détectable. L'indicateur d'état direct IE1.1 n'est donc pas renseigné par les experts, il est noté « NR » (non renseigné) sur la fiche de notation. Les autres indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la perméabilité du corps de digue sont alors évalués.

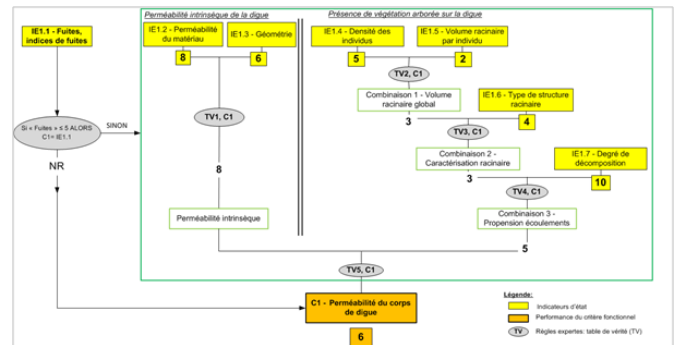


FIGURE 8 : EVALUATION PAR LE MODELE DE LA PERFORMANCE DU CRITERE FONCTIONNEL C1, EI « PERMEABILITE DU CORPS DE DIGUE » A PARTIR DES INDICATEURS D'ETAT DU TRONÇON HOMOGENE DE LA DIGUE RIVE DROITE DU PETIT RHONE, SECTEUR MARIGNAN (IE : INDICATEURS D'ETAT ; C : CRITERES FONCTIONNELS ; EI : EROSION INTERNE)

IE1.2 est évalué comme bon (score de 8). En effet, d'après les essais carottés effectués, le corps de digue est argilo-limoneux, ce qui offre une bonne perméabilité du matériau constituant le corps de digue. La géométrie de la digue est considérée comme moyenne, IE1.3 est donc évalué comme passable (score de 6). La combinaison de ces deux indicateurs d'état : IE1.2 et IE1.3 est obtenu à l'aide la table de vérité TV1. La perméabilité intrinsèque du corps de digue est alors évaluée comme bonne (score obtenu de 8).

La présence de végétation arborée sur le corps de digue est ensuite évaluée par le modèle à l'aide des indicateurs d'état spécifiques. IE1.4 a été évalué comme étant médiocre (note égale à 5) conformément aux références établies lors de sa formalisation c'est-à-dire avec présence d'un individu par 10 m<sup>2</sup>.

IE1.5 a été évalué comme mauvais (note égale à 2). En effet, comme l'illustre la Figure 9, l'arbre situé sur le profil

représentatif du tronçon de digue à un diamètre au collet bien supérieur à 30 cm qui est la limite au-dessus de laquelle, les diamètres au collet de taille supérieure entraîneront une mauvaise note.



FIGURE 9 : GROS PEUPLIER PRESENT SUR LE TRONÇON HOMOGENE EVALUE VIS-A-VIS DU MECANISME DE DETERIORATION PAR EROSION INTERNE DE LA DIGUE RIVE DROITE DU PETIT RHONE, SECTEUR MAS MARIIGNAN (PHOTO : BAMBARA G., 2015)

IE1.6 a été noté à l'aide de la clé d'aide à l'identification de la structure racinaire potentielle d'un individu (Figure 10), comme étant médiocre (note obtenue de 4) pour les arbres présents sur ce tronçon.

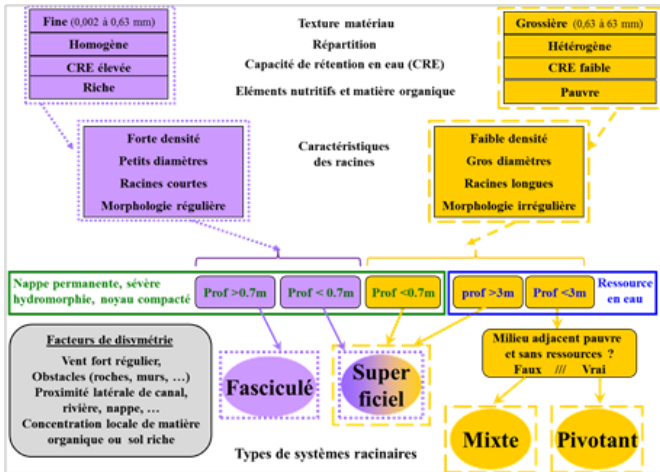


FIGURE 10 : CLE D'AIDE A L'IDENTIFICATION DE LA STRUCTURE RACINAIRE D'UN INDIVIDU (ZANETTI ET AL., 2015)

Enfin, IE1.7 a été évalué comme étant très bon (note obtenue de 10). En effet, aucune souche ou arbre mort n'a été repéré par les évaluateurs sur ce tronçon.

La propension aux écoulements due à la présence de végétation arborescente a donc été calculée par le modèle

comme étant médiocre (score obtenue de 5). La propension aux écoulements est combinée à la perméabilité intrinsèque de la digue à l'aide d'une dernière table de vérité (TV5). Cette ultime combinaison nous permet d'obtenir le résultat de **C1, EI** « **Perméabilité du corps de digue** » comme égale à 6 soit une performance passable.

L'évaluation de C2, EI est illustrée par la Figure 11.

Les indicateurs d'état direct : IE2.1 et IE2.2 n'ont pas été activés. Aucun fontis n'a été observé sur le tronçon et aucune fuite chargée n'est suspectée (rappelons que l'évaluation n'ayant pas eu lieu en période de crue ou post-crue, il est difficile de juger de cet indicateur. Contrairement à l'indicateur IE2.1 qui est évalué comme très bon (note de 10), l'indicateur IE2.2 n'est pas évalué et est noté « Non Renseigné (NR) ».

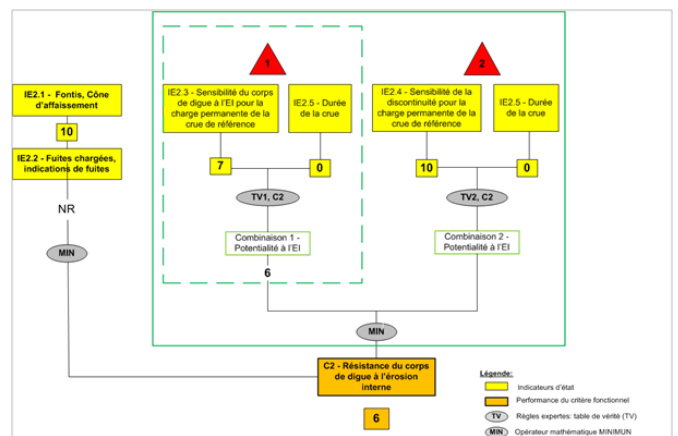


FIGURE 11 : EVALUATION PAR LE MODELE DE LA PERFORMANCE DU CRITERE FONCTIONNEL C2, EI

« RESISTANCE DU CORPS DE DIGUE A L'EROSION INTERNE » A PARTIR DES INDICATEURS D'ETAT DU TRONÇON HOMOGENE DE LA DIGUE RIVE DROITE DU PETIT RHONE, SECTEUR MARIIGNAN (IE : INDICATEURS D'ETAT ; C : CRITERES FONCTIONNELS ; EI : EROSION INTERNE)

Sur le tronçon de digue évalué, aucune discontinuité remblai-remblai due à un rehaussement de l'ouvrage ou au comblement d'une brèche n'est présente. Ainsi, seule la combinaison des indicateurs d'état IE2.3 et IE2.5 permet d'obtenir la potentialité d'érosion interne (soit le cas 1 sur la Figure 11) et ainsi le résultat de **C2, EI** qui est évalué par le modèle comme passable (score obtenu de 6) (cf. Figure 11). Notons que IE2.5 a été noté comme inacceptable (0) par les experts sachant que la crue la plus défavorable est estimée longue au regard de la taille et de la perméabilité de l'ouvrage.

Le critère fonctionnel **C3, EI** « **Singularité dans le corps de digue** » est évalué directement à dire d'expert. Sur ce tronçon, aucun ouvrage traversant, ni terrier dû à des animaux fouisseurs n'est présent ; les experts évaluent donc la performance de ce critère comme très bonne (note de 10).

La même démarche est réalisée pour l'évaluation de la fondation et de l'interface corps de digue-fondation.

In fine, pour évaluer la performance du tronçon de digue nous utilisons le modèle développé par Vuillet [2] qui permet selon une logique fonctionnelle d'agrèger les critères fonctionnels relatifs à chaque composant. La Figure 12 illustre les résultats des évaluations de l'ensemble des critères fonctionnels à partir des indicateurs d'état correspondants, les résultats des agrégations faites au sein de ce modèle, ainsi que le résultat final correspondant à la performance du tronçon vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.

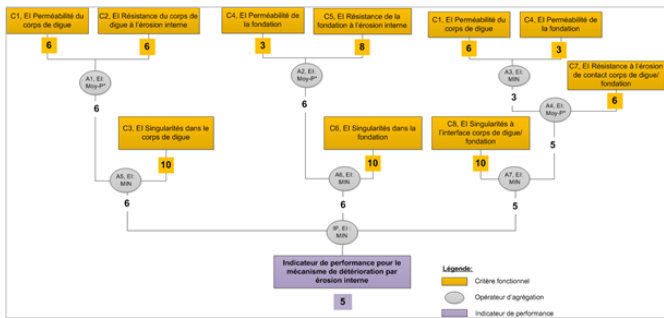


FIGURE 12 : EVALUATION PAR LE MODELE DE LA PERFORMANCE VIS-A-VIS DE L'EROSION INTERNE DU TRONÇON HOMOGENE DE LA DIGUE RIVE DROITE DU PETIT RHONE, SECTEUR MAS DE MARIGNAN A PARTIR DE LA PERFORMANCE DES CRITERES FONCTIONNELS (C : CRITERES FONCTIONNELS ; EI : EROSION INTERNE, IP : INDICATEUR DE PERFORMANCE, MIN : MINIMUM, MOY.P\* : MOYENNE PONDEREE [MOY (1/3) C<sub>i</sub>, EI ; (2/3) C<sub>j</sub>, EI])

Suite aux agrégations (A5, EI ; A6, EI ; A7, EI), nous obtenons la performance de chaque composant du tronçon de digue, soit respectivement les scores de 6 (passable) pour le corps de digue, 6 (passable) pour la fondation et 5 (médiocre) pour l'interface corps de digue-fondation. Ainsi, nous pouvons cibler les composants pour lesquels il est nécessaire de prévoir une surveillance renforcée ou d'éventuels travaux. L'indicateur de performance de ce tronçon vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne obtient finalement un score médiocre de 5 (cf. Figure 12).

La végétation arborescente influence les résultats de **C1, EI** et **C4, EI** qui passent respectivement de 6 à 8 et de 3 à 5 avec et sans prise en compte de la végétation arborescente. La Figure 13 présente ces résultats et la note de la performance du tronçon de digue sans prise **en compte de la végétation arborescente**. Ce résultat montre dans ce cas, que la performance du tronçon de digue vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne est passable (score obtenue par le modèle de 6).

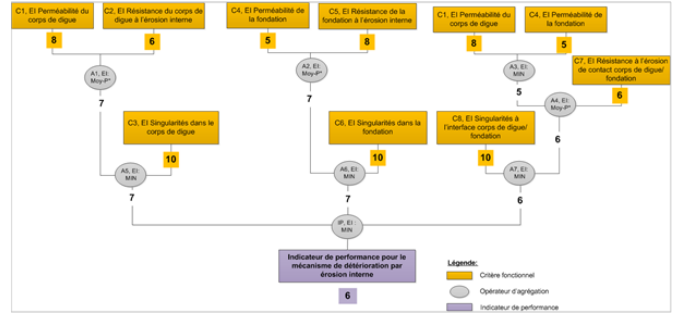


FIGURE 13 : EVALUATION PAR LE MODELE DE LA PERFORMANCE VIS-A-VIS DE L'EROSION INTERNE DU TRONÇON HOMOGENE DE LA DIGUE RIVE DROITE DU PETIT RHONE, SECTEUR MAS DE MARIGNAN A PARTIR DE LA PERFORMANCE DES CRITERES FONCTIONNELS SANS PRENDRE EN COMPTE LA PRESENCE DE LA VEGETATION ARBORESCENTE (C : CRITERES FONCTIONNELS ; EI : EROSION INTERNE, IP : INDICATEUR DE PERFORMANCE, MIN : MINIMUM, MOY.P\* : MOYENNE PONDEREE [MOY (1/3) C<sub>i</sub>, EI ; (2/3) C<sub>j</sub>, EI])

Sur cet exemple, la prise en compte de la végétation arborescente dans le modèle d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai à charge temporaire vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne dégrade de manière non négligeable les critères C1, EI et C4, EI (dégradation de deux unités pour chacun des deux critères). Au final, elle dégrade d'une unité avec un changement de catégorie (passage de médiocre à passable), la performance du tronçon évalué. En effet, même si C1, EI passe d'une catégorie passable à bonne sans prise en compte de la végétation et C4, EI d'une catégorie mauvaise à médiocre, les critères C2, EI (passable), C5, EI (bon) et C7, EI (passable), relatifs à la résistance à l'érosion du composant considéré, contrebalancent l'effet dégradant de la présence de végétation sur la performance des composants et in fine du tronçon. Cet effet de la présence de végétation est atténué par le fait que les combinaisons des critères {C1, EI ; C2, EI}, {C4, EI ; C5, EI} et {MIN de C1, EI/C4, EI ; C7, EI} sont effectuées avec une moyenne pondérée qui donne plus de poids aux critères relevant de la résistance à l'érosion (C2, EI ; C5, EI et C7, EI).

La performance vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne du tronçon évalué obtenue avec l'utilisation du modèle est cohérente avec l'avis des experts.

## Conclusion

Cet article a présenté des améliorations à des modèles d'évaluation de la performance des digues vis-à-vis de l'érosion interne. Deux apports principaux ont été réalisés. Premièrement, l'identification de 4 indicateurs spécifiques à la végétation puis la formalisation de 27 indicateurs nécessaires pour l'évaluation. Deuxièmement, le développement de 5 modèles d'agrégation des indicateurs pour l'évaluation des critères. Ces critères sont calculés à



partir de 3 à 7 indicateurs. Différentes formes d'agrégation des indicateurs ont été utilisées pour agréger les indicateurs : des règles expertes SI...ALORS résumés sous la forme de table de vérité et l'opérateur MIN. L'intérêt principal des formalisations est de cadrer les mesures au travers d'une échelle de mesure définie précisément et validée : ceci renforce les aspects de fiabilité de la mesure. Par ailleurs, les modèles décrits suivent une logique phénoménologique et sont donc facilement compréhensibles.

*phase 2, phase 3, phase 4, phase 5* (No. 009-24979-Ph2). SYMADREM.

Un ensemble de validations conduit sur des cas théoriques mais réalistes puis réels ont permis d'affiner les formalisations. Ces travaux ont été appliqués sur des exemples réels par une notation in situ et ont montré leur intérêt notamment pour ce qui est de la prise en compte de la végétation.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la région SUD, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et le SYMADREM.

## Références

- [1] Serre D., Peyras L., Curt C., Boissier D., Diab Y. (2007). *Evaluation des ouvrages hydrauliques de génie civil*. Canadian Geotechnical Review Vol. 44, pp.1298-1313.
- [2] Vuillet M., (2012). *Élaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales* (Génie Urbain). Université PARIS-EST. Ecole doctorale "Ville, Transports et Territoires," Paris.
- [3] Curt C., Peyras L., Boissier D., (2010). *A Knowledge Formalization and Aggregation-Based Method for the Assessment of Dam Performance*. Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng. VOL 25, pp. 171–183.
- [4] FEMA, (2005). *Technical Manual for Dam Owners: Impacts of Plants on Earthen Dams*. Federal Emergency Management Agency, Us Department of Homeland Security.
- [5] Laasonen, J., (2013). *Risk of the trees and the stumps to the embankment dam safety. Experimental study*. Presented at the IECS2013, 9th ICOLD European Club Symposium, Venice, Italy.
- [6] Martinez Santamaria, J.M., Fernandez Serrano, R., (2010). *Geotechnical impact on small earth dams caused by vegetation growth as a result of inadequate maintenance activity*. In: Dam Maintenance and Rehabilitation II. p. 1162.
- [7] Mériaux P., Vennetier M., Aigouy S., Hoonakker M., Zylberblat M., (2006). *Diagnosis and management of plant growth on embankment dams and dykes*. Presented at the Vingt-deuxième Congrès des Grands Barrages, Barcelone, pp. 1–20.
- [8] Curt C., Trystram G., Hossenlopp J., (2001). *Formalization of at-line human evaluations to monitors product changes during processing. Integration of human decision in the dry sausage ripening process*. Sci Aliments. pp. 663-681
- [9] Bambara G., Curt C., Mériaux P., Vennetier M., Vanloot P. (2018) *Modular assessment of the performance of embankment dams*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol (22) issue 3, pp: 315-337, DOI: 10.1080/19648189.2016.1194322
- [10] Terrasol, Hydratec (2010). *Plan Rhône \_ Pré-schéma Sud : Etude du renforcement et décorsetage limité des digues du Petit Rhône. Etudes préliminaires et d'avant projets Lot 2 : Rive gauche du Petit Rhône du lieu-dit « Mas des Canards » au lieu-dit « Les Roussettes » : phase 1,*