

---

# Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de la végétation arborescente : proposition d'une approche modulaire

Gisèle Bambara<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup> IRSTEA, UR Ouvrage hydrauliques et hydrologie, 3275 route de Cézanne, 13182 Aix-en-Provence cedex 5, France ([gisele.bambara@irstea.fr](mailto:gisele.bambara@irstea.fr))

<sup>2</sup> Aix Marseille Université, LISA, EA4672, Equipe METICA, 13397 Marseille cedex 20, France

<sup>3</sup> Aix-Marseille Université, école doctorale E251, CEREGE Europôle de l'Arbois – BP 8013545 Aix en Provence Cedex 4, France

---

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

---

*RÉSUMÉ. La végétation arborée est souvent présente sur les ouvrages hydrauliques en remblai. Or, le développement racinaire de cette végétation met en péril les ouvrages car il est susceptible de contribuer à un mécanisme d'érosion interne lors de la décomposition des racines ligneuses. Curt (2008) a développé des modèles pour l'évaluation de la performance des barrages en remblai équipés de drains et d'instruments d'auscultation. Ces modèles sont basés sur les systèmes à base de connaissances. Ils comportent trois niveaux hiérarchiques : la performance du composant analysé, la performance des fonctions et les indicateurs d'état. Cependant, ce modèle ne prend que partiellement en compte la présence de végétation arborée. De plus, les petits barrages ne sont pas toujours équipés de drains et d'instruments d'auscultation. Nous avons donc proposé une approche modulaire afin de pouvoir évaluer différents types de barrages. Notre étude s'attache donc d'une part, à identifier les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente et d'autre part à adapter et compléter les modèles d'évaluation en place. La démarche a été appliquée sur un groupe de 7 barrages français et italiens et a montré sa pertinence.*

*ABSTRACT. Woody vegetation is often present on the embankment hydraulic works. However, the root development of this vegetation threatens works because it is likely to contribute to an internal erosion mechanism during the woody roots decomposition. Curt (2008) developed models for assessing the performance of embankment dams equipped with drains and instruments for auscultation. These models are based on knowledge-based systems. They have three hierarchical levels: performance of the analysed component, the performance of the functions and status indicators. However, this model only partially takes into account the presence of woody vegetation. In addition, the small dams are rarely equipped with drains and instruments for auscultation. We proposed a modular approach in order to evaluate different types of dam. Our study focuses firstly, on identifying the specific status indicators of woody vegetation and secondly, adapting and completing the assessment models in place. The approach was applied to a group of 7 French and Italian dams and showed its relevance.*

*MOTS-CLÉS : ouvrages hydrauliques, barrages, végétation ligneuses, performance, système à base de connaissance.*

*KEY WORDS: hydraulic works, dams, woody vegetation, performance, knowledge-based system.*

---

## 1. Introduction

La France compte un parc d'ouvrages hydrauliques en remblai très important : près de 10 000 km de digues de protection contre les inondations, environ 5000 km de digues de canaux et plusieurs milliers de petits barrages [MER 05 ; DAL 05]. Le rôle de ces ouvrages de génie civil est essentiel. Les ouvrages hydrauliques à charge permanente (digues de canaux et barrages) peuvent remplir plusieurs fonctions (irrigation des cultures, stockage pour la distribution d'eau potable ...). Les ouvrages hydrauliques à charge temporaire (digues fluviales de protection contre les inondations, barrages écrêteur) permettent de protéger la population et ses biens en cas de crue. Cependant, leur rupture peut avoir des conséquences économiques et humaines dramatiques, ce qui oblige les gestionnaires de ces ouvrages à prendre en compte et à remédier à l'ensemble des scénarios de rupture possibles. Parmi les mécanismes de détérioration des ouvrages hydrauliques en remblai, l'érosion interne est l'une des causes majeures de rupture [FOS 00]. Elle est provoquée par l'existence de fuites non contrôlées qui entraînent les particules constitutives de l'ouvrage suite à leur arrachement. Quatre mécanismes sont distingués : l'érosion interne de conduit, régressive, de contact et par suffusion [DER 14]. Ces mécanismes peuvent avoir différentes origines : le vieillissement des ouvrages, une mauvaise conception/réalisation, un entretien défectueux, etc. Ainsi, quatre facteurs principaux peuvent influencer l'apparition d'un mécanisme de détérioration par érosion interne : la géométrie de l'ouvrage, ses caractéristiques géotechniques, l'hydraulique et son environnement « biologique » (type de végétation, degré de décomposition, présence de terriers d'animaux fouisseurs...). 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], notamment l'érosion interne du fait du développement racinaire de cette végétation. Ce phénomène peut toucher le remblai de l'ouvrage comme ses fondations. Ainsi, à la mort de l'arbre, la décomposition de son système racinaire favorise, selon la nature du sol soit la création de conduits à travers l'ouvrage susceptible d'initier une érosion interne de conduit, soit l'augmentation de la perméabilité globale dans la zone de remblai concernée, par la décomposition d'un volume racinaire important. Les travaux engagés dans cette thèse ont pour objectif de développer des méthodes et outils permettant aux gestionnaires d'ouvrages hydrauliques d'évaluer les ouvrages ; cette évaluation est la base pour prendre des décisions efficaces afin de réaliser les travaux de maintenance et réparation nécessaires à la sécurité de leurs ouvrages. Des travaux de recherche antérieurs ont permis de développer des méthodes d'évaluation de la performance des digues fluviales et des barrages à l'aide de modèles à base de connaissances [CURT 08 ; SER 05 ; VUI 12]. Or le facteur de fragilité lié à la présence de végétation arborescente n'avait été pris en compte que très partiellement dans les précédents modèles. Nous nous plaçons donc dans la suite de ces travaux et nous nous attachons à évaluer la performance des ouvrages hydrauliques, barrages et digues fluviales, vis-à-vis des deux mécanismes de détérioration : érosion interne et érosion externe, potentiellement initiés par la présence d'une végétation arborescente. Bien que les deux types de systèmes : digues [BAM 14] et barrages, et les deux types de mécanismes de détérioration aient été traités dans la thèse, nous nous intéressons plus particulièrement dans cet article à l'évaluation de la performance des barrages collinaires. Ceux-ci présentent deux caractéristiques : ils peuvent être soumis au développement d'une végétation arborescente indésirable ; ils ne présentent pas toujours de dispositifs de drainage, ni d'instruments d'auscultation à la différence des barrages traités dans les travaux de Curt [CUR 08] qui possédaient forcément ces équipements. Ces caractéristiques nous permettent de faire deux avancées importantes : i) proposer un modèle d'évaluation de la performance des barrages vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne en tenant compte de la présence de la végétation arborescente et ce pour les différents types de mécanisme d'érosion interne (érosion interne de conduit, régressive, de contact, par suffusion) ; ii) proposer une évaluation modulaire en fonction du type de barrage rencontré (dispositifs d'étanchéité / de drainage / présence ou absence d'auscultation) : barrage en remblai sans drains ni instruments d'auscultation, barrage en remblai avec drains mais sans instruments d'auscultation, barrage en remblai avec un masque amont étanche en béton conventionnel non drainé et non ausculté... Ce travail a eu pour support le projet Alcotra RISBA (RISque des BArrages). Les ouvrages étudiés sont donc plus particulièrement situés dans la zone frontalière franco-italienne.

## 2. Démarche méthodologique

Les données impliquées dans l'évaluation d'un barrage sont élevées (géométrique, géotechnique, hydraulique et biologique) et de diverses natures (données auscultées, observations visuelles...). Le mécanisme d'érosion interne est complexe car il implique plusieurs composants et est régi par des dynamiques différentes. Les modèles proposés doivent intégrer ces deux contraintes. Ils concernent le remblai, les fondations et l'interface remblai-fondation. L'approche de modélisation retenue est un système à base de connaissances [AKE 09 ; BOO 04] car elle répond bien aux contraintes du système : possibilité d'utiliser des observations visuelles, de combiner des

données de nature différente telles que des données de construction, des mesures d'auscultation et des observations visuelles... Ce type d'approche a aussi pour avantage de produire des modèles aisément compréhensibles par les ingénieurs et techniciens. Nous prenons pour base les travaux de Curt [CUR 08] qui ont consisté à développer des modèles à base de connaissances pour l'évaluation de la performance des barrages.

Nous conservons la structure hiérarchique à trois niveaux des modèles précédemment proposés [CUR 08]: i) **les indicateurs d'état** qui sont les entrées du modèle, ii) **les fonctions** (par exemple la fonction d' « étanchéité ») dont la performance est calculée par une combinaison des valeurs des indicateurs d'état et iii) **la performance du composant** (par exemple le remblai) vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne calculée à partir d'une combinaison de la performance des fonctions. Les deux types de combinaisons sont réalisés soit à l'aide de règles SI-ALORS résumées sous la forme de tables de vérité expertes, soit par l'opérateur mathématique MIN. Les **indicateurs d'état** sont des données formalisées. Différentes données sont utilisables par l'ingénieur pour réaliser une évaluation : données d'auscultation si le barrage dispose d'instruments, observations visuelles, données de conception ou de réalisation et données issues de calcul (gradient admissible par exemple). Il est important de les formaliser afin, d'une part, d'obtenir des mesures robustes c'est-à-dire répétables et reproductibles et, d'autre part, de pouvoir les utiliser en combinaison. Une grille de formalisation est alors utilisée. Elle repose sur 5 champs : nom de l'indicateur d'état, définition, échelle de mesure et références associées qui sont les points d'ancrage sur l'échelle et permettent de décrire les différents états possibles de l'indicateur, caractéristiques spatiales spécifiant la partie du barrage à analyser et les caractéristiques temporelles indiquant le pas de temps pour la mesure de l'indicateur et l'analyse de la tendance de cette mesure [CUR 08]. Nous proposons d'utiliser pour tous les indicateurs une échelle d'évaluation double : échelle ordinale qui se caractérise par l'ordonnement des catégories en fonction d'un critère d'intensité couplée à une échelle d'intervalles qui permet de travailler sur des grandeurs numériques continues (figure 1).

Inacceptable	Mauvais			Médiocre	Passable		Bon	Excellent		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Figure 1. Echelle d'évaluation double retenue pour l'évaluation de la performance des barrages

Nous utilisons ces éléments pour la construction de notre modèle. Cependant, les modèles développés par [CUR 08] concernent l'évaluation de la performance des barrages homogènes équipés de drains et d'instruments d'auscultation. Or, les barrages collinaires de petites dimensions que nous souhaitons évaluer n'en sont pas toujours équipés. Ainsi, les modèles initiaux ont dû être modifiés afin de tenir compte de cette particularité et afin d'intégrer les indicateurs d'analyse de la végétation. L'approche d'obtention de ces nouveaux modèles est basée d'une part, sur les méthodes de la sûreté de fonctionnement (Analyse Fonctionnelle – AF – et Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets – AMDE) en nous focalisant sur l'élément extérieur « végétation arborescente » et d'autre part, sur des séances de recueil et de focalisation des connaissances auprès d'un groupe de trois ingénieurs reconnus experts en génie civil des barrages sur la base de leur savoir et savoir-faire qui caractérisent l'expertise [ZWI 95]. L'un de ces ingénieurs experts ayant également des compétences en foresterie est particulièrement impliqué depuis de nombreuses années dans les travaux de recherche menés sur l'impact de la végétation arborescente sur les ouvrages hydrauliques et des moyens de gestion associés. L'AF et l'AMDE ont permis d'identifier des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborée qui ont été validés puis formalisés par le groupe d'experts. Or, l'évaluation de certains indicateurs est difficile s'il n'existe pas de méthodes instrumentales connues et si l'observation visuelle est impossible, comme c'est le cas de l'indicateur d'état « Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu<sup>1</sup> ». Ainsi, une mesure indirecte a été développée et une formalisation proposée pour cet indicateur. Les modèles d'évaluation sont ensuite adaptés au cours de séance d'expertise. Des calibrations et validations sur des cas simplifiés permettent dans un premier temps de valider la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état. Les experts sont sollicités afin de noter individuellement puis par consensus chacun des indicateurs d'état. Dans un second temps des applications sur cas réels sont mises en œuvre.

### 3. Identification et formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente

5 indicateurs d'état spécifiques ont été identifiés comme nécessaires pour l'évaluation de la performance des barrages collinaires vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente. 4 sont impliqués dans l'évaluation des fonctions d'étanchéité (« densité des individus »

<sup>1</sup> Nous nommons indistinctement par le terme « individu » les arbres vivants et les souches mortes.

(D I), « volume racinaire par individu » (VR I), « type de structure racinaire des individus » (TSR I) et « degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu » (DD I) et un dans l'évaluation de la fonction de drainage (« Etat visuel de l'environnement de l'exutoire du tapis drainant » (EV TD)). EV TD est apprécié par la D I présents à l'exutoire du tapis drainant. Il a donc les mêmes références que l'indicateur « D I ». 3 de ces indicateurs sont évalués visuellement : « D I », « VR I » et « EV TD ». L'indicateur « TSR I » est évalué en utilisant une clé d'identification. Le dernier indicateur « DD I » est issu d'une interprétation d'une mesure chimique indirecte.

La D I présents sur l'ouvrage analysé témoigne indirectement de l'emprise des racines dans le remblai ou à ses abords. L'indicateur d'état « D I » est donc le premier indicateur à prendre en compte par l'ingénieur. Si aucun individu n'est présent sur l'ouvrage (note 10), il sera inutile de s'intéresser aux autres indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente. Nous présentons sur le tableau 1, la grille de formalisation pour évaluer l'indicateur « D I » avec l'échelle de notation de la figure 1.

**Tableau 1.** Grille de formalisation pour l'indicateur d'état « D I »

Nom	IE – Densité des individus
Définition	Plus la densité des individus est élevée, plus des hétérogénéités de perméabilité dans le remblai peuvent apparaître, notamment lors de la décomposition des systèmes racinaires. On regarde prioritairement les gros arbres pour cet indicateur.
Mode opératoire	La mesure de cet indicateur s'effectue sur le terrain en relevant (pour chaque profil analysé) le nombre d'individus présent sur 10 m <sup>2</sup> .
Echelle et références	10 : absence d'individus 5-4 : présence d'un individu par 10 m <sup>2</sup> 3-2 : présence de 2 à 5 individus par 10 m <sup>2</sup> 1-0 Présence > 5 individus par 10 m <sup>2</sup>
Caractéristiques de lieu	Choix du / des profil (s) du barrage analysé : 1 profil représentatif de l'ensemble de l'ouvrage vis-à-vis de la densité des individus et, si nécessaire, 1 second profil présentant une densité de végétation plus défavorable.
Caractéristiques de temps	Evaluation réalisée lors d'une inspection visuelle axée sur la qualification de la végétation présente sur l'ouvrage.

Sachant que les systèmes racinaires croissent avec l'âge de l'arbre, un individu dont la souche possède un diamètre important laisse supposer un VR I important. Ainsi, l'indicateur « VR I » permet de transposer la mesure du diamètre de la souche de l'arbre sous la forme d'un VR I. Ce paramètre est important à connaître afin de prévoir les conséquences en termes d'augmentation globale de la perméabilité du remblai lors de la décomposition du système racinaire.

Le « TSR I » permet de disposer d'une caractérisation racinaire globale au droit du profil analysé. En effet, les différents TSR I peuvent être plus ou moins préjudiciables lors de la décomposition des racines ligneuses vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Ainsi, un TSR I doté de longues racines horizontales pouvant potentiellement traverser le remblai de l'aval vers l'amont pour y chercher de l'eau sera particulièrement problématique. La décomposition de ce type de racines créera vraisemblablement un conduit à travers le remblai (selon le type de matériau). Cet indicateur d'état est évalué à l'aide d'une clef d'aide à l'identification à partir les différents paramètres influençant la structure du système racinaire (type de sol, accès à l'eau...) [ZAN 14].

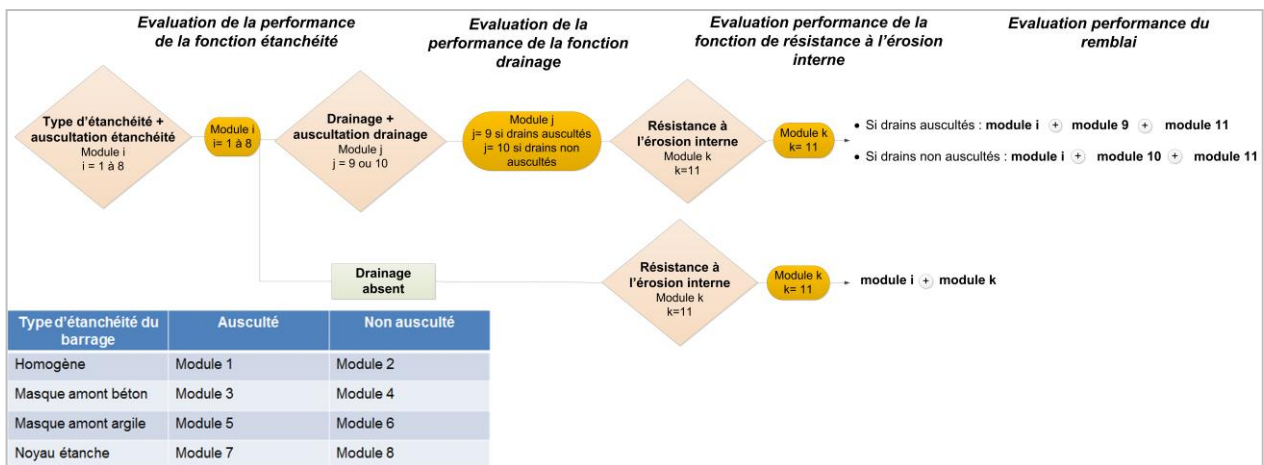
L'indicateur d'état « DD I » ne peut pas être obtenu à partir d'une information directement accessible. Une méthodologie permettant l'accès à cette information a donc été mise au point [BAM 15]. Des dispositifs expérimentaux composés d'échantillons de racines issus d'arbres fraîchement coupés, de différents diamètres et espèces ont été installés sur des ouvrages hydrauliques en remblai « tests » situés dans différentes zones géographiques françaises. Une partie des échantillons est récoltée environ tous les deux ans afin de suivre l'évolution de leur décomposition par analyse chimique au cours du temps.

#### 4. Adaptation des modèles d'évaluation de la performance vis-à-vis des barrages collinaires

L'originalité de notre travail réside dans la capacité d'adaptation des modèles d'évaluation de la performance vis-à-vis des différents cas qu'il est possible de rencontrer, différentes combinaisons étanchéité / drainage /

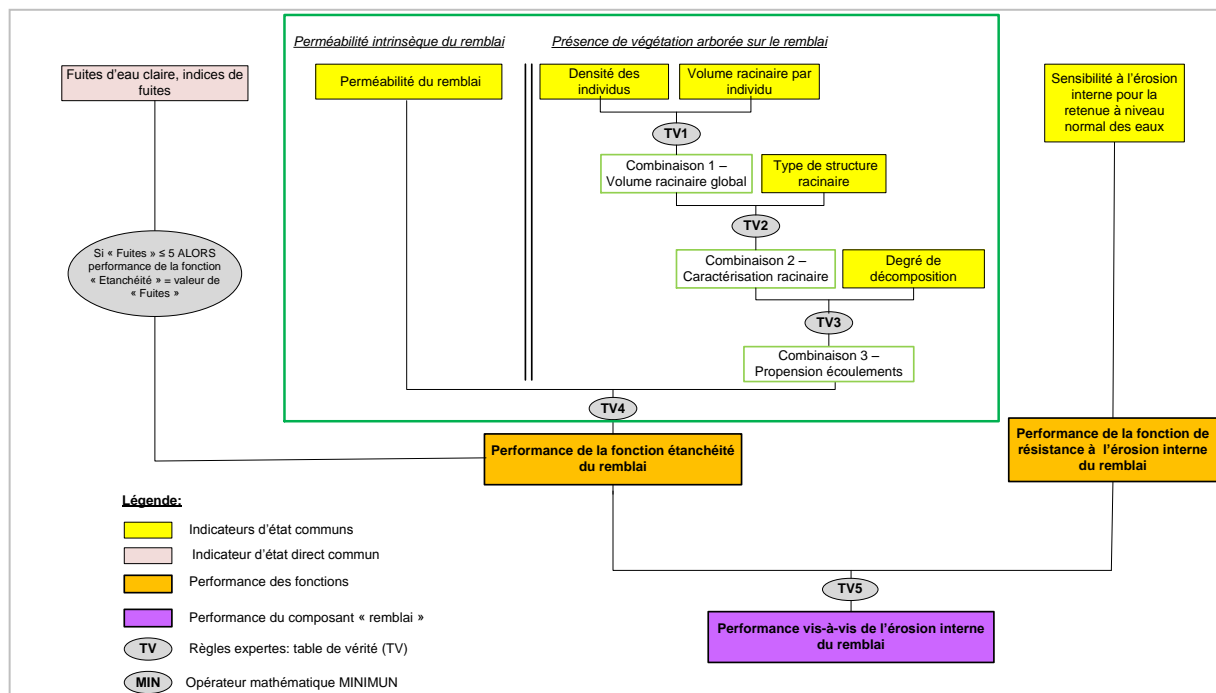
instruments d’auscultation étant possibles même si non-conformes aux règles de l’art. Dans notre étude nous en avons étudié 4 types : barrages en remblai homogènes, avec masque amont en béton, avec masque étanche en argile, zonés (noyau étanche). Nous proposons ainsi une modélisation sous la forme de modules qu’il est possible d’assembler pour s’adapter au barrage étudié. Chacun de ces modules correspond à un cas précis, combinaison d’un dispositif technique (dispositifs d’étanchéité et de drainage) et d’instruments d’auscultation (présence / absence de piézomètres et de relevés de débit de drainage). Ainsi nous conservons les modules initiaux et développons au total 31 modules dont 11 modules pour l’évaluation de la performance du remblai, 11 modules pour la fondation et 9 modules pour l’interface remblai-fondation. Par exemple, pour l’évaluation du remblai nous disposons de 4 modules d’étanchéité du remblai sans auscultation (un par type d’étanchéité soit masque en argile...), 4 modules d’étanchéité du remblai avec auscultation, 2 modules de drainage (si celui-ci est drainé) l’un pour le cas où il n’y a pas d’auscultation des drains, l’autre pour le cas où il y a des instruments d’auscultation. Enfin, 1 module pour la résistance du remblai vis-à-vis de l’érosion interne (figure 2). Les modules d’étanchéité et de drainage prennent en compte l’aspect végétation. La partie « Présence de végétation arborée sur le remblai » est commune à tous les modules 1-8. L’ingénieur utilise le module qui correspond au barrage à évaluer selon un arbre de décision.

La figure 2 présente l’arbre de décision correspondant à l’évaluation du composant « remblai » – nous visons une automatisation de ce processus actuellement manuel.



**Figure 2.** Représentation des différents modules nécessaires à l’évaluation de la performance du remblai vis-à-vis du mécanisme d’érosion interne selon le type de barrage analysé

La modélisation par combinaison de modules est présentée sur la Figure 3 pour un barrage homogène, non drainé et sans instrument (module 1 combiné au module 11). Le nombre d’indicateurs d’état varie en fonction du type d’étanchéité à évaluer. L’évaluation de la performance de la fonction « étanchéité » du remblai est directement obtenue à l’aide de l’indicateur d’état direct « Fuites ou indices de fuites d’eau claire » si ce dernier est activé (note inférieure ou égale à 5). Dans le cas contraire, elle implique les indicateurs d’état relatifs à la perméabilité intrinsèque du remblai et ceux spécifiques à la végétation arborescente. Les indicateurs d’état spécifiques à la végétation arborescente sont agrégés selon une logique fonctionnelle. Leurs combinaisons successives permettent d’obtenir la propension aux écoulements au sein du remblai qui est agrégée avec l’indicateur « perméabilité du remblai » relatif à la perméabilité intrinsèque. On évalue parallèlement la performance de la fonction « de résistance à l’érosion interne » du remblai grâce à l’indicateur d’état « Sensibilité à l’érosion interne ». Au final, on combine les valeurs des performances des fonctions « d’étanchéité » et de « résistance à l’érosion interne ». Seule la composante « Perméabilité intrinsèque du remblai » varie lorsque l’on passe d’un type d’étanchéité à l’autre, les autres indicateurs et les règles d’agrégation sont conservés.



**Figure 3.** Modèle d'évaluation de la performance du remblai d'un barrage homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente (cas d'un barrage non équipé de drains ni d'instruments d'auscultation)

L'évaluation est réalisée sur un profil choisi par l'évaluateur comme représentatif vis-à-vis de la végétation arborescente et le cas échéant, sur d'autres profils a priori plus défavorables vis-à-vis de la densité de végétation ou présentant un point singulier (géométrie plus défavorable, ouvrage traversant). Ces résultats permettent d'orienter le gestionnaire vers un diagnostic plus détaillé qui pourra être sectorisé sur les profils les plus défavorables. Une seule personne est nécessaire pour mener l'évaluation.

## 5. Application: évaluation du barrage de Grengia (Italie)

La performance de 3 barrages italiens et 4 barrages français a été évaluée en utilisant les modèles développés. La suite est consacrée à la présentation des résultats obtenus sur le barrage italien de Grengia qui correspond en termes de modules à l'exemple de la Figure 3. L'ensemble des indicateurs d'état nécessaires pour l'évaluation de la performance vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne a été noté par trois ingénieurs experts en barrages (1 ingénieur français et 2 ingénieurs italiens) tout d'abord de manière individuelle puis collectivement. Les performances des fonctions et la performance du composant analysé ont été calculées en utilisant le modèle. En parallèle, les ingénieurs ont établi une note globale sans utilisation du modèle, ce qui permet de vérifier sa concordance avec l'opinion des experts.

### 5.1. Description du barrage

Le barrage de Grengia, construit en 1971, est situé à une altitude d'environ 480 mètres. Ce barrage en remblai est de type homogène réalisé en remblai-déblai. Il ne possède aucun système de drainage. Il a une hauteur d'environ 10 mètres pour une capacité maximale avoisinant les 30 000 m<sup>3</sup>. Les instruments d'auscultation (piézomètres et de bornes topographiques) n'étant pas relevés, nous considérons ce barrage comme non équipé. 2 sondages carottés, ainsi que 2 essais pénétrométriques SPT réalisés en 2012 ont permis de connaître respectivement la constitution stratigraphique du remblai ainsi que ses principales caractéristiques géotechniques. Une végétation arborescente, constituée de différentes essences matures et de souches coupées en 2004, est présente sur le couronnement aval de l'ouvrage.

### 5.2. Choix du profil et évaluation des indicateurs d'état

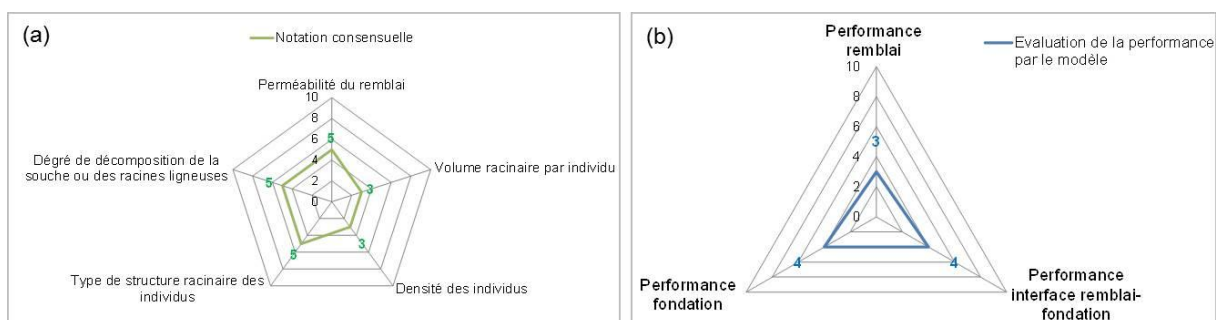
Après avoir pris connaissance de l'ensemble des informations nécessaires à travers le dossier d'ouvrage et les renseignements apportés par le propriétaire, un profil de 5 mètres de longueur, à la fois représentatif de l'ensemble de l'ouvrage et intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente, a été choisi par le groupe d'experts. La crête a une largeur de 10 m, le talus aval présente une rupture de pente : 80% en haut, puis 70% en aval. On y retrouve 3 individus vivants, 2 individus morts et 1 ayant rejeté après coupe en 2004. Le



diamètre des individus est supérieur à 30 cm. Aucune fuite n'a été observée sur le remblai. Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons sur la figure 4 (a) les notations consensuelles réalisées sur **les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai** de l'ouvrage (figure 3). Les notes individuelles montrent un bon accord entre experts. La notation de la perméabilité intrinsèque du remblai s'avère être médiocre (note obtenue de 5) en raison des matériaux constitutifs et du compactage du remblai. Les caractéristiques des arbres et souches présents sur le profil ont conduit à des notes médiocres à mauvaises pour les indicateurs de végétation. En effet, la densité d'individus est assez forte, les diamètres au collet importants, la clé de détermination des types racinaires amène à une structure racinaire mixte comprenant des racines horizontales pouvant laisser des conduits. L'évaluation du DD I a nécessité une extrapolation par les experts car nous disposons actuellement de connaissances sur l'évolution de la décomposition des racines jusqu'à 4 années de vieillissement (section 3). La grille de formalisation actuelle va être complétée dans les prochaines années pour prendre en compte des durées plus longues de décomposition.

### 5.3. Evaluation de la performance des fonctions et de la performance vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

La performance de la fonction étanchéité du remblai a été calculée par le modèle en considérant, d'une part, les indicateurs relatifs à la végétation correspondant à l'ouvrage dans son état actuel (note obtenue : 2), d'autre part, sans considérer la présence de la végétation en imaginant le barrage sans arbre (note obtenue : 6). Nous pouvons en conclure que la présence de végétation vient dégrader significativement et de manière réaliste pour les experts la performance de cette fonction. Nous présentons sur la figure 4 (b), les évaluations de la performance des différents composants obtenues par le modèle.



**Figure 4.** Evaluation consensuelle des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (a) et évaluation de la performance du barrage de Grengia (b)

Nous relevons que les notes de performance obtenues par le modèle reflètent l'opinion des experts vis-à-vis de la sécurité de cet ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Finalement, le modèle indique une performance mauvaise à médiocre (figure 6). Le composant remblai du barrage a une performance plus défavorable que l'interface et la fondation : étanchéité médiocre due aux caractéristiques intrinsèques du barrage et à la présence de grands arbres dont certains ont été coupés, ce qui laisse présager la présence de racines décomposées et donc de chemins préférentiels pour l'eau ; performance médiocre de la fonction de résistance à l'érosion interne résultant d'une évaluation médiocre de l'indicateur « *Sensibilité du remblai à l'érosion interne* » (résultant elle-même de la forte pente du talus aval). Pour la fondation, la performance médiocre résulte : de la note de 4 attribuée à l'indicateur « *Sensibilité de la fondation à l'érosion interne* » du fait d'un gradient admissible (calculé par les experts à partir de la géométrie (largueur/pente) et de la résistance à l'érosion du matériau) évalué « médiocre » ; de la performance « médiocre » de la fonction étanchéité du fait de la « *fuite* » observée par les experts lors de l'évaluation des indicateurs. Pour l'interface remblai – fondation, la performance médiocre (note obtenue de 4) s'explique de la même manière que pour la fondation. Ces résultats permettent de cibler les principaux points faibles de l'ouvrage qu'il est nécessaire de traiter et d'aller vers la proposition d'actions correctives comme par exemple un traitement de la végétation (extraction des arbres et retalutage).

## 6. Conclusion

Au cours de ce travail, des adaptations et améliorations de modèles préexistants ont été réalisées. Ces dernières permettent maintenant d'évaluer de manière modulaire la performance des barrages en remblai pour des ouvrages aux caractéristiques différentes (types d'étanchéité, présence ou absence de dispositifs de drainage et d'auscultation). L'application de ces modèles sur des cas réels a permis de démontrer leur robustesse notamment par le fait qu'ils sont capables de reproduire le raisonnement d'un expert. Elle a également permis de mettre en

évidence l'influence non négligeable de la prise en compte de la végétation arborescente sur l'évaluation de la performance d'un barrage collinaire vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Ce type de modèle a également été développé pour des digues de protection en traitant d'autres contraintes notamment le fait qu'elles sont à charge temporaire et qu'il s'agit donc de projeter l'évaluation de leur performance pour un type de crue (crue de danger, crue de sûreté) à partir d'observations réalisées à un instant donné. Des modèles spécifiques pour l'érosion externe ont été produits pour les digues.

Remerciements : Les auteurs remercient la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur et l'union Européenne pour leurs soutiens financiers. Les auteurs remercient l'ensemble des partenaires du projet RISBA (RISque des Barrages – projet Interreg Alcotra 2007-2013), qui ont permis de nombreuses applications franco-italiennes

## 7. Bibliographie

- [AKE 09] AKERKAR R., SAJJA P., *Knowledge-based systems*, Jones and Bartlett, 2009.
- [BAM 14] BAMBARA G., CURT C., VENNETIER M., MERIAUX P., ZANETTI C., VANLOOT P., Evaluation de la vulnérabilité des digues fluviales soumises au développement d'une végétation arborescente, *in Actes des 32ème Rencontres Universitaires de Génie Civil*, vol. Parties 3- 4- 5 oral - diagnostic, Polytech Orléans, 4 au 6 juin 2014, pp. 379–388.
- [BAM 15] BAMBARA G., VENNETIER M., CURT C., MÉRIAUX P., ZANETTI C., FERRAT S., VANLOOT P., "Characterization of root decomposition located in embankment dikes by near-infrared spectroscopy and chemometrics: study of four deciduous tree species", *Plant and Soil*, Accepted, 2015.
- [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.
- [DAL 05] DALY, F., CHAPITAL, L., PERSONNE, C.-D.-L. , État des lieux patrimonial des digues de canaux de navigation en France, *Ingénieries-EAT, numéro spécial « Sécurité des digues fluviales et de navigation »*, 2005, pp. 23-30.
- [DER 14] DEROO, L. AND FRY, J.-J., Projet National ERINOH - Erosion interne - Approches et besoins en matière d'ingénierie, Rapport de recherche, 2014
- [FOS 00] FOSTER, M., FELL, R. AND SPANNAGLE, M., The statistics of embankment dam failures and accidents, *Canadian Geotechnical Journal*, vol.37, n° 5, 2000, pp. 1000–1024.
- [MER 05] MERIAUX P., TOURMENT, R., WOLFF, M., 2005, Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France d'après la base de données nationales des ouvrages, *Ingénieries-EAT, numéro spécial « Sécurité des digues fluviales et de navigation »*, pp. 15-21
- [MER 06] MÉRIAUX 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.
- [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 14] ZANETTI C., VENNETIER M., MÉRIAUX P., PROVANSAL M., "Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions", *Plant and Soil*, vol. 387, n°1-2, 2014, pp. 21-35.
- [ZWIN 95] ZWINGELSTEIN, G., *Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels*, Hermès, 1995.