

RAPPORT FINAL Action 2.6

Progetto transfrontaliero Italia-Francia ALCOTRA
Projet transfrontalier Italie-France ALCOTRA



RISBA

RISCHIO DEGLI SBARRAMENTI ARTIFICIALI
RISQUES DES BARRAGES



Evaluation de la performance des barrages collinaires en remblai, soumis à la présence d'une végétation arborescente, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

Bambara G., Curt C., Mériaux P.

Table des matières

1. Introduction	5
2. Démarche méthodologique	8
2.1. Modèles existants.....	8
2.2. Méthodologie générale.....	11
3. Identification des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente	12
3.1. Introduction.....	12
3.2. Principe / Méthode	13
3.3. Résultats.....	13
3.4. Validation.....	19
4. Développement de mesures indirectes pour l'estimation du degré de décomposition des racines ligneuses	20
4.1. Introduction.....	20
4.2. Principe / Méthode	20
4.3. Résultats.....	24
5. Adaptation des modèles vis-à-vis des barrages collinaires.....	26
5.1. Introduction.....	26
5.2. Principe / Méthode	27
5.3. Résultats.....	28
5.4. Validation.....	31
6. Applications	31
6.1. Généralités	31
6.2. Evaluation du barrage de Grengia (Italie).....	34
6.3. Synthèse des résultats pour les autres applications	41
7. Conclusion	46
8. Remerciements.....	46
9. Références	47
10. Table des illustrations	49
11. ANNEXES	53
11.1. ANNEXE A : application sur les autres barrages.....	53

11.2.	ANNEXE B : notation des indicateurs d'état du barrage de Grengia	78
-------	--	----

1. Introduction

L'action 2.6 du projet RISBA s'attache à développer des méthodes et outils pour l'évaluation de la performance des barrages soumis à la présence de végétation arborescente.

De nombreux barrages collinaires en remblai rencontrés dans la zone frontalière franco italienne souffrent ou ont souffert d'un manque d'entretien qui a notamment conduit au développement d'une végétation arborescente abondante sur les remblais ou à leurs abords, parfois devenue une véritable forêt. Dans d'autres cas, des arbres ont été plantés en alignement sur les remblais ou à leur pied, dans un objectif de stabilisation, d'amélioration paysagère ou d'ombrage.

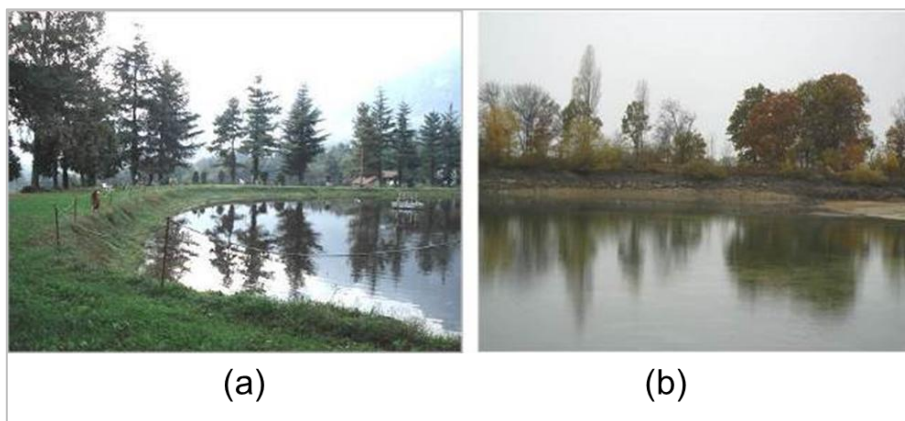


Figure 1. Exemples de barrage italien (a) et français (b) soumis au développement d'une végétation arborescente – (photos : Mériaux P. (a) et Bambara G. (b), 2014)

Or, le développement racinaire de cette végétation met en péril les ouvrages car il est susceptible de contribuer à un mécanisme d'érosion interne. Ce mécanisme est, parmi les phénomènes de dégradation des barrages, l'une des causes majeures de rupture des barrages en remblai (CFGB, 1997; Foster et al., 2000). Il est provoqué par l'existence de fuites non contrôlées qui entraînent les particules constitutives de l'ouvrage suite à leur arrachement.

Une fois installée, la végétation ligneuse peut faire l'objet d'opérations de déboisement partiel ou total, inappropriées si elles ne sont pas accompagnées de travaux de dessouchage et de reconstitution des talus ou de la crête. En effet, ces coupes peuvent entraîner la mort de nombreux arbres et créer autant de chemins préférentiels potentiels pour les écoulements internes lorsque leurs racines se décomposent. Il faut bien entendu rajouter à cette mortalité « artificielle », la mortalité naturelle des arbres avec les mêmes conséquences. On peut estimer qu'en France

des milliers de petits barrages collinaires sont en retard d'entretien quant au contrôle de la végétation ligneuse ce qui représente un potentiel de danger important (Mériaux et al., 2006). Depuis ce bilan, des travaux ont été menés, mais la majorité des petits barrages collinaires sont encore soumis à la présence de végétation arborée. Les barrages collinaires en zone frontalière de piémont sont également concernés par ce phénomène. Par conséquent, il est essentiel pour ces deux pays de développer des travaux visant à mieux évaluer la performance, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne, des barrages collinaires rendus vulnérables du fait du développement d'une végétation arborescente. Cela permettra de recommander au gestionnaire le type d'actions préventives ou correctives à mettre en œuvre et les pas de temps associés à ces actions.

La performance, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne, des barrages en remblai soumis au développement d'une végétation boisée est liée à de multiples paramètres interdépendants, qu'il est possible de répartir dans quatre catégories :

- **géométrique** : la taille du barrage, ses pentes de talus, sa largeur ont un lien direct sur la performance de l'ouvrage ;
- **géotechnique** (remblai et fondation) : le type de matériaux, sa granulométrie, sa compacité, sa teneur en eau, sa teneur en matière organique, son argilosité, etc. ;
- **hydraulique** : la charge hydraulique que subit l'ouvrage a une influence directe sur le gradient hydraulique, sur les percolations internes et sur les pressions interstitielles régnant dans le remblai. Par ailleurs, la présence d'eau a une influence majeure sur le développement d'une végétation arborescente et de ses racines, toujours à la recherche de ressource ;
- **biologique** : le type de végétation et les facteurs environnementaux (eau, sol, climat etc.), le degré de décomposition des racines.

Le nombre de variables à étudier est élevé et le mécanisme est complexe. Les modèles proposés doivent intégrer les différents paramètres cités ci-dessus. Ils concernent le remblai lui-même, les fondations et l'interface remblai-fondation. L'approche de modélisation retenue est un système à base de connaissances (Akerkar and Sajja, 2009; Booker and McNamara, 2004) 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 des services techniques des gestionnaires de barrages ou les bureaux d'études.

Les précédents travaux de recherche au sein d'Irstea (Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie) ont utilisé ce type d'approche pour le développement de modèles d'évaluation de la performance des barrages (Curt, 2008). Nous nous plaçons donc dans la suite de ces travaux et nous nous attachons à améliorer ces modèles afin de pouvoir **évaluer la performance des barrages collinaires en remblai soumis à la présence d'une végétation arborescente**. Cette amélioration passe par la prise en compte approfondie de la composante végétation arborée : identification, formalisation et agrégations des indicateurs d'état décrivant la végétation, puis introduction dans les modèles existants. La décomposition des systèmes racinaires doit être prise en compte. Or, actuellement, aucune mesure instrumentale ne permet de réaliser cette évaluation et une appréciation visuelle n'est pas envisageable puisque les systèmes racinaires se développent, et meurent, à l'intérieur de l'ouvrage. Il est donc important de développer des **mesures indirectes permettant d'appréhender l'évolution de la décomposition des systèmes racinaires à la mort naturelle de l'arbre ou à la suite de son abattage**. Les travaux antérieurs développés par Zanetti (2010) sur l'étude de la décomposition des racines ligneuses implantées sur les ouvrages hydrauliques ont été poursuivis. Nos résultats permettent de fournir des tendances d'évolution de la décomposition des racines ligneuses en fonction de l'espèce et de leur diamètre supposé et donc de formaliser l'indicateur correspondant.

Ce rapport récapitule les travaux engagés dans le cadre de l'action 2.6 du projet RISBA. Il est constitué de trois grandes parties :

- Il décrit la démarche méthodologique adoptée ;
- Il expose les résultats obtenus ;
- Il présente les applications qui ont été réalisées au cours du projet.

2. Démarche méthodologique

2.1. Modèles existants

Pour la construction du modèle d'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne, du fait de la présence de végétation arborescente, nous conservons la structure hiérarchique des modèles précédemment proposés l'évaluation du remblai et de la fondation (Curt, 2008; Curt et al., 2010; Curt, 2013). La structure hiérarchique est composée de trois niveaux : 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 (Figure 2).

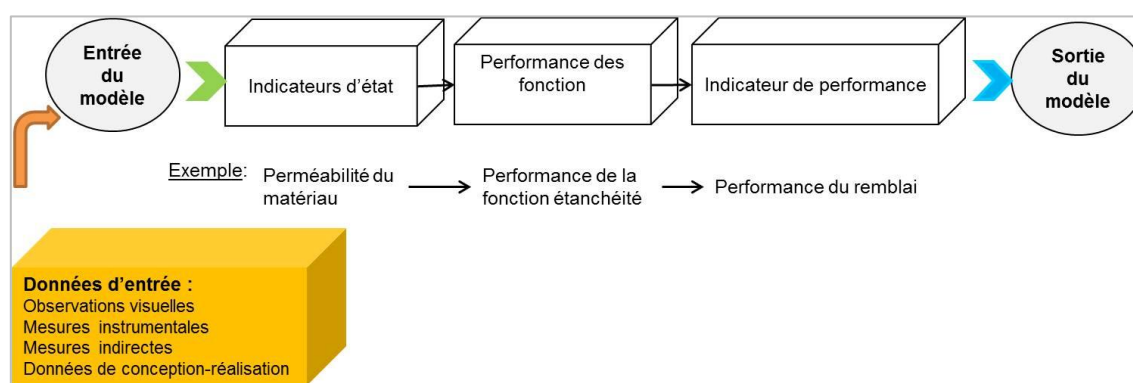


Figure 2. Structure hiérarchique des modèles développés par Curt (2008)

La variable de base du modèle est constituée par les **indicateurs d'état** qui 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 (Tableau 1) : nom de l'indicateur d'état, définition, échelle de mesure et références associées permettant 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 (Curt, 2008).

Nom	
Définition	
Echelle et références	
Caractéristiques de lieu	
Caractéristiques de temps	

Tableau 1. Champs de la grille de formalisation des indicateurs d'état (Curt, 2008)

L'étape de formalisation des indicateurs nécessite de choisir une échelle de mesures ainsi que des références sur cette échelle. Nous proposons de maintenir l'échelle utilisée par Curt (2008). C'est 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 (Figure 3).

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

Figure 3. Echelle d'évaluation double retenue pour l'évaluation de la performance des barrages

Tous les indicateurs sont évalués sur cette échelle. Le choix d'une échelle unique entraîne une vigilance particulière quant à la cohérence entre les différents indicateurs. Ceci conduit à un effet de hiérarchisation par rapport à la fonction : cette hiérarchisation apparaît sur la longueur de l'échelle qui est potentiellement parcourue par l'indicateur. Les références sont les points d'ancrage sur l'échelle : elles aident l'évaluateur en lui permettant d'identifier catégories ou intensités.

La Figure 4 permet d'illustrer la structure du modèle d'évaluation de la performance du remblai pour un barrage homogène équipé d'un drain et d'instruments d'auscultation.

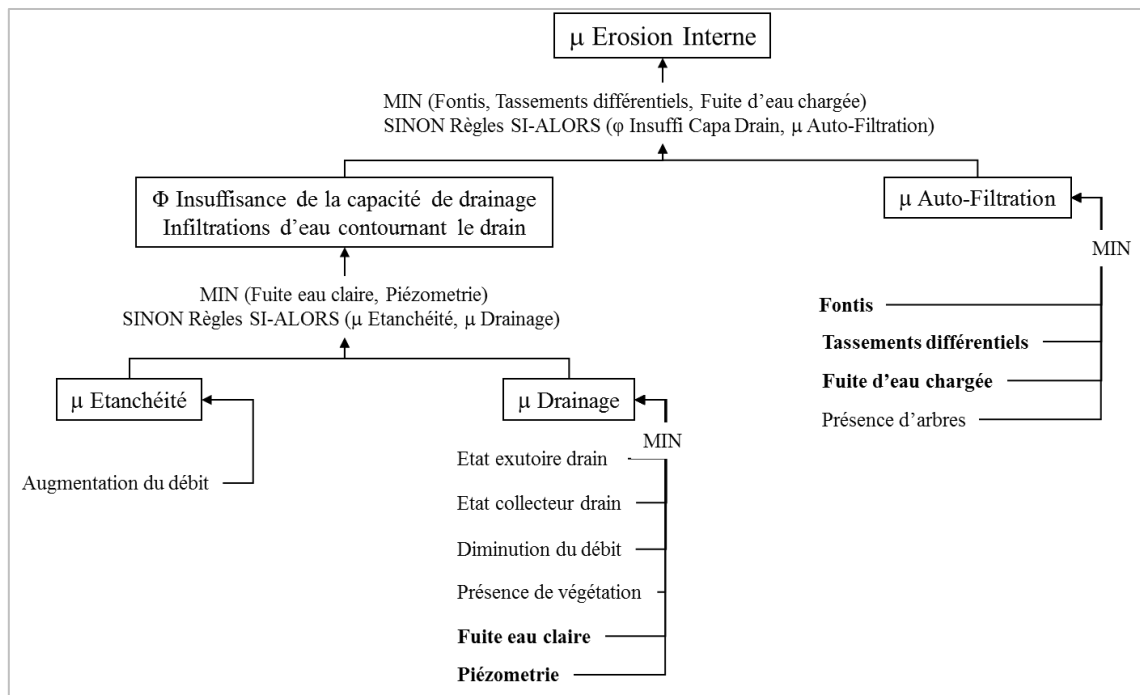


Figure 4. Modèle hiérarchique pour l'évaluation de la performance du remblai – cas d'un barrage homogène équipé d'un drain et d'instruments d'auscultation (Curt, 2008)

Les indicateurs sont agrégés par l'opérateur mathématique minimum (MIN) (Figure 4) afin d'obtenir en premier lieu l'évaluation de la performance des fonctions d'étanchéité, de drainage et d'auto-filtration impliqués dans le mécanisme d'érosion interne. Dans un second temps, les agrégations successives des fonctions conduisent à la performance vis-à-vis de l'érosion interne. Certains indicateurs qualifiés de « directs » permettent d'évaluer directement les phénomènes : ainsi, l'indicateur « Fuite » renseigne sur une dégradation de la performance de la fonction de drainage. Si cet indicateur n'est pas activé, des règles SI-ALORS sont mises en œuvre comme par exemple « Si fonction d'étanchéité = 4 ET Si fonction de drainage = 5 ALORS insuffisance de la capacité de drainage = 5 ».

Cependant, les barrages collinaires de petites dimensions étudiés dans le cadre du projet RISBA ne sont pas toujours équipés de drains et / ou d'instruments d'auscultation. Ainsi, les modèles initiaux développés par Curt (2008) ont dû être modifiés afin de tenir compte de cette particularité et afin d'intégrer les indicateurs d'analyse de la végétation. Ils sont principalement modifiés par :

- Une prise en compte plus approfondie de la présence de végétation arborée ;
- Une adaptation de ces modèles pour tenir compte de l'absence d'instrumentation et / ou de systèmes de drainage car ces cas sont fréquents dans les ouvrages hydrauliques à charge permanente étudiés ;

Une modification des règles d'agrégations SI-ALORS, car ces modèles s'attachaient à évaluer plus particulièrement le mécanisme de détérioration d'érosion interne par suffusion alors que nous nous intéressons de manière plus large au mécanisme d'érosion interne. Par exemple, le mécanisme d'érosion interne de conduit se doit d'être pris en compte dans les modèles vis-à-vis de la présence de végétation arborée.

2.2. Méthodologie générale

La Figure 5 illustre la méthodologie générale et les différentes étapes réalisées pour la construction d'un modèle d'évaluation de la performance des barrages collinaires soumis à la présence de végétation arborescente.

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 reconnus experts en génie civil des barrages sur la base de leur savoir et savoir-faire qui caractérisent l'expertise (Zwingelstein, 1995). Chaque étape du modèle est réalisée avec l'appui de ce groupe d'expertise (partie gauche de la Figure 5). Les travaux préliminaires basés sur les méthodes de la sûreté de fonctionnement (Peyras, 2003), qui ont permis d'établir des modèles fonctionnels des ouvrages hydrauliques vis-à-vis des scénarios de défaillance potentiels pouvant amener un ouvrage jusqu'à la rupture, sont la base de ces modèles. Les modèles d'évaluation de la performance sont repris, améliorés, complétés et adaptés, notamment par la volonté de prise en compte de la composante végétation arborescente. Des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborée sont proposés. Or, l'évaluation de certains de ces indicateurs peut être difficile s'il n'existe pas de méthodes instrumentales connues ou si l'observation visuelle est impossible, c'est le cas de l'indicateur d'état « Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu ¹ ». Ainsi, une méthodologie permettant un apport de connaissances supplémentaires est proposée (partie droite de la Figure 5). Nous développons des mesures indirectes permettant d'appréhender l'état de décomposition des racines ligneuses d'un individu. Ces différentes étapes permettent à terme de formaliser l'indicateur d'état.

La méthodologie générale est détaillée dans les sections suivantes.

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

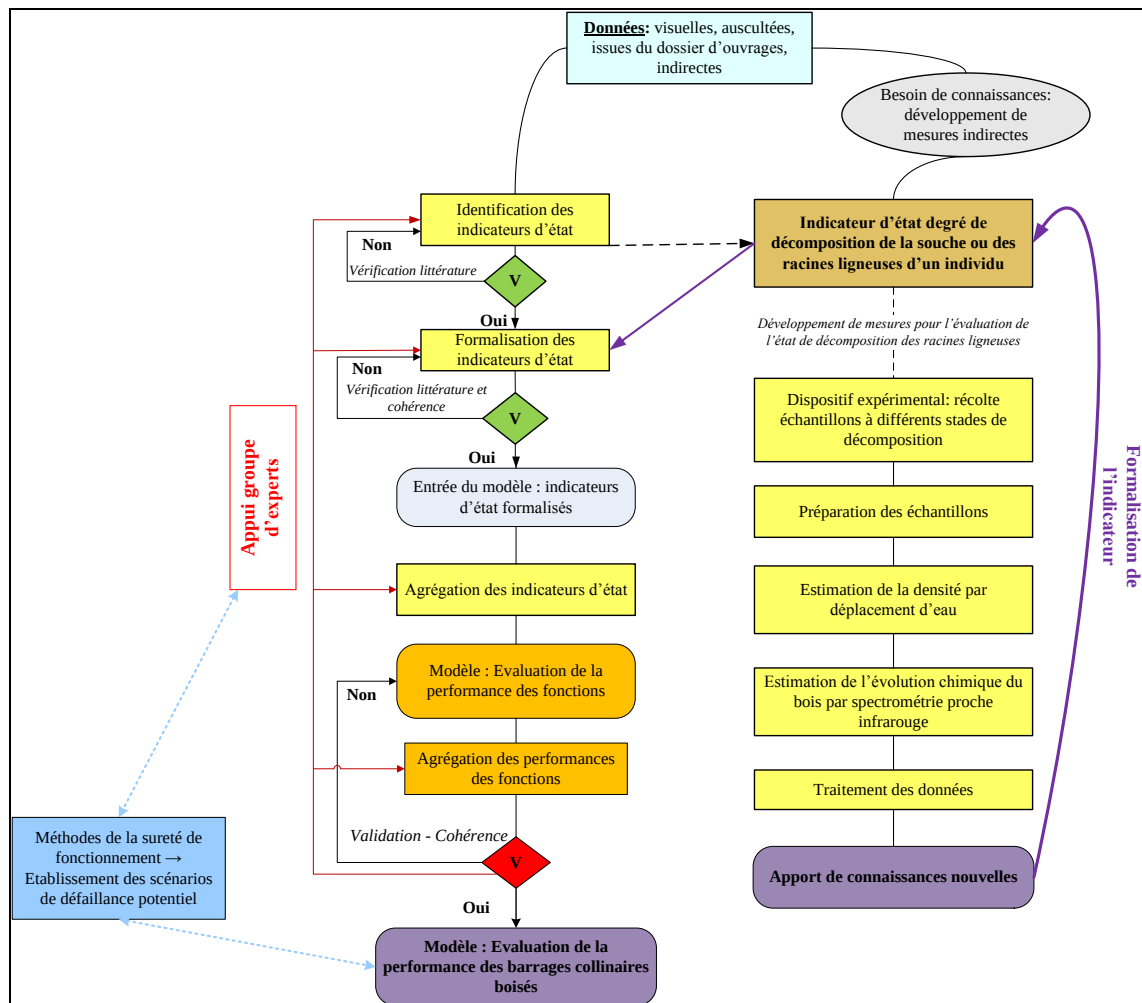


Figure 5. Méthodologie générale proposée pour l'action 2.6 du projet RISBA

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

3.1. Introduction

Il s'agit de compléter les modèles existants afin de tenir compte de la présence de végétation arborée. En effet, dans les modèles initiaux, seuls deux indicateurs « *Présence de végétation sur le pied aval* » et « *Présence d'arbres, de souches, sur la crête ou sur le talus aval pour les barrages de moins de 15 mètres de haut* » avaient été définis. Aucun indicateur traitant du type de racines et du degré de décomposition des racines n'avait été formalisé, seule la densité était considérée. Les modèles visaient effectivement plutôt des grands barrages donc généralement bien entretenus.

3.2. Principe / Méthode

Afin d'identifier les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous avons déployé les méthodes de la sûreté de fonctionnement, en nous focalisant sur l'élément extérieur « végétation arborescente ». Les méthodes mises en œuvre sont une analyse fonctionnelle (AF) et une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). La finalisation de l'identification de ces indicateurs d'état a été réalisée après recueil de l'avis du groupe d'expertise.

3.3. Résultats

Une analyse fonctionnelle externe centrée sur l'élément extérieur « végétation arborescente » a en premier lieu été réalisée. Ce travail préliminaire d'énumération permet de cerner les différentes contraintes liées à la présence de végétation sur l'ouvrage (contraintes pouvant initier un mécanisme de détérioration par érosion interne ou par affouillement). Nous avons alors identifié l'ensemble des configurations possibles combinant l'ouvrage hydraulique et la végétation arborescente.

Un barrage en remblai homogène non équipé de drains, ni d'instruments d'auscultation a été découpé sur un profil en travers en quatre parties (Figure 6). Ce découpage est donné à titre indicatif ; il ne tient pas compte des proportions de l'ouvrage mais du découpage du profil en travers en fonction de l'implantation potentielle de la végétation arborescente.

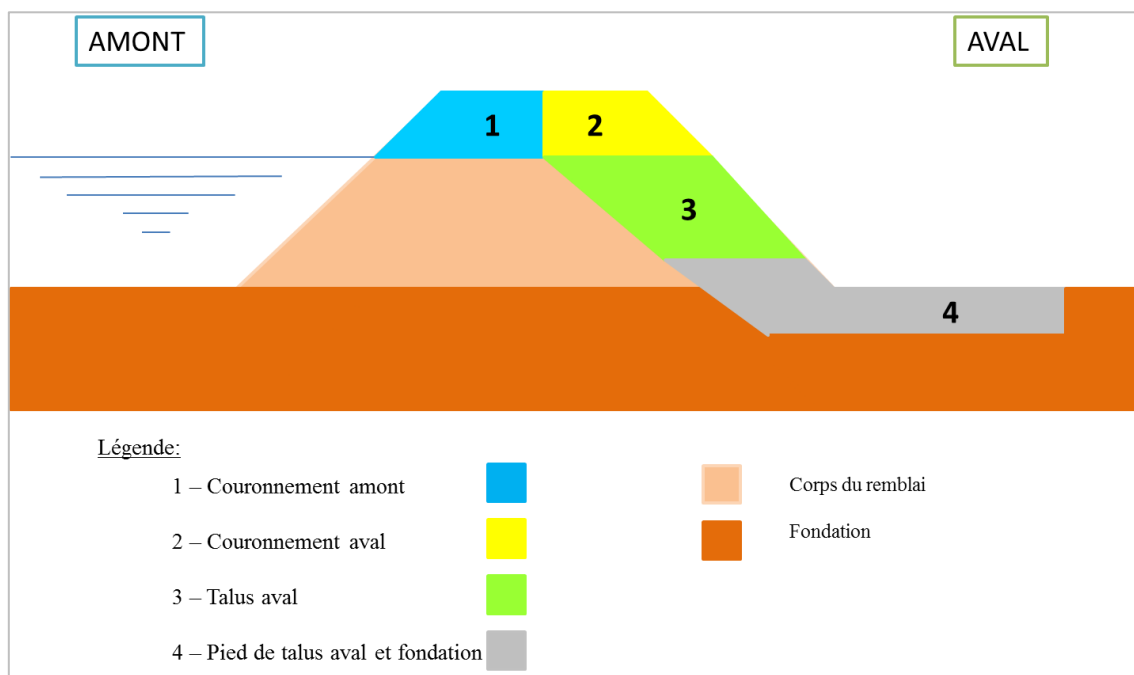


Figure 6. Découpage d'un barrage en remblai homogène non équipé de drains, ni d'instruments d'auscultation

L'analyse fonctionnelle nous a ensuite permis d'identifier les fonctions de résistance que doit posséder un ouvrage hydraulique vis-à-vis des contraintes liées à la présence de végétation ligneuse. Quatre types de fonctions sont concernés :

- La fonction « *résister aux sollicitations mécaniques* » ;
- La fonction « *résister à l'érosion interne* » ;
- La fonction « *limiter les flux hydrauliques* » ;
- La fonction « *évacuer les flux hydrauliques* » pour le cas particulier des barrages équipés de drains pouvant être colmatés par la présence de racines ligneuses.

Une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) spécifique à la problématique de la végétation arborée présente sur les ouvrages hydrauliques en remblai a ensuite été réalisée. Cette AMDE a permis d'identifier les indicateurs d'état des ouvrages qui sont issus des indicateurs des causes et des effets des défaillances des différentes parties du système. Il en résulte un tableau synthétique rassemblant « parties », « fonctions » et « indicateurs d'état » associés.

N°	Parties de l'ouvrage	Fonctions	Indicateurs d'état
1	Couronnement amont	1 – Résister aux sollicitations mécaniques	
		1.1 Résister à la déstructuration du remblai	Densité des arbres au m ² Volume de sol déstructuré et / ou volume de sol arraché
		1.2 Résister à l'affouillement	Port des arbres Volume racinaire par arbre
		2 – Limiter les flux hydrauliques	
		2.1 Limiter les eaux d'infiltrations sur le couronnement amont	Densité d'individus Volume racinaire par individu Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu

Tableau 2. Extrait du tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°1 d'un barrage collinaire

Le déploiement des méthodes de la sûreté de fonctionnement nous a permis d'identifier six indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborée (nous rappelons que nous nommons indistinctement par le terme « individus » les arbres et les souches d'arbre) :

- *Volume de sol déstructuré et / ou volume de sol arraché ;*
- *Port des arbres ;*
- *Densité d'individus ;*

- *Volume racinaire par individu ;*
- *Type de structure racinaire (pivotante / fasciculé ; superficielle / mixte) des individus ;*
- *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu.*

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, nous nous intéressons plus spécifiquement à quatre de ces indicateurs d'état :

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

Densité des individus

L'indicateur d'état « *Densité des individus* » est appréhendé visuellement lors d'une visite de terrain par l'ingénieur qui est en charge de l'évaluation.

La densité des individus présents sur l'ouvrage analysé témoigne indirectement de l'emprise des racines dans le remblai ou à ses abords. L'apparition d'une érosion interne peut être favorisée par la présence de racines ligneuses qui constituent des zones d'hétérogénéité et de perméabilité dans le remblai, notamment lors de la décomposition de celles-ci.

L'indicateur d'état « *Densité des individus* » est donc le premier indicateur à prendre en compte par l'ingénieur. Si aucun individu (arbre ou souche) n'est présent sur l'ouvrage, l'ingénieur donnera une note de 10 à cet indicateur et il sera inutile de s'intéresser aux autres indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente. Dans le cas où la végétation arborescente est présente, l'ingénieur choisira le profil (ou tronçon) le plus défavorable, c'est-à-dire celui où la densité des individus est la plus élevée pour réaliser l'évaluation de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Cependant, si la répartition de la végétation arborescente est équivalente sur l'ensemble du remblai, la géométrie du remblai la plus défavorable (largueur en crête étroite, pente de talus raide) sera considérée dans le choix du profil à évaluer. Nous présentons sur le Tableau 3 la grille de formalisation de l'indicateur « Densité des individus » que l'ingénieur utilise afin d'évaluer ce dernier en lui attribuant une note sur l'échelle de notation utilisée.

Nom	IE4 – 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. (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 présents sur 10m².
Echelle et référence	 10 : absence d'individus 5-4 : présence d'un individu par 10 m² 3-2 : présence de 2 à 5 individus par 10 m² 1-0 : présence > 5 individus par 10 m²
Caractéristiques de lieu	Profil du barrage analysé
Caractéristiques de temps	Evaluation réalisée lors d'une inspection visuelle axée sur la qualification de la végétation présente sur l'ouvrage.

Tableau 3. Grille de formalisation pour l'indicateur d'état « *densité des individus* »

Volume racinaire par individu

Le volume racinaire par individu est le second indicateur d'état à évaluer par l'ingénieur. Il permettra d'appréhender, avec l'indicateur d'état « *Densité des individus* », le volume racinaire global pour le profil analysé. Sachant que les systèmes racinaires croissent avec l'âge de l'arbre, un individu dont la souche possède un diamètre important laisse supposer un volume racinaire important. Ainsi, l'ingénieur mesurera sur le terrain le diamètre au collet de l'arbre (Figure 7).



Figure 7. Mesure du collet d'un arbre (en rouge) pour la notation de l'indicateur d'état « volume racinaire par individu » - (photo : Bambara G., 2014)

Selon le diamètre obtenu, il se référera aux références de la grille de formalisation de cet indicateur pour donner une note. 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.

Type de structure racinaire des individus

L'indicateur d'état « *Type de structure racinaire des individus* » est un indicateur important à appréhender par l'ingénieur afin de disposer d'une caractérisation racinaire globale au droit du profil analysé.

La structure racinaire des arbres est qualifiée d'opportuniste vis-à-vis des contraintes liées aux caractéristiques du sol et de l'accès des racines à l'eau et aux nutriments. Ainsi, le type de structure racinaire d'un arbre n'est pas lié uniquement à son espèce, mais à un ensemble de facteurs qui lui permettent d'assurer son développement dans les meilleures conditions.

Les différents types de structures racinaires peuvent être plus ou moins préjudiciables lors de la décomposition des racines ligneuses vis-à-vis du mécanisme

d'érosion interne. Ainsi, un système racinaire doté de longues racines horizontales (système traçant) 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), susceptible d'initier une érosion interne de conduit.

Cet indicateur d'état est évalué par l'ingénieur qui prend en compte sur le terrain les différents paramètres influençant la structure du système racinaire (type de sol, accès à l'eau...). Il utilise ensuite une clef d'aide à l'identification de la structure racinaire qu'un individu est susceptible d'avoir développée. Cette clef a été développée sur la base des travaux de recherche de Zanetti & al (2014). En fonction du type de structures racinaires identifiées, l'ingénieur se référera à la grille de formalisation pour évaluer l'indicateur.

Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu

L'indicateur d'état « *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 un ouvrage hydraulique en remblai et donc pour l'évaluation d'un ouvrage vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne. Cet indicateur ne peut être obtenu à partir d'une information directement accessible. A partir de la méthodologie de développement de mesures indirectes décrite à la section 4, nous avons pu proposer une formalisation de cet indicateur.

3.4. Validation

La formalisation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente est validée lors des applications réalisées sur le terrain. D'une part, l'utilisation des grilles de formalisations des indicateurs d'état par les ingénieurs experts ou juniors permet de s'assurer de leur répétabilité et de leur reproductibilité. D'autre part, les résultats obtenus par le modèle lors de l'évaluation de la performance des différents ouvrages visités permettent de vérifier les références établies pour chacun des indicateurs. Une restitution avec le groupe d'experts est réalisée afin d'ajuster les formalisations des indicateurs si des problèmes sont identifiés.

4. Développement de mesures indirectes pour l'estimation du degré de décomposition des racines ligneuses

4.1. Introduction

Les informations relatives aux données d'entrée de l'indicateur *«degré de décomposition de la couche ou des racines ligneuses d'un individu»* ne sont pas facilement accessibles : l'objet de la mesure est à l'intérieur du système. Le développement de mesures indirectes permettant une estimation de ce degré de décomposition est donc nécessaire.

Nous cherchons à définir la grille de formalisation de l'indicateur *«degré de décomposition de la couche ou des racines ligneuses d'un individu»* et plus particulièrement à définir les références sur l'échelle d'évaluation présentée sur la Figure 3. Ainsi, quelle note donner à cet indicateur quand est présente sur l'ouvrage une souche de chêne coupée depuis 5 ans, quelle note donner si l'arbre a été coupé seulement depuis un an, quelle note donner si l'arbre a été coupé depuis 5 ans mais qu'il s'agissait d'un frêne ... ? Actuellement aucune indication n'existe dans la littérature pour répondre à ce type d'interrogation, ce qui est d'autant plus problématique que cet indicateur est jugé comme un indicateur essentiel par les experts en charge de la notation du barrage.

4.2. Principe / Méthode

Une méthodologie permettant l'accès à cette information a donc été mise au point. Une mesure indirecte permet d'établir un lien de type phénoménologique entre la grandeur mesurée et la grandeur d'intérêt. La mesure indirecte considérée ici est une mesure chimique par spectrométrie proche infrarouge (SPIR) couplée à de l'analyse de données spectrales. Le principe est de suivre, au cours du temps, le degré de décomposition de racines de différentes espèces végétales représentatives d'espèces présentes sur les ouvrages hydrauliques en remblai et de différents diamètres. Ce choix de l'étude quantitative de la décomposition racinaire avec la méthode SPIR est guidé par plusieurs raisons : cette méthode est simple d'utilisation, avec un fort potentiel comparable en efficacité aux méthodes traditionnelles mais avec un gain de temps considérable (Kelley et al., 2004). De plus, cette méthode a déjà fait ces preuves dans l'étude des produits naturels comme les feuilles ou le bois

(Da Silva Perez et al., 2007; Eriksson et al., 2012; Gillon et al., 1993; Jones, 2006; Tsuchikawa, 2007).

Afin de suivre l'évolution de la décomposition des racines ligneuses, des dispositifs expérimentaux, contenant des échantillons de racines issus d'arbres fraîchement coupés, ont été mis en place sur des remblais de digues « tests » situées dans différentes zones géographiques (Zanetti et al., 2013). En effet, les conditions climatiques et édaphiques du milieu peuvent faire varier la vitesse de décomposition des racines ligneuses. Deux dispositifs sont actuellement en place : un dispositif situé sur les digues de l'Isère (France, Isère) mis en place en 2008 et un dispositif situé sur la digue de fermeture du barrage de Castérino (France, Alpes Maritimes) mis en place en 2009 (Figure 8).



Figure 8. Illustration du dispositif expérimental de Castérino lors du déterrage des échantillons de racines ligneuses après 4 ans de décomposition – (photo : Bambara G., 2013)

L'évolution de la décomposition des échantillons de racines ligneuses est suivie en fonction de l'espèce de l'arbre dont ils sont issus et pour des racines de 4 diamètres différents (3, 5, 8 et 10 cm). Les échantillons (coupés, d'environ 20 cm de longueur) sont disposés dans des paniers en inox et sont enfouis à environ 50 cm de profondeur (Figure 8). Le dispositif expérimental des digues de l'Isère est composé d'échantillons provenant de quatre espèces ligneuses différentes : chêne, frêne, robinier faux-acacia et peuplier. Le dispositif expérimental de la digue de fermeture du barrage de Castérino est composé d'échantillons provenant de deux espèces ligneuses : le pin sylvestre et le mélèze.

Une partie des échantillons est récoltée environ tous les deux ans. Ces échantillons sont séchés à température ambiante (environ 25°C) pendant environ deux mois jusqu'à stabilisation de leur poids sec. Actuellement, nous disposons au laboratoire, pour les deux sites expérimentaux, d'échantillons représentatifs de trois stades de décomposition : T0 (échantillons témoins, non décomposé), T2 (échantillons à 2 ans de décomposition) et T4 (échantillons à 4 ans de décomposition).

Les analyses quantitatives menées au laboratoire sur ces échantillons concernent l'évolution de leur densité (estimation par déplacement d'eau) et l'évolution de leurs caractéristiques chimiques par spectrométrie proche infrarouge (SPIR).

La mesure de la densité des échantillons par déplacement d'eau est notre mesure de référence (Figure 9a). Elle nous permettra de caler le modèle d'évolution de la décomposition des racines ligneuses par analyse SPIR. Elle est réalisée sur les échantillons de racines sèches et préalablement écorcées.

L'analyse par SPIR est réalisée sur les échantillons de racines réduits en sciure (broyés et tamisés) (Figure 9b). L'acquisition des spectres est obtenue avec un spectromètre Antaris II thermo-Nicolet muni d'une sphère d'intégration. Trois spectres sont acquis pour chaque échantillon (Figure 9c).

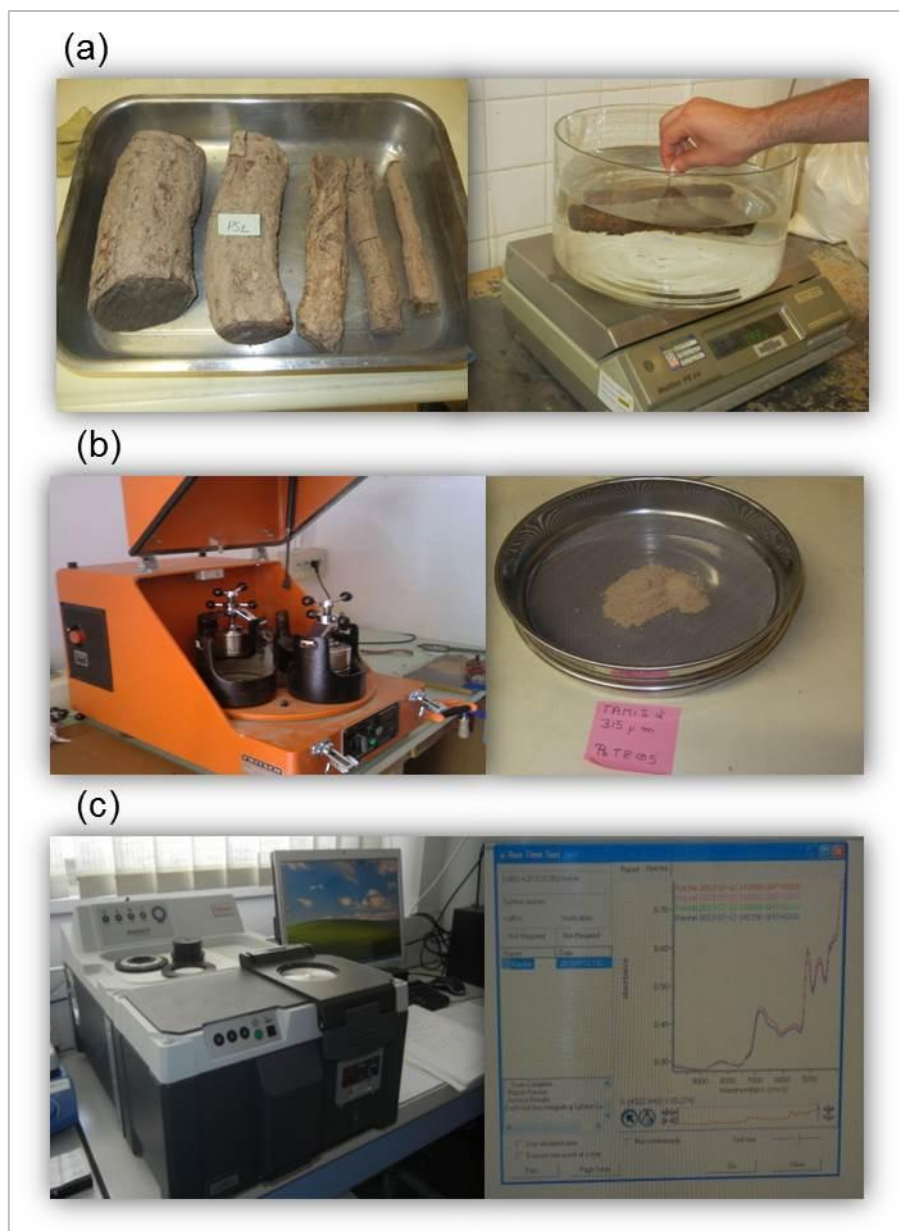


Figure 9. Illustration des différentes étapes d'analyse en laboratoire : estimation de la densité par déplacement d'eau (a), broyage des échantillons puis tamisage pour obtention d'une sciure homogène (b), acquisition des spectres des échantillons de racines avec le spectromètre proche infrarouge (c) – (photos : Bambara G., 2013)

Le traitement de ces données est réalisé à l'aide des outils chimiométriques, notamment en réalisant une analyse en composantes principales (ACP) et un modèle de régression des moindres carrés partiels (PLS). Les spectres, ayant une variation de ligne de base importante, sont préalablement prétraités avec une dérivée première. L'ACP est une première étape pour l'analyse exploratoire des données. Elle permet de discriminer les échantillons entre eux en fonction de leur stade de décomposition, de leur espèce et de leur diamètre. Le modèle de régression PLS (analyse prédictive)

permet, une fois calibré, de déterminer pour un échantillon inconnu son stade de décomposition, son espèce et son diamètre (Bambara et al., 2013).

4.3. Résultats

Les analyses quantitatives ont actuellement été menées sur les échantillons issus du dispositif expérimental de l'Isère. Trois stades de décomposition, quatre espèces ligneuses et quatre diamètres ont donc été analysés en spectrométrie proche infrarouge. La matrice spectrale obtenue est composée de 3 spectres par diamètre, 4 classes de diamètre, 4 espèces ligneuses et trois stades de décomposition. Au total, nous avons analysé 144 spectres.

Une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée sur l'ensemble des échantillons. Sur cette ACP, nous pouvons distinguer clairement trois groupes représentatifs des 3 stades de décomposition analysés. Le stade de décomposition apparaît alors comme le premier facteur discriminant les échantillons (Figure 10).

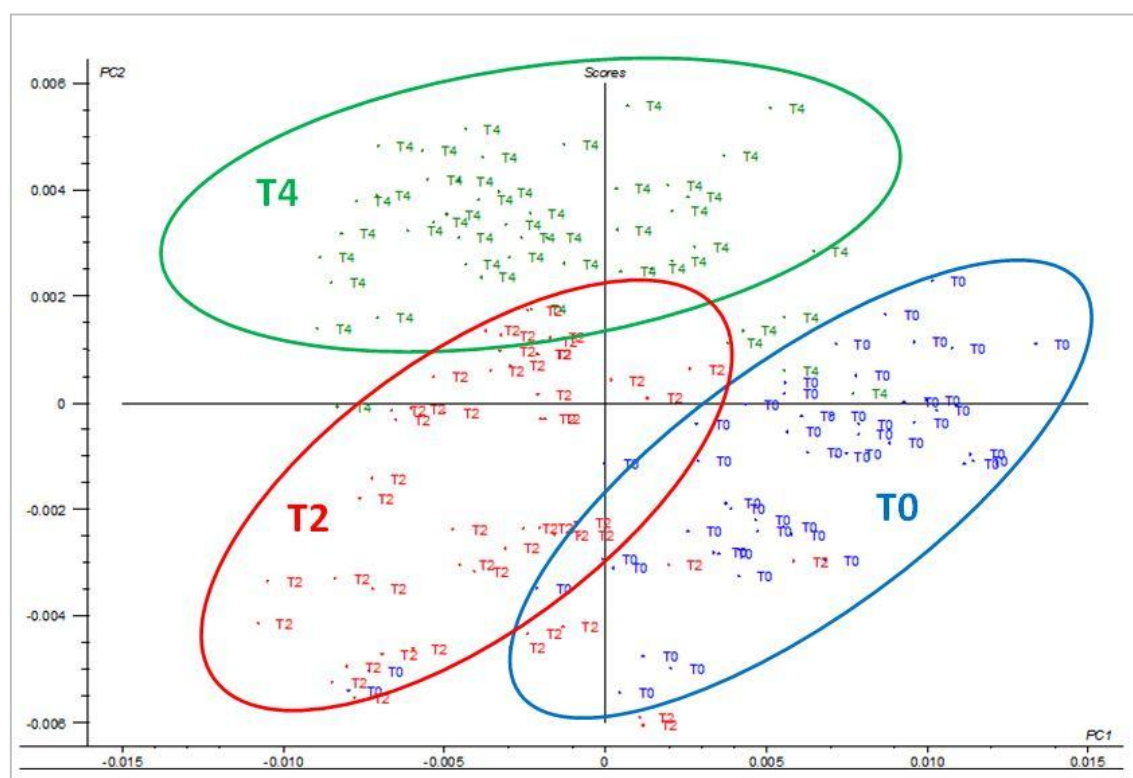


Figure 10. Plan 1/2 de l'ACP pour l'ensemble des échantillons (T0 = échantillons témoins non décomposé, T2 = après 2 ans de décomposition et T4 = après 4 ans de décomposition, n= 144, variance expliquée = 77 %)

Il est important de vérifier s'il est possible de discriminer les espèces entre elles : en effet, si certaines espèces se décomposent plus vite que d'autres, l'échelle

d'évaluation de l'indicateur doit clairement l'indiquer. De même il est important de connaître la décomposition en fonction du diamètre de la racine car le conduit résultant de la disparition de cette racine sera par conséquent plus ou moins grand. La dispersion observée au sein des groupes (T0, T2 et T4) est liée à d'autres sources de variabilité, en particulier les espèces ligneuses à laquelle appartiennent les échantillons et les différents diamètres (Figure 11).

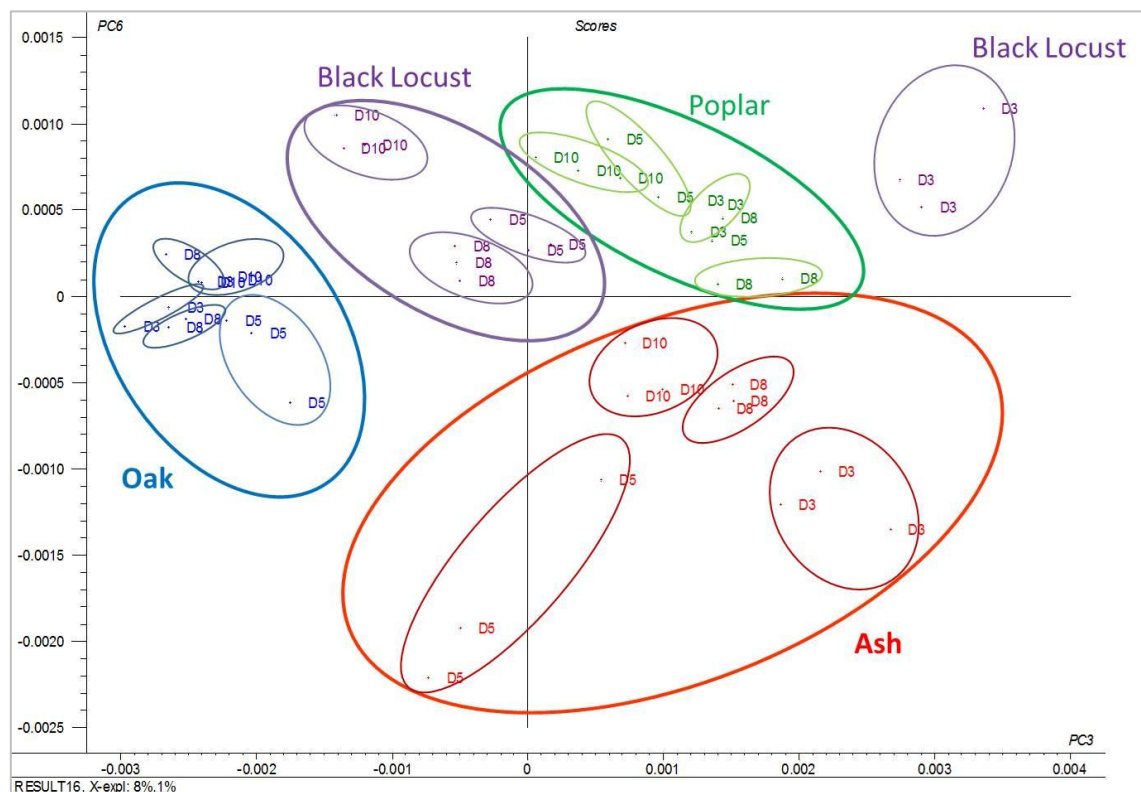


Figure 11. Plan 3/6 de l'ACP pour le stade de décomposition T0 (bleu = chêne, rouge = frêne, vert = peuplier, violet = robinier faux-acacia, D3 = diamètre 3, D5 = diamètre 5, D8 diamètre 8, D10 = diamètre 10, n = 48, variance expliquée = 9%)

Trois analyses en composantes principales ont été menées séparément pour chaque stade de décomposition (T0, T2 et T4). Elles ont mis en évidence les groupes correspondant aux quatre espèces et les sous-groupes liés aux quatre différents diamètres. Cependant la différence entre les classes de diamètre décroît avec le stade de décomposition. Sur la Figure 11, l'ACP pour le stade de décomposition T0, montre une bonne séparation entre les espèces, ainsi qu'entre les diamètres au sein de chaque espèce. L'espèce constitue le second facteur de discrimination des échantillons et le diamètre le troisième.

Un modèle de régression des moindres carrés partiels (régression PLS) a été développé d'une part pour la prédiction des stades de décomposition. 96 échantillons permettent de calibrer le modèle et 48 échantillons sont utilisés pour la prédiction

(144 échantillons au total). Ce modèle s'est montré performant pour prédire le stade de décomposition d'un échantillon inconnu. Sur l'ensemble des 48 échantillons à prédire seuls 4 échantillons ont été mal prédits, soit moins de 10% d'erreur. D'autre part, le modèle s'est également montré performant pour la prédiction des espèces et des diamètres pour chacun des 3 temps de décomposition (T0, T2 et T4). Les résultats obtenus montrent que même après quatre ans de décomposition et une structure physique dégradée des échantillons, les espèces affichent toujours une composition chimique significativement différente.

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 (lors de l'étape de formalisation des indicateurs d'état) l'échelle de notation de l'indicateur « *degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* ». Par exemple, la note de 9-8 (Bon) est attribuée en cas de présence de souches de chênes ayant été abattus un à deux ans auparavant. Ces références vont être affinées au fur et à mesure des nouvelles mesures SPIR sur les années à venir. Cette démarche permet d'apporter des connaissances nouvelles sur la décomposition de racines de différentes espèces végétales présentes sur les ouvrages hydrauliques en remblai.

5. Adaptation des modèles vis-à-vis des barrages collinaires

5.1. Introduction

Les barrages collinaires auxquels nous nous intéressons plus particulièrement dans le cadre du projet RISBA ne sont pas toujours équipés de drains et / ou d'instruments d'auscultation. Les modèles initiaux ont donc été simplifiés afin de tenir compte de cette particularité. Plusieurs types de barrages collinaires sont alors envisagés :

- les barrages en remblai homogènes non drainés et non équipés d'instruments d'auscultation ;
- les barrages en remblai homogènes drainés² mais non équipés d'instruments d'auscultation ou inversement ;
- les barrages en remblai avec masque amont en béton non drainés et non équipés d'instruments d'auscultation ;

² Nous indiquons « drainés » lorsqu'un barrage est muni d'un système de drainage en remblai et en fondation

- les barrages en remblai avec masque étanche en argile, drainés mais non équipés d'instruments d'auscultation ;
- les barrages en remblai zonés (noyau étanche) avec un drainage uniquement dans le remblai et non équipés d'instruments d'auscultation ;
- les barrages en remblai zonés (noyau étanche) drainés et non équipés d'instruments d'auscultation.

Ainsi, la difficulté de ce travail réside en la capacité d'adaptation des modèles d'évaluation de la performance vis-à-vis des cas rencontrés.

5.2. Principe / Méthode

Nous avons dans un premier temps défini les changements à apporter aux modèles initiaux pour qu'ils puissent s'appliquer aux barrages en remblai homogènes non équipés de drains, ni d'instruments d'auscultation. Ces changements portent sur :

- Le retrait de la fonction drainage et l'ensemble des indicateurs afférents hormis l'indicateur « Fuites » qui devient l'un des indicateurs d'état direct de la fonction d'étanchéité ; Deux fonctions doivent donc être évaluées pour le remblai, la fondation et l'interface : l'étanchéité et la résistance à l'érosion interne ;
- La suppression des indicateurs d'état auscultés (piézométrie et mesures de débit) ;
- L'évaluation de la performance d'un composant supplémentaire : l'interface remblai-fondation, qui compense le retrait de la fonction drainage dans l'évaluation de la performance du remblai et qui apparaît importante à expliciter en tant que telle car la zone d'interface peut être une zone préférentielle d'installation et de développement des racines ;
- L'ajout d'indicateurs permettant de fournir des évaluations sur l'étanchéité du barrage en l'absence de données d'auscultation. Ces indicateurs rassemblant des données issues du dossier de conception-réalisation telles que « Perméabilité du matériau », « Compactage », ... permettent d'estimer un indicateur d'état « Perméabilité du remblai ». Ces données avaient été précédemment formalisées et utilisées en tant qu'indicateurs d'état pour définir la « conformité des composants aux règles de l'art » (Curt, 2008) ;
- L'ajout des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente.

5.3. Résultats

Nous illustrons dans cette partie les modèles d'évaluation de la performance des barrages en remblai homogènes soumis à la présence de la végétation arborescente non équipés de drains, ni d'instruments d'auscultation.

Trois modèles pour l'évaluation de la performance, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne, ont été établis pour ce type d'ouvrage. Chacun permet l'évaluation d'un des composants du barrage : remblai (Figure 12), fondation (Figure 13), interface remblai-fondation (Figure 14).

Pour l'évaluation de chaque composant, l'évaluation de deux performances de fonctions sont nécessaires :

- L'évaluation de la performance de la fonction étanchéité (remblai, fondation, interface) ;
- L'évaluation de la performance de la fonction de résistance à l'érosion interne (remblai, fondation) ou l'évaluation de la performance de la fonction de résistance à l'érosion remblai-fondation. La fonction de résistance à l'érosion interne admet 3 indicateurs directs (*Fuites d'eau localisées et chargées* ; *Fontis – cône d'affaissement* ; *tassements différentiels*). S'ils sont activés (c'est-à-dire évalués inférieurs ou égaux à 5), la performance vis-à-vis de l'érosion interne est directement obtenue en calculant le minimum de la valeur de ces trois indicateurs. Sinon, les agrégations suivantes sont menées.

L'évaluation de la performance de la fonction « étanchéité » du remblai (Figure 12), de la fondation ou de l'interface des barrages collinaires 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 c'est-à-dire si sa note est inférieure ou égale à 5. Si l'indicateur d'état direct « *Fuites, indices de fuites* » n'est pas activé, l'évaluation de la performance de la fonction « étanchéité » 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. La combinaison des indicateurs d'état « *Volume racinaire par individu* » et « *Densité des individus* » renseigne le volume racinaire global dans le remblai. Le résultat de cette première combinaison est agrégé dans une deuxième combinaison avec l'indicateur d'état « *Type de structure racinaire* » afin d'obtenir la caractérisation racinaire dans le remblai. Cette deuxième combinaison est ensuite

agrégée avec l'indicateur d'état « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses* » pour obtenir, au moyen d'une troisième combinaison, la propension aux écoulements au sein du remblai. Dans une dernière étape, la troisième combinaison est agrégée avec l'indicateur « *perméabilité du remblai* » relatifs à la perméabilité intrinsèque. Cet indicateur d'état est évalué par l'utilisateur en s'appuyant sur les données issues du dossier de l'ouvrage.

L'évaluation de la performance de la fonction « étanchéité » de la fondation suit la même logique (Figure 13).

La performance de la fonction « étanchéité » de l'interface remblai-fondation est obtenu en utilisant l'opérateur mathématique MIN entre la performance de la fonction étanchéité du remblai et la performance de la fonction étanchéité de la fondation. Nous retenons ainsi la note la plus défavorable en combinant la performance de ces deux fonctions « étanchéité » (Figure 14).

On évalue parallèlement la performance de la fonction « de résistance à l'érosion interne » du composant (remblai, interface et fondation) en évaluant l'indicateur d'état « Sensibilité à l'érosion interne » pour les trois composants.

Au final, on combine les valeurs des performances des fonctions « d'étanchéité » et de « résistance à l'érosion interne » pour les composants remblai, interface remblai-fondation et fondation.

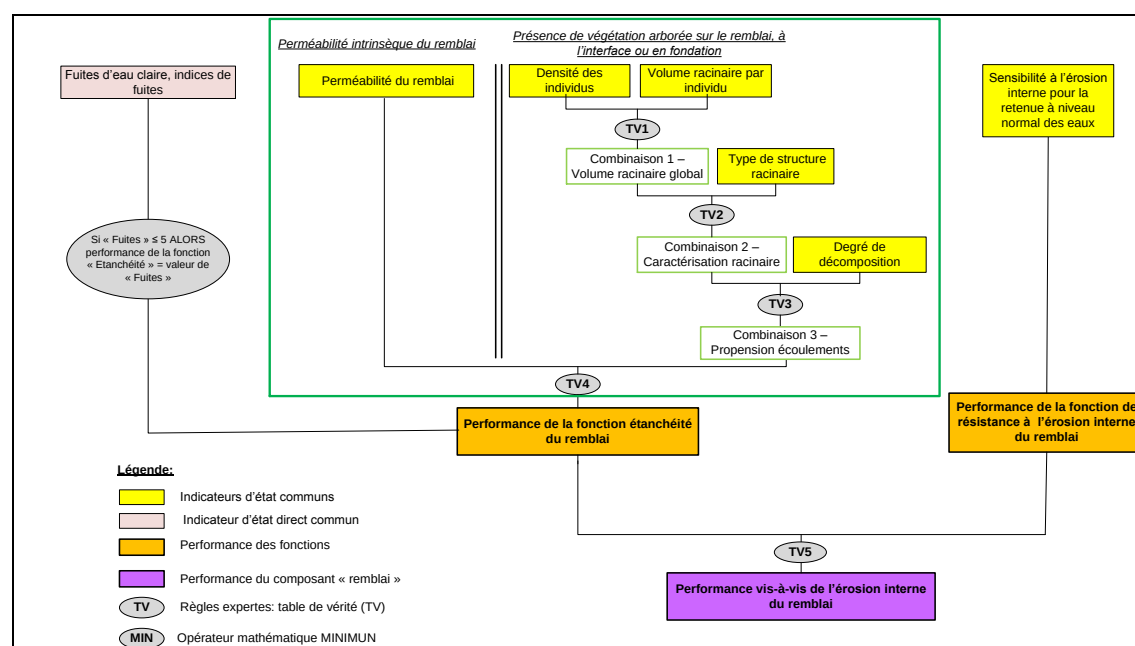


Figure 12. Modèle d'évaluation de la performance du remblai d'un barrage en remblai homogène soumis à la présence de végétation arborée

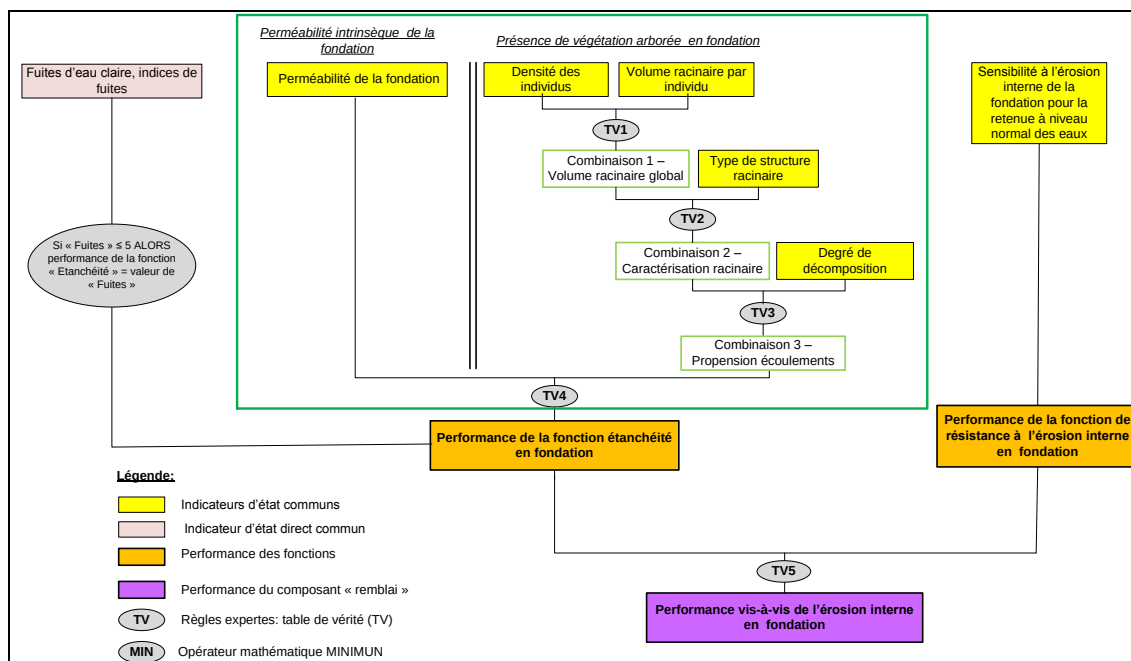


Figure 13. Modèle d'évaluation de la performance de la fondation d'un barrage en remblai homogène soumis à la présence de végétation arborée

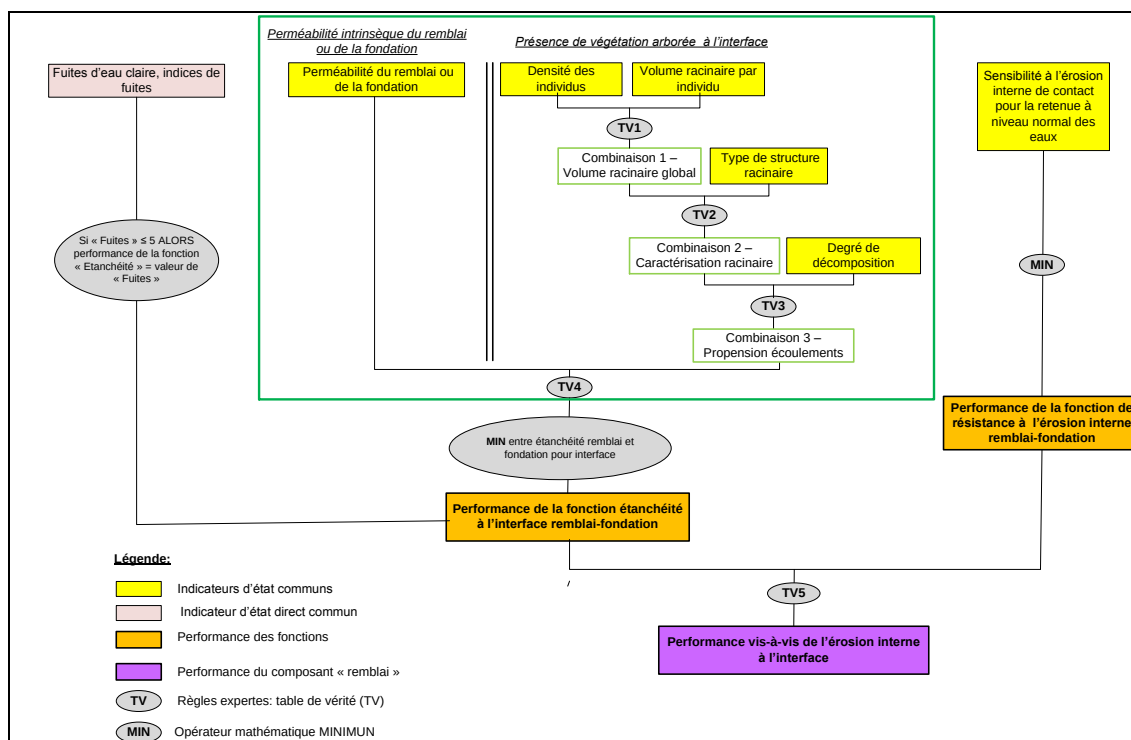


Figure 14. Modèle d'évaluation de la performance de l'interface remblai-fondation d'un barrage en remblai homogène soumis à la présence de végétation arborée

5.4. Validation

Au total sept applications sur des ouvrages répartis dans la zone frontalière franco italienne ont été réalisées. Ces applications ont permis de vérifier la concordance des formalisations et agrégations des indicateurs d'état et également des agrégations des performances des fonctions pour l'obtention de la performance d'un composant (remblai, interface remblai-fondation, fondation) vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.

Des ingénieurs avec des niveaux d'expérience différents se sont rendus sur le terrain afin de noter l'ensemble des indicateurs nécessaires pour l'évaluation de la performance de chacun des ouvrages vis-à-vis de l'érosion interne. Un dossier récapitulant chaque indicateur d'état et sa grille de formalisation leur a été fourni. La notation a été réalisée par les ingénieurs d'abord de manière indépendante, puis des notes consensuelles ont été dégagées par discussions entre ces ingénieurs. La performance des fonctions puis la performance vis-à-vis de l'érosion interne de chaque composant ont été calculées en utilisant le modèle, et en parallèle les experts ont déclaré une note globale sans utilisation du modèle.

Une restitution des résultats a ensuite été réalisée avec le groupe d'experts afin d'apporter les derniers ajustements aux modèles d'évaluation de la performance.

6. Applications

6.1. Généralités

Dans le cadre du projet RISBA, la performance vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne de trois barrages italiens et quatre barrages français (remblai, fondation interface) a été évaluée en utilisant les modèles développés. Parmi ces sept ouvrages, nous avons rencontré différents types de barrages collinaires, aucun d'eux n'étant ausculté. Nous avons réparti ces types de barrages collinaires en deux grandes catégories par rapport à la présence ou non de systèmes de drainage et en sous-catégories en fonction du type d'étanchéité (étanchéité interne ou masque) (Figure 15).

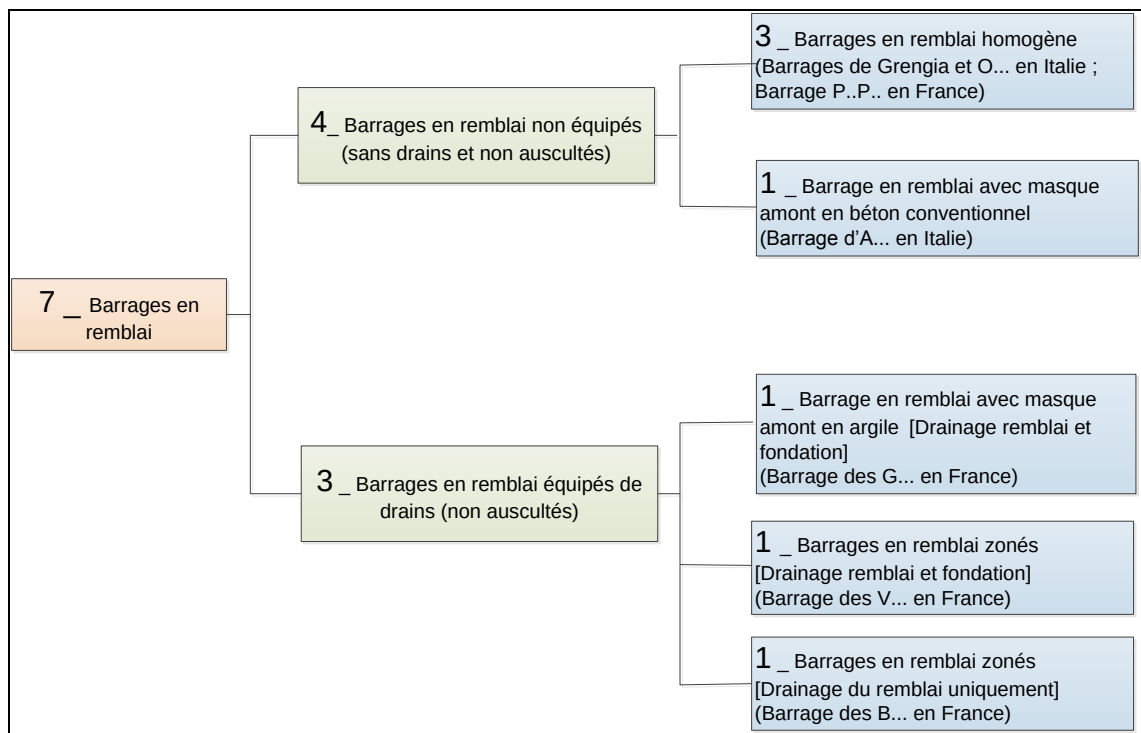


Figure 15. Les différents types de barrages collinaires en remblai évalués

La fonction d'étanchéité présentée dans les paragraphes précédents concernait les barrages en remblai homogène. D'autres indicateurs doivent être évalués dans le cas des autres types de barrages pour l'évaluation de l'étanchéité intrinsèque. Ces indicateurs sont extraits de Curt (2008) et listés dans le Tableau 4. Les indicateurs d'état spécifiques à l'évaluation de la végétation arborescente restent inchangés.

	Type de barrage	Indicateurs d'état
Fonction étanchéité du remblai	Barrage en remblai avec masque amont en béton	- Fissuration des dalles - Qualité du béton - Mouvement différentiel au niveau des joints - Intégrité des joints
	Barrage en remblai avec masque amont en argile	- Glissement du talus amont - Perméabilité du matériau du masque - Fissures de retrait, dessiccation
	Barrage en remblai zoné	- Perméabilité du matériau du noyau - Gradient hydraulique - Hauteur du noyau par rapport aux plus hautes eaux (PHE)

Tableau 4. Indicateurs d'état de la fonction étanchéité pour les autres types de barrages étudiés

Quel que soit le type de barrage, l'étanchéité intrinsèque de la fondation est évaluée par l'indicateur d'état « *perméabilité de la fondation* ». Cet indicateur est noté à dire d'expert.

Pour les ouvrages en remblai équipés de systèmes de drainage, les indicateurs directs « *Fuites, indices de fuites* » et / ou « *zone humide en zone de pied aval* » (dans le cas de la fondation) permettent l'évaluation de la fonction drainage du remblai et de la fondation. Dans le cas où ces indicateurs d'état directs ne sont pas activés, la fonction drainage du remblai et de la fondation est évaluée à l'aide des indicateurs d'état suivants :

- Etat visuel de l'exutoire du tapis drainant (Curt, 2008);
- Etat visuel du collecteur de drainage et/ou de la canalisation d'évacuation (Curt, 2008) ;
- Etat visuel de l'environnement de l'exutoire du tapis drainant ;
- Zone humide loin du pied aval (uniquement pour la fondation).

L'indicateur « *état visuel de l'environnement de l'exutoire du tapis drainant* » est relatif à la densité de végétation arborescente présente au niveau de l'exutoire du tapis drainant.

Pour l'ensemble des types de barrages, la fonction de résistance à l'érosion interne est évaluée à l'aide de l'indicateur d'état « *sensibilité à l'érosion interne pour la retenue à niveau normal des eaux* ».

La notation des indicateurs d'état pour l'évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques à charge permanente boisés a été réalisée par trois ingénieurs experts : deux ingénieurs italiens (noté experts 1) et un ingénieur français (noté expert 2) sur les trois barrages italiens (Grenzia, O... et A...). Lors des notations individuelles, les deux experts italiens ont noté les indicateurs d'état de manière consensuelle. Pour les barrages Français, deux ingénieurs (1 ingénieur expert et 1 ingénieur « junior ») ont réalisé l'évaluation. Les notations sont ensuite assemblées par consensus, dans une note unique pour chacun des indicateurs.

Nous présentons ici les résultats de l'évaluation du barrage de Grenzia en Italie, puis une synthèse des résultats obtenus pour les autres barrages évalués. L'annexe A présente un bref descriptif des autres barrages évalués ainsi que les résultats.

6.2. Evaluation du barrage de Grenzia (Italie)

Description du barrage

Le barrage de Grenzia est situé à une altitude d'environ 480 m dans la région de Cunéo. Il a été construit en 1971 et a une double fonction : d'une part, il permet l'irrigation des cultures de kiwis et de pêchers situées en aval et d'autre part, il permet la pratique de la pêche sportive.

Ce barrage en remblai est de type homogène et a été réalisé en déblai-remblai. Il ne possède aucun système de drainage. Il a une hauteur d'environ 10 m pour une capacité maximale avoisinant les 30 000 m³. L'ouvrage a été équipé en 2005 de piézomètres et de bornes topographiques. Cependant, ces instruments d'auscultation n'étant pas relevés, nous considérons ce barrage comme non équipé. En 2012, des essais géotechniques visant à statuer sur la stabilité de l'ouvrage ont été réalisés. Deux sondages carottés, ainsi que deux essais pénétrométriques SPT ont permis de connaître respectivement la constitution stratigraphique du remblai ainsi que ses principales caractéristiques géotechniques.

Une végétation arborescente est présente sur le couronnement aval de l'ouvrage (Figure 16).



Figure 16. Répartition homogène des arbres sur le couronnement aval du barrage de Grengia (Italie) - (photo : Mériaux P., 2014)

Différentes essences d'arbres matures bordent ce couronnement. Nous y rencontrons des conifères (pin, épicéa...) et un feuillu (chêne). Sur certains profils, des souches sont présentes (toujours sur le couronnement aval de l'ouvrage). Les propriétaires témoignent de coupes d'arbres effectuées en 2004.

Evaluation 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, 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 vers le point le plus haut du barrage (Figure 17).



Figure 17. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage de Grengia (Italie) vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne - (photo : Bambara G., 2014)

Sur ce profil de 5 m de longueur rive à rive, la crête a une largeur de 10 m. Le talus aval présente une rupture de pente : 80% en haut, puis 70% en aval.

La végétation arborée présente sur le couronnement aval du profil est importante. La densité des individus est élevée : entre 2 et 5 individus par 10 m². On y retrouve 3 individus vivants : 3 conifères et 2 individus morts (conifères) et 1 ayant rejeté (feuillu) après coupe en 2004. Le diamètre des individus est supérieur à 30 cm.

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur **les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai** de l'ouvrage (Figure 12). En fonction des informations disponibles, certains de ces indicateurs ne peuvent pas être évalués par les experts et, le cas échéant, on note « non renseigné (NR) » sur leur fiche de notation. Aucune fuite ou indice de fuite n'ont été observées sur le remblai sensu stricto, les experts ont donc noté les autres indicateurs d'état permettant l'évaluation de la performance d'étanchéité.

Le diagramme radar présenté en Figure 18 illustre les résultats de la notation individuelle des indicateurs d'état par les experts pour l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai.

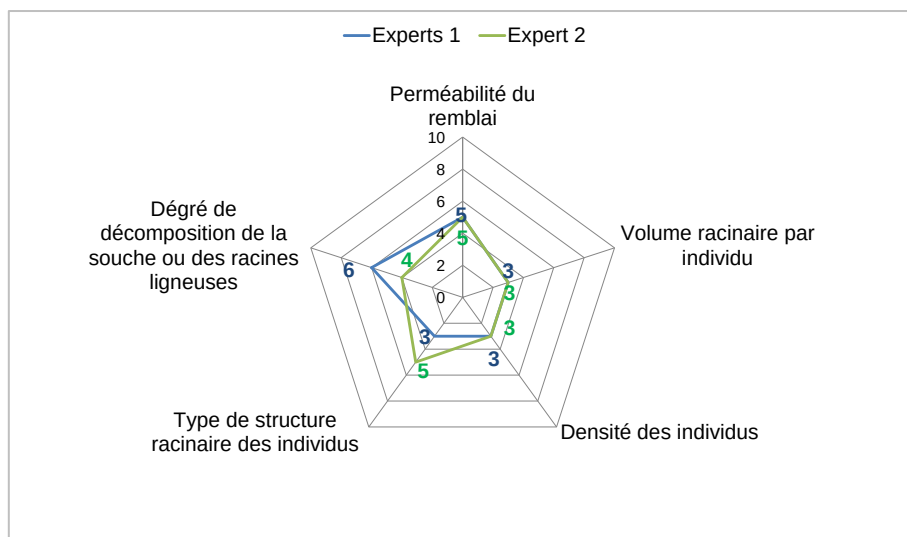


Figure 18. Evaluation individuelle par les experts des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité du barrage de Grengia

Le diagramme radar illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les experts (Figure 19).

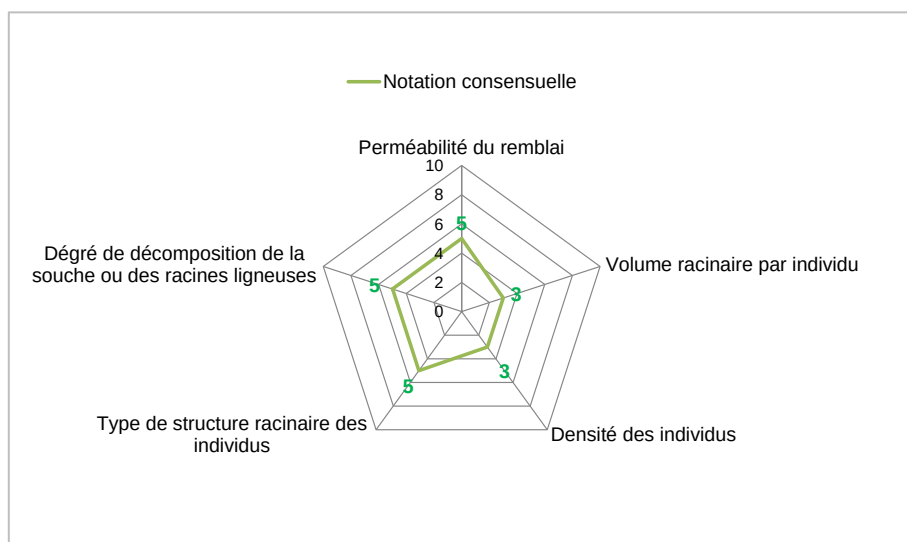


Figure 19. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage de Grengia

La notation individuelle ou par consensus de la perméabilité intrinsèque du remblai est la même pour les experts 1 et l'expert 2 : note de 5, soit une perméabilité intrinsèque médiocre.

Le profil choisi présente entre 2 et 5 individus par 10 m² (Figure 17).

L'indicateur « *Densité des individus* » a par conséquent été évalué par le groupe d'experts comme mauvais (note égale à 3) conformément aux références établies

lors de la formalisation de cet indicateur que ce soit lors de la notation individuelle de l'indicateur ou consensuelle.

Pour évaluer l'indicateur « *Volume racinaire par individu* », le groupe d'experts a mesuré le diamètre au collet des plus gros individus. Ce dernier étant supérieur à 30cm, l'indicateur a été évalué comme mauvais (note égale à 3) quel que soit le type de notation (individuelle ou consensuelle).

Pour ces deux indicateurs d'état, les grilles de formalisation établies permettent une évaluation reproductible par différents utilisateurs.

L'indicateur « *Type de structure racinaire des individus* » a été évalué par le groupe d'experts à partir de la clef d'aide à l'identification de la structure racinaire potentielle d'un individu basée sur des paramètres déterminant la structure racinaire d'un arbre (type de sol, accès à l'eau, position sur l'ouvrage). Compte tenu de ces paramètres, la végétation arborescente du barrage de Grengia présente potentiellement une structure racinaire mixte (racines horizontales et pivots). Lors de la notation individuelle, les résultats diffèrent entre les experts 1 (note de 3) et l'expert 2 (note de 5). En effet, la description des références de cet indicateur est difficile à réaliser et des améliorations doivent encore être produites pour permettre à l'expert d'estimer la structure racinaire d'un individu. La discussion consensuelle entre les experts les amène à évaluer l'indicateur d'état « *Type de structure racinaire des individus* » comme étant médiocre (note égale à 5) car conformément aux références établies lors de la formalisation de cet indicateur, ils supposent une structure racinaire mixte dans la partie 2 de l'ouvrage (Figure 6).

Enfin, la note de 5 (médiocre) pour l'indicateur « *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu* » a été attribuée de façon consensuelle par les experts sur la base des éléments fournis dans la grille de formalisation, compte tenu de l'état de dégradation de la souche de conifère (Figure 20a) et des rejets observés sur la souche de chêne (Figure 20b). Lors de la notation individuelle des experts, des résultats différents ont été donnés (Figure 18). En effet, la coupe des arbres qui date d'une dizaine d'années ne permet pas aux experts de se baser sur les connaissances dont nous disposons actuellement (évolution de la décomposition des racines jusqu'à 4 année de vieillissement (section 4.3)). Les notations doivent dans ce cas être réalisées à « dire d'experts ». La grille de formalisation actuelle va être complétée dans les prochaines années pour prendre en compte des durées plus longues de décomposition.



Figure 20. Souche de conifère morte (a) et souche de chêne ayant rejeté (b) sur le couronnement aval du barrage de Grengia (Italie) – (photo : Bambara G., 2014)

L'ANNEXE B présente les notes de l'ensemble des indicateurs d'état données par les experts de manière individuelle et consensuelle afin d'évaluer la performance du barrage de Grengia vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.

Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

La performance de la fonction étanchéité 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 la performance de cette fonction.

Nous présentons sur la Figure 21, les évaluations de la performance du remblai, de l'interface remblai-fondation et de la fondation meuble vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne obtenues par le modèle.

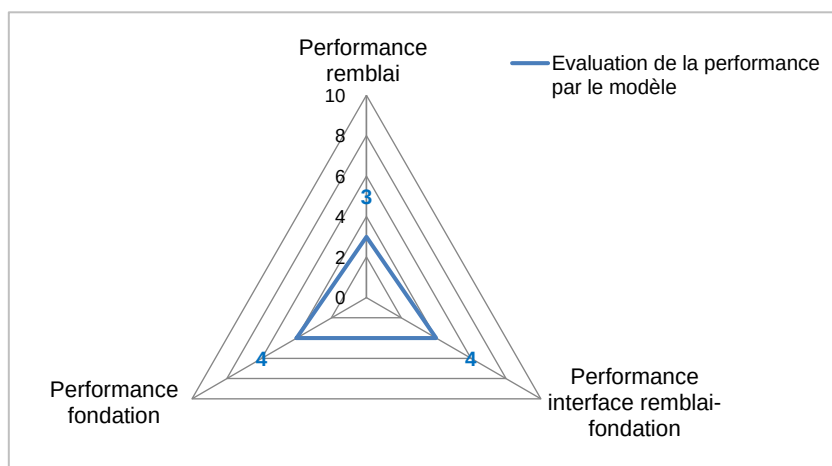


Figure 21. Evaluation de la performance du barrage de Grengia

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 que le barrage de Grengia présente une performance mauvaise à médiocre (Figure 21) vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Le composant remblai du barrage a une performance plus défavorable que l'interface et la fondation. Ceci pouvant être expliqué par la présence de végétation arborescente sur le composant remblai uniquement.

Pour le remblai, cette mauvaise performance s'explique par une étanchéité médiocre due à des caractéristiques intrinsèques du barrage (perméabilité du matériau et compactage : données utilisées pour l'évaluation de la perméabilité du remblai) assez faibles combinées à la présence d'une végétation dense 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. Egalement, elle s'explique par une 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 pour la retenue à niveau normal des eaux* » (résultant elle-même de la forte pente du talus aval). L'agrégation de la performance de ces fonctions nous donne une mauvaise évaluation de la performance du remblai vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne.

Pour la fondation, la performance médiocre s'explique par la note de 4 déclarée par les experts vis-à-vis de l'indicateur d'état « *Sensibilité de la fondation à l'érosion interne pour la retenue à niveau normal des eaux* ». Afin d'évaluer cet indicateur, les experts se sont appuyés sur le gradient admissible (calculé par les experts à partir de

la géométrie (largeur/pente) et de la résistance à l'érosion du matériau) qui est apparu comme médiocre. Elle s'explique également par la performance de la fonction « étanchéité » s'est avéré médiocre au regard de la « fuite » observée par les experts lors de l'évaluation des indicateurs d'état. Cet indicateur d'état direct donne alors l'évaluation de la fonction étanchéité (note obtenue de 5).

Pour l'interface remblai – fondation, la performance médiocre (note obtenue de 4) s'explique de la même manière que pour la fondation. D'une part, la présence d'une fuite à l'interface entraîne une performance médiocre de la fonction « étanchéité » et d'autre part, la « *Sensibilité de la fondation à l'érosion interne pour la retenue à niveau normal des eaux* » entraîne une performance médiocre de la fonction de « résistance à l'érosion interne ».

6.3. Synthèse des résultats pour les autres applications

Cette partie synthétise sous forme de tableaux les résultats obtenus pour les autres applications réalisées dans le cadre du projet RISBA (Figure 15). Un tableau par composant est présenté : remblai (Tableau 5), fondation (Tableau 6), et interface remblai-fondation (Tableau 7). Nous donnons :

- La dénomination du barrage évalué ;
- la partie de l'ouvrage concernée par la présence de végétation arborescente pour l'évaluation du remblai de l'ouvrage (Figure 6). (NB : pour l'évaluation de la fondation ou de l'interface, nous nous trouvons forcément en partie 4 s'il n'y a pas de végétation l'indicateur d'état « densité des individus » est égal à 10) ;
- la performance des différentes fonctions évaluées par le modèle en considérant la présence de végétation et sans la considérer (pour les fonctions étanchéité et drainage) ;
- la performance du composant vis-à-vis de l'érosion interne en considérant la présence de végétation puis sans la considérer.

Cette démarche permet de comparer l'influence de la présence de la végétation arborescente sur l'évaluation de la performance de chaque composant de l'ouvrage.

Nous rappelons que l'ANNEXE A fourni un bref descriptif de chaque barrage.

Composant	Dénomination du barrage	Zone évalué avec présence de végétation	Perf. étanchéité (végétation)	Perf. étanchéité (sans végétation)	Perf. drainage (végétation)	Perf. drainage (sans végétation)	Perf. de résistance à l'érosion interne	Perf. remblai (végétation)	Perf. remblai (sans végétation)
Remblai	Barrage d'O... – Italie	Parties 4 voire 3	2	7	/	/	4	3	5
	Barrage d'A... – Italie	Parties 2 et 3	4	8	/	/	9	9	9
	Barrage des G... - France	Parties 2 et 3	4	8	3	8	4	3	8
	Barrage de P..P.. – France	Parties 1 voire 2	3	8	/	/	6	3	8
	Barrage des B... – France	Parties 3 et 4	5	7	7	8	5	5	8
	Barrage des V... – France	Non évaluable par le modèle (pas d'informations suffisantes) mais évaluation de la végétation sur deux profils P1 (zone 2 et 3) et P2 (zone 4)							

Tableau 5. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « remblai » des ouvrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente

Composant	Nom du barrage	Type de barrage	Perf. étanchéité (végétation)	Perf. étanchéité (sans végétation)	Perf. drainage (végétation)	Perf. drainage (sans végétation)	Perf. de résistance à l'érosion interne	Perf. remblai (végétation)	Perf. remblai (sans végétation)
Fondation	Barrage d'O... – Italie	Remblai homogène sans drains ni instruments d'auscultation	2	6	/	/	4	3	4
	Barrage d'A... – Italie	Remblai avec masque amont en béton sans drains ni instruments d'auscultation	9	/	/	/	9	10	/
	Barrage des G... – France	Remblai avec masque amont en argile drainé mais sans instruments d'auscultation	/	6	/	8	4	/	8
	Barrage de P..P.. – France	Remblai homogène sans drains ni instruments d'auscultation	Non évaluable par le modèle (pas d'informations suffisantes)						
	Barrage des B... – France	Remblai zoné drainé (que le remblai) mais sans instruments d'auscultation	3	4	/	/	/	/	/
	Barrage des V... – France	Remblai zoné drainé mais sans instruments d'auscultation	Non évaluable par le modèle (pas d'informations suffisantes)						

Tableau 6. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « fondation » des ouvrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente

Composant	Nom du barrage	Type de barrage	Perf. étanchéité (végétation)	Perf. étanchéité (sans végétation)	Perf. drainage (végétation)	Perf. drainage (sans végétation)	Perf. de résistance à l'érosion de contact	Perf. remblai (végétation)	Perf. remblai (sans végétation)
Interface remblai-fondation	Barrage d'O... – Italie	Remblai homogène sans drains ni instruments d'auscultation	2	6	/	/	3	2	3
	Barrage d'A... – Italie	Remblai avec masque amont en béton sans drains ni instruments d'auscultation	4	8	/	/	9	9	9
	Barrage des G... - France	Remblai avec masque amont en argile drainé mais sans instruments d'auscultation	Pas d'évaluation de l'interface remblai-fondation car barrage drainé en remblai et en fondation						
	Barrage de P..P.. – France	Remblai homogène sans drains ni instruments d'auscultation	Non évaluable par le modèle (pas d'informations suffisantes)						
	Barrage des B... – France	Remblai zoné drainé (que le remblai) mais sans instruments d'auscultation	3	4	/	/	3 (à dire d'expert)	3	3
	Barrage des V... – France	Remblai zoné drainé mais sans instruments d'auscultation	Pas d'évaluation de l'interface remblai-fondation car barrage drainé en remblai et en fondation						

Tableau 7. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « interface remblai-fondation » des ouvrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente

Discussion autour des résultats obtenus

La prise en compte de l'élément « végétation arborescente » dans les modèles d'évaluation de la performance des barrages en remblai vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne permet une amélioration des modèles existants. Elle vient dégrader l'évaluation de la performance de chacun des composants de l'ouvrage comme nous pouvons par exemple l'observer lors de l'évaluation de la performance du remblai du barrage Français des G... qui passe d'une bonne performance sans prise en compte de la végétation à une mauvaise performance avec prise en compte de la végétation (Tableau 5). La prise en compte de la végétation arborescente dans les modèles permet donc de mieux représenter la réalité de barrages concernés par la présence de végétation et donc d'être plus sécuritaire vis-à-vis du risque lié à l'érosion interne. La robustesse de ces modèles a été vérifiée par le fait qu'ils sont capables de reproduire le raisonnement d'un expert. La procédure que nous avons suivie lors des applications nous permet de justifier ce point car il a été demandé aux ingénieurs experts de donner une note globale de chaque composant de l'ouvrage sans utilisation du modèle d'évaluation de la performance. La comparaison des résultats obtenus avec et sans utilisation du modèle sont quasiment comparables.

Les ingénieurs qui ont pu réaliser la notation des différents indicateurs d'état lors des sept applications ont montré un vif intérêt à cette méthode. L'utilisation de la grille de formalisation pour la notation de chacun des indicateurs d'état leur a été explicitée avant le début de l'évaluation et ils ont pu facilement s'approprier cet outil.

D'autre part, l'application du modèle sur les sept barrages en remblai par les ingénieurs a permis de :

- vérifier que l'utilisation des indicateurs d'état à évaluer était répétable et reproductible, cette propriété est renforcée par le fait qu'une partie des ingénieurs n'étaient pas familiers avec ce type de méthode d'évaluation ;
- vérifier les formalisations des agrégations des indicateurs d'état pour l'obtention de la performance de chaque fonction. Le résultat obtenu par le modèle doit correspondre au raisonnement de l'expert.

Toutefois, la formalisation de certains indicateurs a dû être améliorée. Ces indicateurs ont été identifiés car les écarts des notes entre les ingénieurs étaient trop importants ou bien, au vu de la difficulté pour les ingénieurs d'utiliser la grille de formalisation correspondante. Par exemple, les indicateurs d'état permettant l'évaluation de la fonction étanchéité - perméabilité du matériau, compactage,

granulométrie (issues des indicateurs de conception-réalisation dans le modèle de Curt (2008)) - ne sont pas toujours accessibles. Pour nos modèles, ces données permettent d'évaluer l'indicateur d'état « *perméabilité du remblai* » qui donne alors l'étanchéité intrinsèque du remblai. Si les informations relatives à cet indicateur d'état sont incomplètes ou non disponibles, l'ingénieur évalue cet indicateur d'état à dire d'expert. Une restitution des résultats a été réalisée avec le groupe d'expertise. Lors de cette séance de restitution, nous avons également retravaillé les règles expertes synthétisées sous la forme de table de vérité permettant les agrégations des performances de fonctions. En effet, ces tables de vérité expertes issues de Curt (2008) étaient peu sensibles au mécanisme de détérioration par érosion interne de conduit³. Elles avaient été établies plus spécifiquement pour l'évaluation de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne par suffusion⁴.

7. Conclusion

Au titre de l'action 2.6 du projet RISBA, des adaptations et améliorations de modèles préexistants d'évaluation de la performance des barrages en remblai vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne ont été réalisées. Ces dernières permettent maintenant d'évaluer la performance des barrages en remblai homogènes boisés, non équipés de drain et d'instruments d'auscultation, leur fondation et leur interface remblai-fondation. L'application de ces modèles sur des cas réels de barrages collinaires français et italiens a permis de démontrer la robustesse de ces modèles 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.

8. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Laurent Peyras et Rémy Tourment, membres du comité d'expertise d'Irstea, qui ont fortement contribué à l'élaboration des modèles d'évaluation de la performance des barrages collinaires vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne du fait de la présence de végétation arborescente. Nous remercions également les ingénieurs experts Italiens : Massimiliano Senesi et Davide Patrocco, qui ont réalisé les notations des indicateurs d'état lors de l'application sur les cas de

³ Erosion interne de conduit : érosion des particules tapissant les parois d'un conduit traversées par un écoulement préférentiel (Deroo and Fry, 2014).

⁴ Erosion interne par suffusion : érosion sélective des particules fines d'un matériau à granulométrie étalée à travers les pores et constriction formés par la matrice de particules plus grossières (Deroo and Fry, 2014)

barrages Italiens et enfin Marika Boutry qui, en tant qu'ingénieur junior, a réalisé les notations lors de l'application sur les cas de barrages Français.

9. Références

- Akerkar, R., Sajja, P., 2009. Knowledge-based systems. Jones and Bartlett, Sudbury, Mass.
- Bambara, G., Curt, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Zanetti, C., Vanloot, P., 2013. Characterization of woody roots located in dykes by near-infrared spectroscopy and chemometrics, in: A1 – Agriculture and Environment. Presented at the NIR2013 Proceedings, La Grande-Motte, France, pp. 274–279.
- Booker, J.M., McNamara, L.A., 2004. Solving black box computation problems using expert knowledge theory and methods. Reliab. Eng. Syst. Saf. 85, 331–340. doi:10.1016/j.ress.2004.03.021
- CFGB, 1997. Internal erosion: typology, detection, repair.
- Curt, C., 2008. Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances. Application aux barrages en remblai. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- Curt, C., 2013. Combining knowledge-based method and possibility-based approach for the assessment of dam performance, in: Dams: Structure, Performance and Safety Management. Nova Science Publishers, pp. 1–38.
- Curt, C., Peyras, L., Boissier, D., 2010. Méthode basée sur la formalisation et l'agrégation des connaissances pour l'évaluation de la performance des barrages. Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng. 25, 171–183.
- Da Silva Perez, D., Guillemain, A., Petit-Conil, M., 2007. Using near infrared and raman spectroscopy to predict wood and pulp properties. Atip Assoc. Tech. Ind. Papetière 61.
- Deroo, L., Fry, J.-J., 2014. Projet National ERINOH - Erosion interne - Approches et besoins en matière d'ingénierie (Rapport de recherche No. LC/10/ERI/68).
- Eriksson, D., Weiland, F., Hedman, H., Stenberg, M., Öhrman, O., Lestander, T.A., Bergsten, U., Öhman, M., 2012. Characterization of Scots pine stump–root biomass as feed-stock for gasification. Bioresour. Technol. 104, 729–736. doi:10.1016/j.biortech.2011.10.102
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. Can. Geotech. J. 37, 1000–1024. doi:10.1139/t00-030
- Gillon, D., Joffre, R., Dardenne, P., 1993. Predicting the stage of decay of decomposing leaves by near infrared reflectance spectroscopy. Can. J. For. Res. 23, 2552–2559. doi:10.1139/x93-316
- Jones, P.D., 2006. Rapid non-destructive estimation of Pinus taeda L. physical, morphological and chemical properties using near infrared spectroscopy (Doctor of Philosophy). The University of Georgia, Athens, Georgia.

- Kelley, S., Rials, T., Groom, L., Sluiter, A., 2004. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Sci Technol* 257–276.
- 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.
- Peyras, L., 2003. Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages. Développement de méthodes d'aide à l'expertise. (Science pour l'ingénieur, spécialité Génie Civil). Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, Clermont Ferrand.
- Serre, D., 2005. Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique. (Sciences de l'Information Géographique). Université de Marne-La-Vallée, Paris.
- Tsuchikawa, S., 2007. A Review of Recent Near Infrared Research for Wood and Paper. *Appl. Spectrosc. Rev.* 42, 43–71. doi:10.1080/05704920601036707
- Zanetti, C., 2010. Caractérisation du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues. Université de Provence, Aix-en-Provence.
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., 2013. Développement et décomposition des systèmes racinaires: risques induits pour les digues et solutions de gestion, in: 2ème Colloque National - Dignes 2013. Aix-en-Provence, France.
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Provansal, M., 2014. Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions. *Plant Soil* Accepted.
- Zwingelstein, G., 1995. Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels. Hermès.

10. Table des illustrations

Table des figures

Figure 1. Exemples de barrage italien (a) et français (b) soumis au développement d'une végétation arborescente – (photos : Mériaux P. (a) et Bambara G. (b), 2014)	5
Figure 2. Structure hiérarchique des modèles développés par Curt (2008).....	8
Figure 3. Echelle d'évaluation double retenue pour l'évaluation de la performance des barrages	9
Figure 4. Modèle hiérarchique pour l'évaluation de la performance du remblai – cas d'un barrage homogène équipé d'un drain et d'instruments d'auscultation (Curt, 2008)..	10
Figure 5. Méthodologie générale proposée pour l'action 2.6 du projet RISBA	12
Figure 6. Découpage d'un barrage en remblai homogène non équipé de drains, ni d'instruments d'auscultation.....	14
Figure 7. Mesure du collet d'un arbre (en rouge) pour la notation de l'indicateur d'état « volume racinaire par individu » - (photo : Bambara G., 2014)	18
Figure 8. Illustration du dispositif expérimental de Castérino lors du déterrage des échantillons de racines ligneuses après 4 ans de décomposition – (photo : Bambara G., 2013).....	21
Figure 9. Illustration des différentes étapes d'analyse en laboratoire : estimation de la densité par déplacement d'eau (a), broyage des échantillons puis tamisage pour obtention d'une sciure homogène (b), acquisition des spectres des échantillons de racines avec le spectromètre proche infrarouge (c) – (photos : Bambara G., 2013)	23
Figure 10. Plan 1/2 de l'ACP pour l'ensemble des échantillons (T0 = échantillons témoins non décomposé, T2 = après 2 ans de décomposition et T4 = après 4 ans de décomposition, n= 144, variance expliquée = 77 %)	24
Figure 11. Plan 3/6 de l'ACP pour le stade de décomposition T0 (bleu = chêne, rouge = frêne, vert = peuplier, violet = robinier faux-acacia, D3 = diamètre 3, D5 = diamètre 5, D8 diamètre 8, D10 = diamètre 10, n = 48, variance expliquée = 9%).....	25
Figure 12. Modèle d'évaluation de la performance du remblai d'un barrage en remblai homogène soumis à la présence de végétation arborée	29

Figure 13. Modèle d'évaluation de la performance de la fondation d'un barrage en remblai homogène soumis à la présence de végétation arborée	30
Figure 14. Modèle d'évaluation de la performance de l'interface remblai-fondation d'un barrage en remblai homogène soumis à la présence de végétation arborée	30
Figure 15. Les différents types de barrages collinaires en remblai évalués.....	32
Figure 16. Répartition homogène des arbres sur le couronnement aval du barrage de Groggia (Italie) - (<i>photo : Mériaux P., 2014</i>)	35
Figure 17. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage de Groggia (Italie) vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne - (<i>photo : Bambara G., 2014</i>).....	36
Figure 18. Evaluation individuelle par les experts des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité du barrage de Groggia.....	37
Figure 19. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage de Groggia	37
Figure 20. Souche de conifère morte (a) et souche de chêne ayant rejeté (b) sur le couronnement aval du barrage de Groggia (Italie) – (<i>photo : Bambara G., 2014</i>).....	39
Figure 21. Evaluation de la performance du barrage de Groggia.....	40
Figure 22. Vue depuis la crête du barrage d'O... (Italie) - (<i>photos : Bambara G., 2014</i>)..	53
Figure 23. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage d'O...vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. - (<i>photos : Bambara G., 2014</i>)	54
Figure 24. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage d'O.....	55
Figure 25. Evaluation de la performance du barrage d'O...	56
Figure 26. Vue depuis la crête du barrage d'A... (Italie) - (<i>photos : Bambara G., 2014</i>) ..	58
Figure 27. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion (a : profil vu depuis la crête ; b : profil vu depuis le pied aval ; c : arbre mort sur le profil analysé) – (<i>photos : Bambara G., 2014</i>)	59

Figure 28. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage d'A...	60
Figure 29. Evaluation de la performance du barrage d'A...	60
Figure 30. Vue depuis la crête du barrage des G... (France – 05) – (photo : Bambara G., 2014).....	62
Figure 31. Tapis drainant en pied aval du barrage des G... (France – 05) – (photo : Bambara G., 2014).....	63
Figure 32. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage des G... (France) vis-à-vis du mécanisme d'érosion – (photo : Bambara G., 2014)	64
Figure 33. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage des G.....	65
Figure 34. Evaluation de la performance du barrage des G... ..	66
Figure 35. Vue de la retenue de P.. P.. depuis la crête (France – 05) - (photo : Mériaux P., 2014).....	67
Figure 36. Souches en décomposition sur le couronnement amont et sur la crête de la retenue de P..P.. (France – 05) - (photo : Mériaux P., 2014).....	68
Figure 37. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage de P..P..	69
Figure 38. Evaluation de la performance de la fonction étanchéité avec et sans prise en compte de la végétation arborescente	69
Figure 39. Vue du barrage des B... depuis l'amont (France – 05) – (photo : Bambara G., 2014).....	71
Figure 40. Vue du talus aval et de la végétation arborescente en rive gauche du barrage des B... (France - 05) – (photo : Bambara G., 2014)	72
Figure 41. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage des B...	73
Figure 42. Evaluation de la performance du barrage des B.....	74

Figure 43. Vue du barrage des V... depuis la crête (France – 05) – (photo : Bambara G., 2014).....	75
Figure 44. Souche de frêne ayant rejeté (a) et arbre mature sur tapis drainant (b) du barrage des V... (France – 05) – (photo : Bambara G., 2014)	76
Figure 45. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la végétation arborescente (notation consensuelle) du barrage des V... sur les deux profils	77

Liste des tableaux

Tableau 1. Champs de la grille de formalisation des indicateurs d'état (Curt, 2008).....	9
Tableau 2. Extrait du tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs associés à chaque fonction pour la partie N°1 d'un barrage collinaire	15
Tableau 3. Grille de formalisation pour l'indicateur d'état « <i>densité des individus</i> ».....	17
Tableau 4. Indicateurs d'état de la fonction étanchéité pour les autres types de barrages étudiés	33
Tableau 5. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « remblai » des ouvrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente	42
Tableau 6. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « fondation » des ouvrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente	43
Tableau 7. Synthèse des résultats d'évaluation de la performance des fonctions et du composant « interface remblai-fondation » des ouvrages avec ou sans prise en compte de la végétation arborescente	44
Tableau 8. Notation des indicateurs d'état relatif à l'évaluation de la performance du remblai - (NR = non renseigné)	78
Tableau 9. Notation des indicateurs d'état relatif à l'évaluation de la performance de la fondation - (NR = non renseigné)	79
Tableau 10. Notation des indicateurs d'état relatif à l'évaluation de la performance à l'interface remblai-fondation - (NR = non renseigné)	80

11. ANNEXES

11.1. ANNEXE A : application sur les autres barrages

Evaluation du barrage d'O... (Italie)

Description du barrage

Le barrage d'O... est situé dans la région de Cunéo. Il a été construit en 1962 et a pour fonction l'irrigation des cultures de kiwis.

Ce remblai est de type homogène et a été réalisé en déblai - remblai et selon les dires des propriétaires un apport en argile a permis de compléter le matériau in-situ. L'alimentation de ce barrage collinaire est naturelle. Il ne possède pas de système de drainage. Il a une hauteur d'environ 9 m pour une capacité maximale avoisinant les 34 000 m³ (Figure 22). Le talus aval présente une cassure (pente de 50%) après le premier tiers du talus qui a lui une pente de 60%. A la suite de cette cassure, le talus aval a une pente avoisinant les 80 %.



Figure 22. Vue depuis la crête du barrage d'O... (Italie) - (photos : Bambara G., 2014)

Ce barrage a fait l'objet d'une étude de calcul de stabilité et d'essais géotechniques. Les résultats ont montré que les matériaux constitutifs ne présentaient pas de cohésion, ce qui équivaut au cas le plus pessimiste dans la prise en compte de la stabilité du barrage. D'autre part, deux piézomètres sont présents, l'un en milieu de talus aval et l'autre en pied de talus aval, ainsi que des bornes topographiques en crête mais les données relatives ne sont pas relevées. Nous considérons que ce barrage n'est pas équipé d'instruments d'auscultation.

De nombreuses souches mortes sont relevées (haut de talus aval, talus aval et pied de talus). Les essences présentes ne sont pas connues. Les propriétaires témoignent de la présence de robiniers faux-acacia coupés il y a environ 6 ans mais l'état de dégradation de certaines des souches laisse présager de coupes beaucoup plus anciennes.

Evaluation des indicateurs d'état

Après avoir parcouru l'ouvrage et pris connaissance de l'ensemble des informations disponibles, un profil a été choisi en pied aval de l'ouvrage (Fin de partie 3 et partie 4 - Figure 6). Ce profil a été retenu par le groupe d'experts car il est intéressant vis-à-vis de la présence de végétation arborescente (nombreuses souches en décomposition) (Figure 23).



Figure 23. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage d'O...vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. - (photos : Bambara G., 2014)

La végétation arborée présente en parties 3 et 4 de l'ouvrage est constituée par des souches mortes en décomposition. Ces souches sont nombreuses : entre 2 et 5 individus par 10 m². Le diamètre de ces individus est supérieur à 30 cm.

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction d'étanchéité du remblai de l'ouvrage (Figure 12). Des fuites ont été observées sur le remblai. La note que les experts ont attribuée à l'indicateur direct « Fuites » fournit donc l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité (note de 1) mais ils ont également noté les autres indicateurs (notamment ceux relatifs à la végétation) permettant l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité. Nous présentons sur la Figure 24, le diagramme radar illustrant les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les experts.

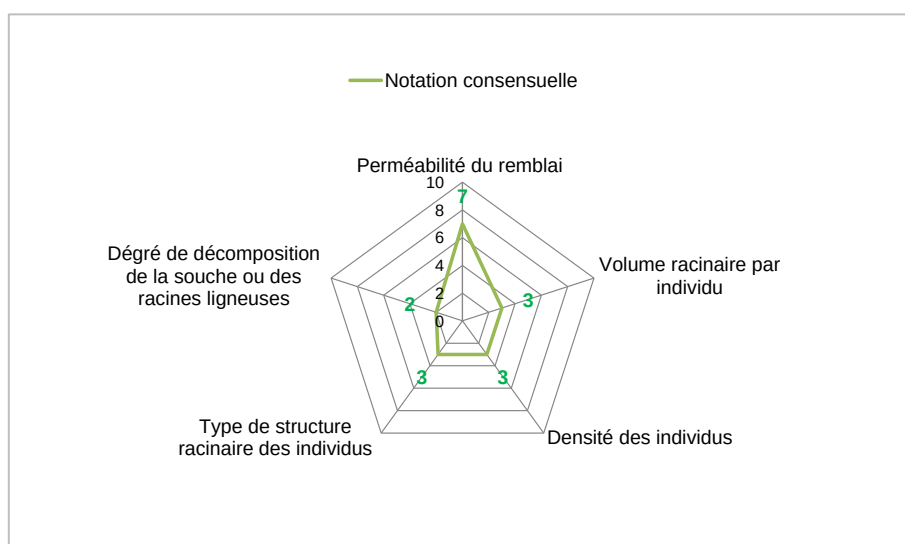


Figure 24. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage d'O...

L'évaluation de ces indicateurs par les experts a été réalisée selon la même procédure que pour le barrage de Grengia, c'est-à-dire conformément aux références établies lors de la formalisation des indicateurs d'état.

Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

La performance de la fonction étanchéité a été calculée par le modèle sans considérer l'indicateur d'état direct « Fuites » qui donne une note de 1 à cette fonction. Le modèle donne néanmoins une note de 2, soit une mauvaise performance de la

fonction étanchéité avec ou sans considération des fuites. Si nous n'avions pas considéré la présence de végétation dans le modèle, la performance de la fonction aurait été de 7 soit une performance tolérable. La prise en compte de la végétation permet donc d'évaluer cette fonction au plus proche de la réalité sachant que les experts ont considéré sans utilisation du modèle que la performance de cette fonction était mauvaise (note donnée de 2).

Nous présentons sur la Figure 25, les évaluations de la performance du remblai, de l'interface remblai-fondation et de la fondation meuble vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne obtenues par le modèle.

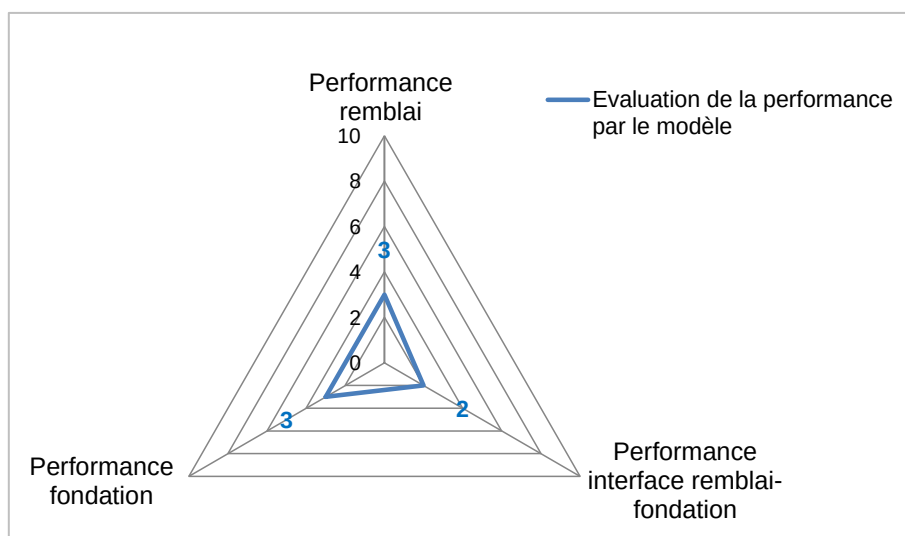


Figure 25. Evaluation de la performance du barrage d'O...

Nous notons que les notes de performances 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 que le barrage d'O... présente une mauvaise performance (Figure 25) vis-à-vis de ce mécanisme. Les trois composants du barrage ont une performance similaire.

Pour le remblai, l'interface et la fondation, cette performance mauvaise de 3 s'explique par la présence de nombreuses souches en décomposition sur le profil analysé qui dégrade considérablement la performance de la fonction étanchéité. Elle s'explique également par la performance médiocre de la fonction de résistance à l'érosion interne (note obtenue de 4 pour le remblai et la fondation et de 3 pour l'interface), qui une fois agrégée par le modèle à la performance de la fonction

étanchéité ramène à une mauvaise évaluation de la performance de chacun des composants vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne.

Evaluation du barrage d'A... (Italie)

Description du barrage

Le barrage d'A... est situé dans la région de Cunéo. Ce barrage a été construit en 1969, il appartient à une société productrice d'hydroélectricité.

Ce barrage en remblai dispose d'un masque amont en béton conventionnel. La cuvette est également en béton. La pente moyenne du talus aval est de 60 % (mesure au clisimètre lors de la visite). Il ne possède cependant aucun système de drainage, ni d'instruments d'auscultation relevés.

Une végétation arborescente existe sur le couronnement et le talus aval de l'ouvrage (Figure 26). Différentes essences sont présentes, disposées plus ou moins en alignement. Nous y rencontrons des saules, des érables, des pins, des peupliers matures ainsi que de nombreux rejets en crête, des bouleaux,... Nous observons certaines souches coupées et en état de décomposition plus ou moins avancé. Environ deux coupes par an sont réalisées en crête afin de dégager celle-ci de la végétation herbacée et arbustive.



Figure 26. Vue depuis la crête du barrage d'A... (Italie) - (photos : Bambara G., 2014)

Evaluation des indicateurs d'état

Après avoir pris connaissance de l'ensemble des informations disponibles, un profil a été choisi par les experts. Ce profil a été retenu car il est intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente et qu'il est situé sur une partie de l'ouvrage où le profil est plus étroit (Figure 27).



Figure 27. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion (a : profil vu depuis la crête ; b : profil vu depuis le pied aval ; c : arbre mort sur le profil analysé) – (photos : Bambara G., 2014)

La végétation arborée sur ce profil est présente sur le couronnement aval, le talus aval et le pied de talus aval. La densité des individus est élevée : de 2 à 5 individus par 10m². Il est difficile de percevoir la présence éventuelle de souches, étant donnée la forte présence de végétation arbustive sur le profil (Figure 27). Plusieurs espèces sont présentes, on y retrouve deux peupliers, des frênes, des érables...

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai de l'ouvrage (Figure 28). L'évaluation de cette fonction fait appel aux indicateurs d'état relatifs à un barrage en remblai avec un masque amont en béton conventionnel explicité dans le Tableau 4.

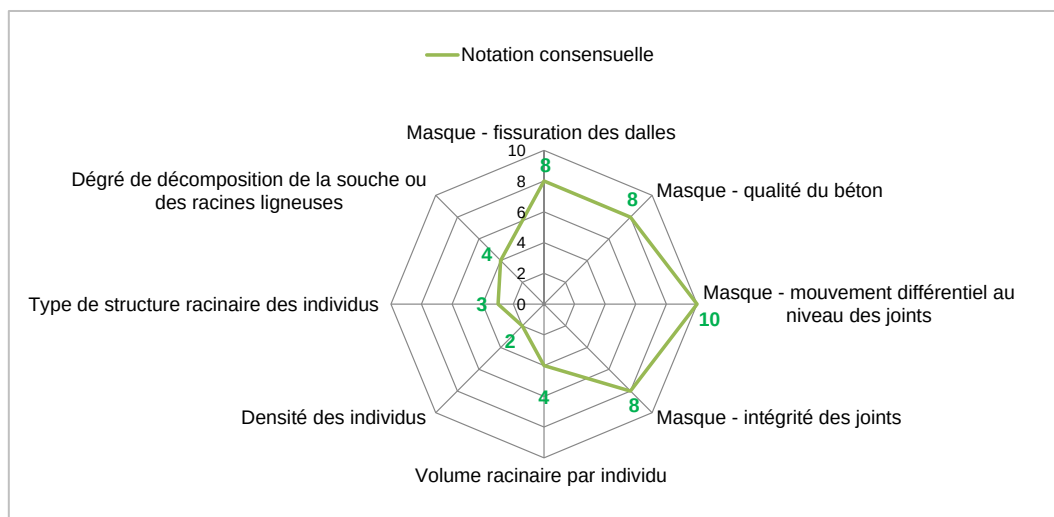


Figure 28. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage d'A...

L'évaluation de ces indicateurs par les experts a été réalisée conformément aux références établies lors de la formalisation des indicateurs d'état.

Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

La performance de la fonction étanchéité a été calculée par le modèle. La note obtenue est de 4.

Nous présentons sur la Figure 29 les évaluations de la performance du remblai, de l'interface remblai-fondation et de la fondation meuble vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne obtenues par le modèle.

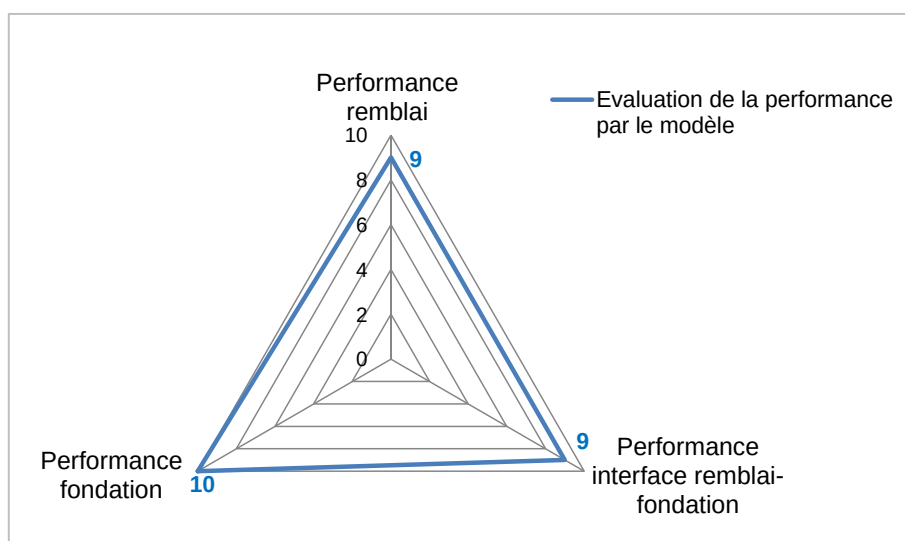


Figure 29. Evaluation de la performance du barrage d'A...

Pour le remblai, la performance est évaluée comme bonne, car même si la performance de la fonction étanchéité était évaluée comme médiocre au vu de la prise en compte de la présence de la végétation arborescente, la performance de la fonction de résistance à l'érosion interne a été évaluée comme bonne (note obtenue de 9). Ceci est lié au fait que ce barrage est étanché par un masque amont en béton, béton qui se prolonge au sein de toute la cuvette.

Pour la fondation et l'interface remblai-fondation la performance vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne est également évaluée comme bonne et ce, en prenant en compte cette cuvette bétonnée.

Nous notons 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.

Evaluation du barrage des G... (France)

Description du barrage

La retenue d'irrigation des G... est située à une altitude d'environ 1255 m dans les Hautes Alpes (Figure 30). Elle appartient à l'ASA de P..P... La première mise en eau de ce barrage date de 1968. Cet ouvrage est reconnu de classe D au sens du décret du 11/12/2007. La retenue est alimentée gravitairement grâce à une conduite prenant l'eau dans le thalweg au-dessus du hameau des G.... Le barrage a initialement été aménagé en déblai-remblai avec un approvisionnement ultérieur en matériau argileux pour étancher la retenue (masque amont en argile). Sa hauteur maximale de l'ordre de 6,5 m et sa largeur de crête est de 3,5 m. La capacité de la retenue est de 42 000 m³. Les pentes du talus amont et du talus aval sont respectivement de 50% et 60%. Ces mesures ont été effectuées au clisimètre lors de la visite.



Figure 30. Vue depuis la crête du barrage des G... (France – 05) – (photo : Bambara G., 2014)

Le barrage est équipé d'un tapis drainant (Figure 31), par contre aucune mesure d'auscultation n'est réalisée sur ce barrage.



Figure 31. Tapis drainant en pied aval du barrage des G... (France – 05) – (photo : Bambara G., 2014)

Une végétation arbustive et arborescente importante est présente sur l'ouvrage. Des travaux de déboisement avaient été réalisés début 2009. D'après le témoignage de l'auteur des coupes forestières, les essences principalement rencontrées furent : le peuplier, le chêne, le frêne et le saule. Malgré ces travaux, la végétalisation de cette retenue en 2014 est toujours importante (Figure 30), notamment en crête où une certaine densité de rejets de peupliers prolifère sur le couronnement amont et sur le couronnement aval (certains profils). Des souches mortes sont présentes (issues des travaux de déboisement de 2009), notamment sur le couronnement amont.

Evaluation des indicateurs d'état

Après avoir pris connaissance de l'ensemble des informations disponibles issues du dossier l'ouvrage et après témoignage du responsable de l'ASA de P..P., un profil a été choisi par les utilisateurs du modèle (1 ingénieur expert et un ingénieur d'étude). Ce profil a été retenu car il est intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente (Figure 32).



Figure 32. Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation de la performance du barrage des G... (France) vis-à-vis du mécanisme d'érosion – (photo : Bambara G., 2014)

La végétation arborescente est présente sur les couronnements amont et aval La densité des individus est élevée : de 2 à 5 individus par 10 m². On y retrouve des individus vivants dont beaucoup ayant rejeté ou d'autres morts (déboisement en 2009). Le diamètre des souches est supérieur à 30 cm.

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai de l'ouvrage. L'évaluation de cette fonction fait appel à des indicateurs d'état différents de ceux présentés sur la Figure 12 car il s'agit ici d'un barrage en remblai avec un masque amont en en argile. Les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de l'étanchéité intrinsèque à l'ouvrage se rapportent à une notation vis à vis du masque amont. Ils sont les suivants :

- Glissement du talus amont,
- Perméabilité du matériau du masque en argile,
- Gradient hydraulique,
- Fissures de retrait – dessiccation.

En fonction des informations disponibles, certains de ces indicateurs ne peuvent pas être évalués et, le cas échéant, on note « non renseigné » sur la fiche de notation. Le diagramme radar illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les deux ingénieurs (Figure 33).

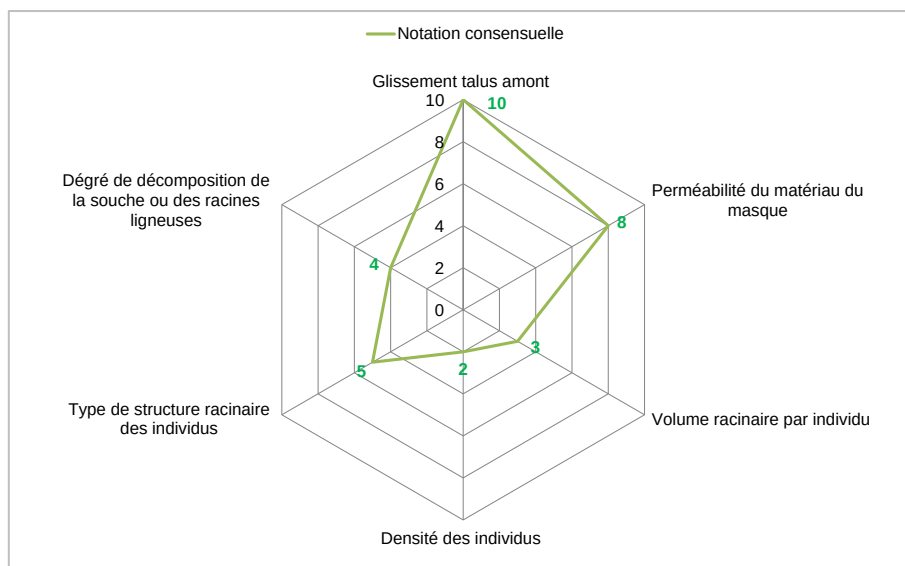


Figure 33. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage des G...

Un indicateur spécifique à la végétation arborescente intervient également dans l'évaluation de la fonction drainage. Rappelons que ce barrage est équipé d'un tapis drainant. Les experts ont donc noté les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la fonction drainage. Aucune fuite, ni indice de fuites n'ayant été observé sur le talus aval, les experts ont noté la fonction drainage sur la base de deux indicateurs d'état :

- Etat visuel à l'exutoire du drain. La note donnée par les ingénieurs est de 8 ;
- Etat visuel de l'environnement de l'exutoire du drain tapis granulaire ou du collecteur du drain. Cet indicateur d'état est relatif à la donnée « densité des individus » vis-à-vis du risque de colmatage du drain. La note donnée est de 3, soit présence de 2 à 5 individus par 10 m² dans l'environnement du tapis drainant.

L'évaluation de ces indicateurs par les experts a été réalisée conformément aux références établies lors de la formalisation des indicateurs d'état.

Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

La performance de la fonction étanchéité et de la performance de la fonction drainage ont été calculées par le modèle. Leurs notes respectives sont : 4 et 3.

La performance de la fonction de résistance à l'érosion interne a également été calculée par le modèle (note obtenue : 4).

Nous présentons sur la Figure 34, les évaluations de la performance du remblai et de la fondation (nous n'évaluons pas l'interface remblai-fondation dans le cas d'un ouvrage drainé).

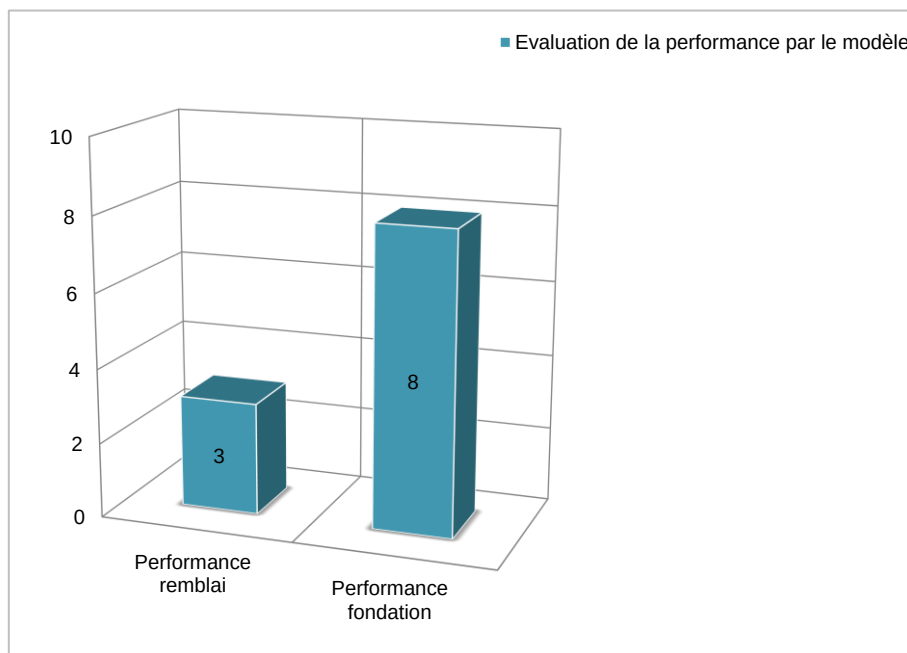


Figure 34. Evaluation de la performance du barrage des G...

La performance du composant fondation apparaît bien meilleure que la performance du remblai vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne (performance remblai : mauvaise ; performance fondation : bonne). Cette différence s'explique par le fait que la fondation n'était pas impactée par la présence de la végétation arborescente.

Evaluation du barrage de P..P.. (France)

Description du barrage

La retenue de P..P.. a été construite en 1966, elle appartient à l'ASA P.. P... Elle est alimentée de manière gravitaire par un lac situé en amont. C'est un barrage en remblai homogène réalisé en déblai remblai avec un matériau in-situ qui est globalement à tendance argileuse. Sa capacité est de 80 000 m³. Le profil de l'ouvrage est assez large avec une largeur de crête de 8 m et sa hauteur maximale est de 6 m (Figure 35). Les pentes relevées lors de la visite de terrain (au clisimètre) sont de 50% pour le talus aval et de 40% pour le talus amont. Cet ouvrage ne possède ni système de drainage, ni instruments d'auscultation.



Figure 35. Vue de la retenue de P.. P.. depuis la crête (France – 05) - (photo : Mériaux P., 2014)

Nous notons la présence de végétation arborescente sur et aux abords de l'ouvrage. La retenue a fait l'objet de coupes d'arbres il y a environ 10 ans et est à présent régulièrement entretenue à raison de deux coupes par an. Par contre, des souches qui n'ont pas fait l'objet d'extraction sont présentes sur le couronnement amont de l'ouvrage et sont dans un état de décomposition avancées (Figure 36).



Figure 36. Souches en décomposition sur le couronnement amont et sur la crête de la retenue de P..P.. (France – 05) - (photo : Mériaux P., 2014)

Evaluation des indicateurs d'état

Après avoir pris connaissance de l'ensemble des informations disponibles essentiellement suite au témoignage du responsable de l'ASA de P.. P.... (aucun dossier d'ouvrage à notre disposition pour ce barrage), un profil a été choisi par les utilisateurs du modèle (1 ingénieur expert et un ingénieur d'étude). Ce profil a été retenu car il est intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente. En effet, ce barrage relativement bien entretenu vis-à-vis de la végétation présente néanmoins sur un profil plusieurs souches en décomposition sur le couronnement amont et au milieu de la crête (Figure 36).

Nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai de l'ouvrage (Figure 12). Aucune fuite ou indice de fuite n'a été relevé par les ingénieurs. Le diagramme radar illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs d'état nécessaire à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité (Figure 37).

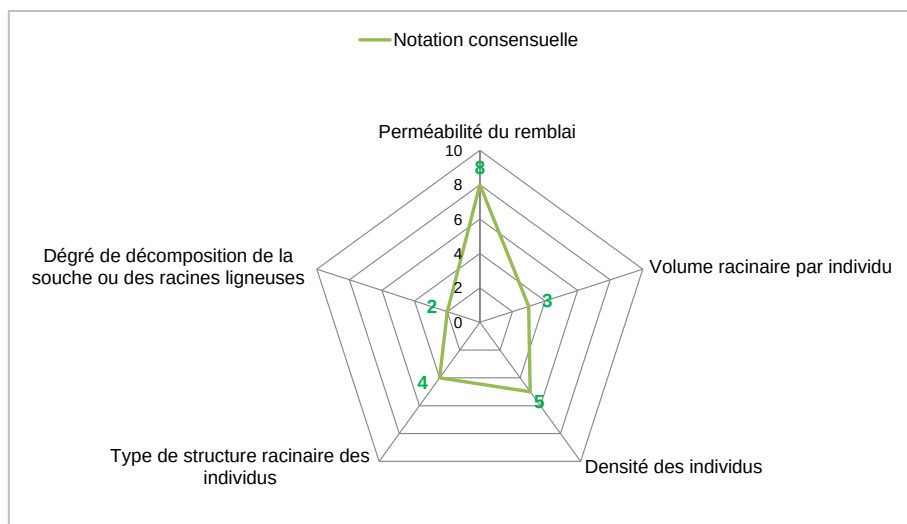


Figure 37. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage de P..P..

Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

La performance de la fonction étanchéité a été calculée par le modèle. La note obtenue est de 3 soit une mauvaise performance de cette fonction. Ce résultat a été fortement dégradé du fait de la présence de la végétation arborescente (Figure 38).

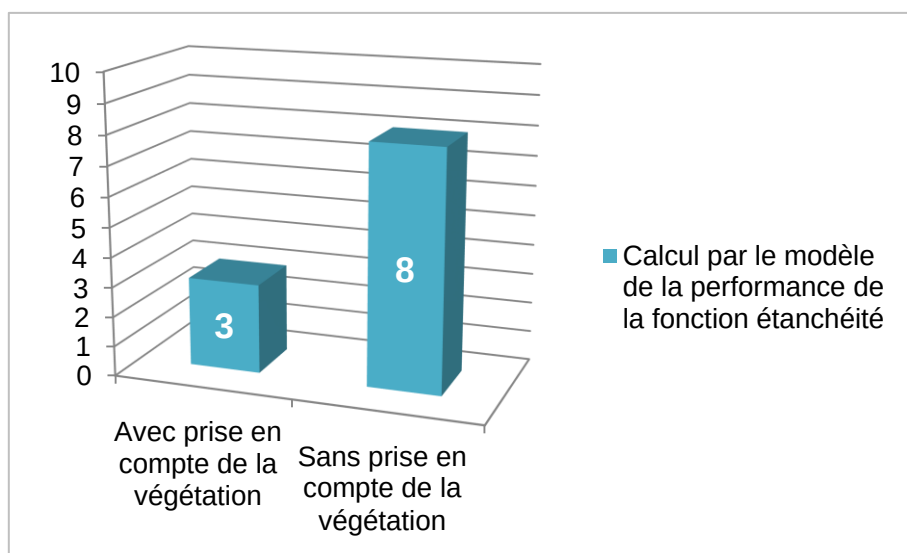


Figure 38. Evaluation de la performance de la fonction étanchéité avec et sans prise en compte de la végétation arborescente

L'évaluation de la performance du remblai vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne par le modèle indique une performance mauvaise (note obtenue de 3), bien que la performance de la fonction de résistance à l'érosion interne était tolérable (note de 6).

L'évaluation de la performance de l'interface remblai-fondation, ainsi que de la fondation vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne n'a pas pu être réalisée. En effet, les ingénieurs n'ont pas été en mesure de donner une note aux indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité de la fondation (perméabilité de la fondation) et de la fonction de résistance à l'érosion interne de la fondation (sensibilité à l'érosion interne de la fondation pour la retenue à niveau normal des eaux), faute d'informations suffisantes sur le barrage.

Evaluation du barrage des B... (France)

Description du barrage

Le barrage des B... a été construit en 1982. Propriété de l'ASA du R..., cette retenue a pour fonction l'irrigation pour l'agriculture du plateau du R... (Figure 39). Elle est alimentée par quelques sources en pied de versant et par le versant. C'est un ouvrage de classe C au sens du décret du 11/12/2007, avec une capacité maximale de 140 000 m³. Sa hauteur maximale est de 13 m et sa largeur de crête est d'environ 5 m.



Figure 39. Vue du barrage des B... depuis l'amont (France – 05) – (photo : Bambara G., 2014)

La pente du talus coté amont est de 58 à 65% et la pente du talus aval, qui est constituée de deux risbermes, est de 42 % à 58% (Figure 40).



Figure 40. Vue du talus aval et de la végétation arborescente en rive gauche du barrage des B... (France - 05) – (photo : Bambara G., 2014)

Ce barrage est constitué en remblai zoné avec un noyau étanche en argile accompagné d'une tranchée drainante inférieure. Le système de drainage permet de drainer uniquement le remblai, aucun instrument d'auscultation n'est présent.

La végétation est assez bien gérée sur cet ouvrage, le débroussaillage n'a pas été réalisé depuis 2 ans mais le propriétaire veille à éradiquer les buissons ayant tendance à devenir arbustifs. Seuls le pied de talus aval (en rive gauche) et l'appui rive gauche du barrage sont soumis au développement d'une végétation arborescente (Figure 40).

Evaluation des indicateurs d'état

Après avoir pris connaissance de l'ensemble des informations disponibles issues du dossier l'ouvrage et après témoignage du responsable de l'ASA du R..., un profil a été choisi par les utilisateurs du modèle. Ce profil a été retenu car il est intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente et qu'il se situe sur une zone sensible du barrage : l'appui du barrage avec le terrain naturel en rive gauche (Figure 40). L'évaluation du profil est réalisée essentiellement sur les parties 3 et 4 de l'ouvrage (Figure 6).

La densité des individus est élevée : de 2 à 5 individus par 10 m². On ne retrouve pas de souche en décomposition. Le diamètre de la souche des arbres est compris entre 10 et 15 cm.

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai de l'ouvrage. L'évaluation de cette fonction fait appel aux indicateurs d'état relatifs à un barrage en remblai zoné avec un noyau argile (Tableau 4).

En fonction des informations disponibles, certains de ces indicateurs ne peuvent pas être évalués et, le cas échéant, on note « non renseigné » sur la fiche de notation. Le diagramme radar illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les deux ingénieurs (Figure 41).

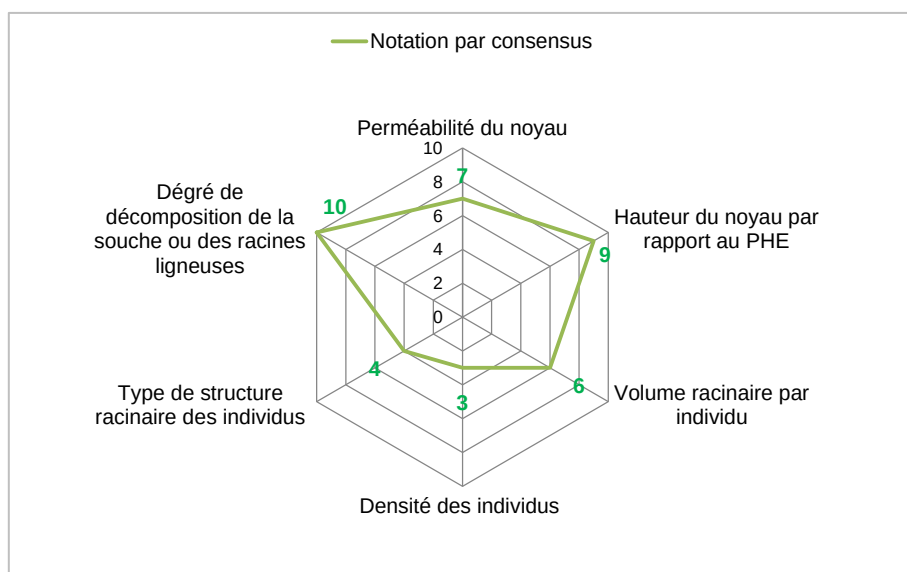


Figure 41. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle) du barrage des B...

L'évaluation de ces indicateurs par les experts a été réalisée conformément aux références établies lors de la formalisation des indicateurs d'état.

Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

L'évaluation de la fonction étanchéité a été calculée par le modèle en considérant, d'une part, les indicateurs relatifs à la végétation arborescente (note obtenue de 5), et d'autre part sans considérer la présence de la végétation (note obtenue 7). Nous remarquons que la végétation a pour ce barrage une influence un peu moins forte que pour les autres cas de barrages analysés, ce qui est dû au fait qu'aucune souche en décomposition n'est relevée sur le profil analysé.

La Figure 42 présente les évaluations de la performance du remblai et de l'interface remblai-fondation vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne obtenues par le modèle. La performance de la fondation meuble de ce barrage n'a pas pu être évaluée car les ingénieurs n'ont pas pu noter l'indicateur « sensibilité à l'érosion interne de la fondation pour la retenue à niveau normal des eaux ». Il n'a donc pas été possible de calculer la performance de la fonction de résistance à l'érosion interne de la fondation pour ce barrage. Pour l'interface, la fonction de résistance à l'érosion de contact remblai-fondation a été donnée à dire d'expert.

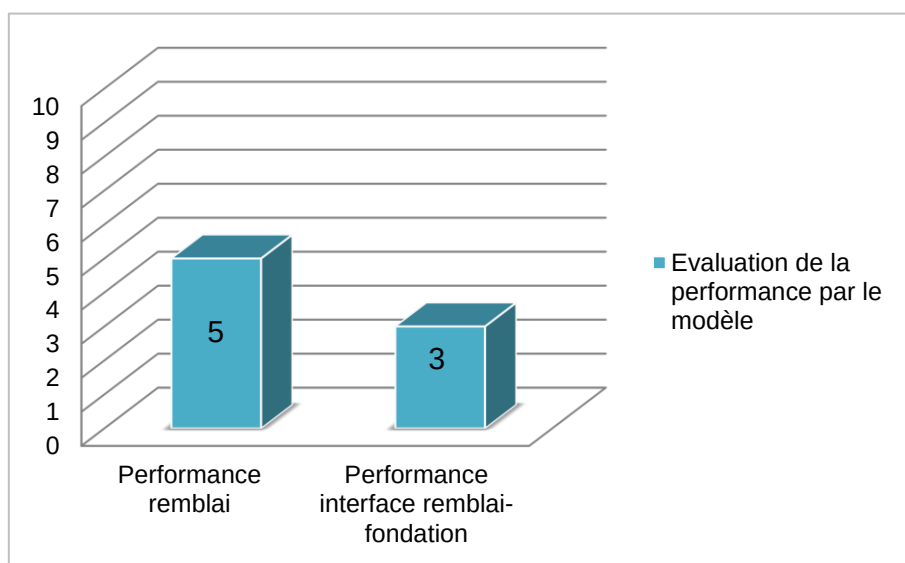


Figure 42. Evaluation de la performance du barrage des B...

Finalement pour ce barrage le remblai présente une performance médiocre vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne alors que l'interface affiche une performance mauvaise. Ceci s'explique par une mauvaise performance de la fonction étanchéité à l'interface et une mauvaise performance de la fonction de résistance à l'érosion de contact remblai-fondation.

Evaluation du barrage des V... (France)

Description du barrage

Le barrage des V... a été construit en 1976. Il est la propriété de l'ASA d'Irrigation par aspersion de S-L-C.

Ce barrage qui intercepte le cours d'eau Le Riou Gras est constitué d'un remblai avec un noyau étanche incliné. Sa hauteur au-dessus du terrain naturel est de 16m. Sa capacité maximale est de 100 000 m³. Les pentes de ses talus (mesuré au clisimètre le jour de la visite) sont d'environ 45 % pour le talus amont et 40 % pour le talus aval (Figure 43).



Figure 43. Vue du barrage des V... depuis la crête (France – 05) – (photo : Bambara G., 2014)

Cet ouvrage est équipé d'un système de drainage : un tapis drainant aval horizontal et deux tranchées drainantes aval et axiale, rive à rive en fondation. Trois collecteurs de drainage arrivent dans un regard en pied aval du remblai. Aucun instrument d'auscultation n'est présent sur l'ouvrage (ni topographique, ni piézométrique). Seuls les débits de fuites peuvent être suivis qualitativement grâce au regard rassemblant les collecteurs de drainage.

Une végétation arbustive est présente sur le couronnement amont. Un certain nombre de rejets de Frêne est présent sur le couronnement aval et le talus aval de l'ouvrage, leur souche peut dépasser un diamètre de l'ordre de 40 cm (Figure 44a).

Selon le témoignage du propriétaire, une coupe d'arbre a été réalisée en 2012. Nous retrouvons également aux abords du tapis drainant des arbres matures (Figure 44b).

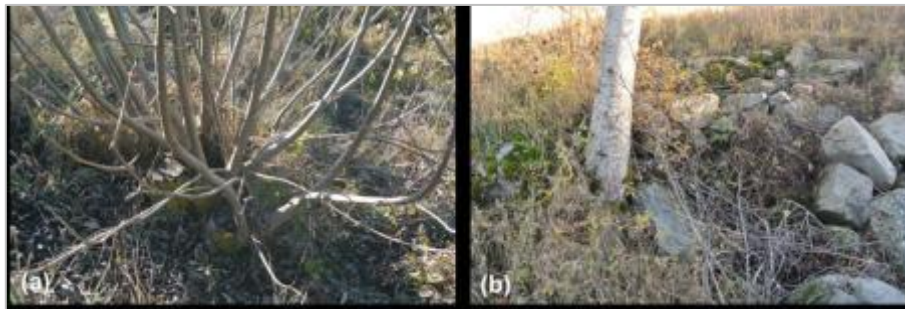


Figure 44. Souche de frêne ayant rejeté (a) et arbre mature sur tapis drainant (b) du barrage des V... (France – 05) – (photo : Bambara G., 2014)

Evaluation des indicateurs d'état

Aucune information n'a pu être récoltée concernant ce barrage. Seuls les indicateurs d'état visuels ont pu être notés. Les ingénieurs ont choisi deux profils différents présentant des caractéristiques intéressantes vis-à-vis du diagnostic de la végétation.

Le profil 1 présente un certain nombre de souches de frêne rejetant (Figure 44a) et le profil 2 présente des arbres matures présents au débouché du drain tapis (Figure 44b).

Le diagramme radar illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les ingénieurs pour les deux profils (Figure 45)

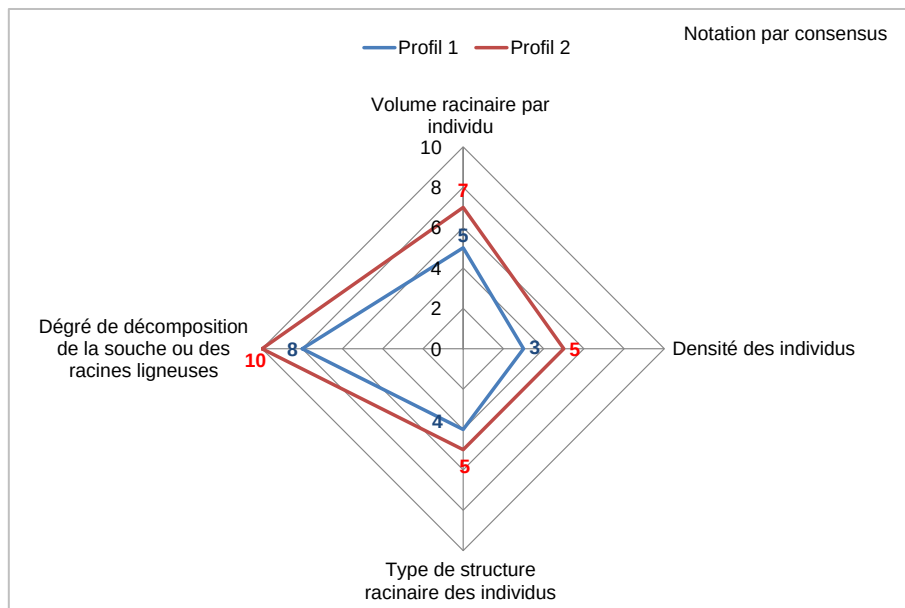


Figure 45. Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la végétation arborescente (notation consensuelle) du barrage des V... sur les deux profils

Evaluation de la performance des fonctions et de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne

L'évaluation de la performance des fonctions et donc de la performance de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne n'a pas pu être réalisée, étant donné le manque d'informations que les ingénieurs avaient concernant ce barrage.

11.2. ANNEXE B : notation des indicateurs d'état du barrage de Groggia

Notation des indicateurs d'état pour l'évaluation de la performance du barrage de Groggia (Italie)

Composant	Fonctions	Indicateurs d'état	Notes experts 1	Notes expert 2	Notes consensuelles
Remblai (zone 2 de l'ouvrage)	Etanchéité du remblai	Fuites ou indices de fuites	10	10	10
		Perméabilité du remblai	5	5	5
		Densité des individus	3	3	3
		Volume racinaire par individu	3	3	3
		Type de structure racinaire par individu	3	5	5
		Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu	6	4	5
	Résistance à l'érosion interne du remblai	Fontis - cône d'affaissement	10	10	10
		Tassement différentiels	NR	NR	NR
		Fuites localisées et chargées	10	10	10
		Sensibilité du remblai à l'érosion interne pour la retenue à niveau normal des eaux	4	4	4

Tableau 8. Notation des indicateurs d'état relatif à l'évaluation de la performance du remblai - (NR = non renseigné)

Composant	Fonctions	Indicateurs d'état	Notes experts 1	Notes expert 2	Notes consensuelles
Fondation (zone 4 de l'ouvrage)	Etanchéité de la fondation	Fuites ou indices de fuites	10	10	10
		Perméabilité de la fondation	6	6	6
		Densité des individus	10	10	10
		Volume racinaire par individu	/	/	/
		Type de structure racinaire par individu	/	/	/
		Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu	/	/	/
	Résistance à l'érosion interne du remblai	Fontis - cône d'affaissement	10	10	10
		Tassement différentiels	NR	NR	NR
		Fuites localisées et chargées	10	10	10
		Sensibilité du remblai à l'érosion interne pour la retenue à niveau normal des eaux	4	4	4

Tableau 9. Notation des indicateurs d'état relatif à l'évaluation de la performance de la fondation - (NR = non renseigné)

Composant	Fonctions	Indicateurs d'état	Notes experts 1	Notes expert 2	Notes consensuelles
Interface remblai-fondation (zone 4 de l'ouvrage)	Etanchéité du remblai	Fuites ou indices de fuites	10	10	10
		Perméabilité du remblai	6	6	6
		Densité des individus	10	10	10
		Volume racinaire par individu	/	/	/
		Type de structure racinaire par individu	/	/	/
		Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu	/	/	/
	Etanchéité de la fondation	Fuites ou indices de fuites	10	10	10
		Perméabilité de la fondation	6	6	6
		Densité des individus	10	10	10
		Volume racinaire par individu	/	/	/
		Type de structure racinaire par individu	/	/	/
		Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu	/	/	/
	Résistance à l'érosion de contact remblai-fondation	Fuites chargées – indices de fuites	10	10	10
		Sensibilité du remblai à l'érosion interne pour la retenue à niveau normal des eaux	4	4	4

Tableau 10. Notation des indicateurs d'état relatif à l'évaluation de la performance à l'interface remblai-fondation - (NR = non renseigné)