

## Réduire les incertitudes épistémiques pour une meilleure évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales

### Minimize epistemic uncertainties for a better assessment of the river dikes vulnerability

Bambara G., Curt C., Mériaux P. et Vennetier M.  
Irstea, centre d'Aix-en-Provence  
3275, Route de Cézanne, CS 40061,  
13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France.

Vanloot P.  
Aix-Marseille Université, LISA,  
EA4672, Equipe METICA, 13397  
Marseille Cedex 20, France.

#### Résumé

L'évaluation de la vulnérabilité ou de la performance (inverse de la vulnérabilité) des digues fluviales vis-à-vis des principaux mécanismes de détérioration est un enjeu majeur pour les gestionnaires en charge de leur sécurité. Cette évaluation leur permet de prioriser les interventions de maintenance nécessaires. Des modèles à base de connaissance pour l'évaluation de la performance des digues ont été proposés par Serre (2005) et Vuillet (2012). Nous proposons dans cette étude de prendre pour base le modèle de Vuillet (2012) et de l'améliorer afin d'obtenir un modèle d'évaluation complet et robuste. Ce modèle comprend trois niveaux hiérarchiques : l'indicateur de vulnérabilité, les critères fonctionnels et les indicateurs d'état. Actuellement, une liste d'indicateurs d'état non formalisés est fournie à l'utilisateur pour réaliser l'évaluation de chacun des critères. Notre méthodologie repose sur trois points principaux : inventorier l'ensemble des indicateurs d'état nécessaires et suffisants pour l'évaluation de chacun des critères, en ajoutant des indicateurs à la liste précédemment établie, notamment les indicateurs relatifs à la présence de végétation arborescente sur ou aux abords de l'ouvrage ; formaliser chaque indicateur afin d'obtenir une description non ambiguë des mesures et évaluations puis les agréger pour obtenir l'évaluation de chaque critère fonctionnel relatif au mécanisme de détérioration considéré ; développer des méthodes permettant de renseigner les indicateurs lors de la phase d'utilisation du modèle : certaines données n'étant pas directement accessibles comme par exemple le degré de décomposition des systèmes racinaires après la mort d'un arbre.

#### Summary

The vulnerability assessment or performance (inverse of vulnerability) of river dikes with respect to deterioration mechanisms is a major challenge for managers in charge of their security. This assessment allows them to prioritize maintenance. Knowledge based models have been proposed by Serre (2005) and Vuillet (2012) for assessing the performance of dikes. We propose in this study, to take as a base the model Vuillet (2012) and to improve it to obtain a complete and robust model. This model has three hierarchical levels: vulnerability indicator, functional criteria and status indicators. Currently, a list of non-formalized status indicators is provided to the user of the model to carry out the evaluation of each criterion. Our methodology is based on three main points: inventory all status indicators, necessary and sufficient for the evaluation of each criterion, inclusion of indicators at the list previously established, including indicators related to the presence of woody vegetation on or near the structure; formalization of each indicator to obtain an unambiguous description of the measures and assessments; aggregation of indicators to obtain the evaluation of each functional criterion related to the deterioration mechanism considered; development of methods to assess the indicators during the use phase of the model: some data are not directly accessible, such as the degree of root systems decomposition after the death of a tree.

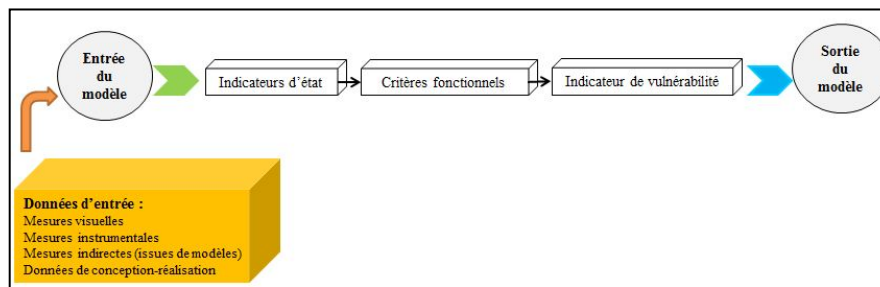
---

#### Introduction – Positionnement du problème

On compte en France près de 10 000 km de digues fluviales qui ont une fonction essentielle : protéger la population et ses biens en cas de crue. La défaillance de cette fonction, due à une rupture totale de l'ouvrage de génie civil, peut entraîner des conséquences humaines et économiques dramatiques. Un tel accident peut résulter de différents scénarios de défaillance correspondant à l'enchaînement d'un ou plusieurs mécanismes de détérioration tels que la surverse, l'érosion externe ou les affouillements, l'érosion interne et le glissement. Par exemple, le mécanisme de détérioration par érosion externe peut être provoqué par les effets des courants hydrauliques qui entraînent une partie du matériau de la digue. Il en résulte un raidissement de la pente locale qui associé à un affaiblissement des caractéristiques mécaniques du remblai favorisera un glissement.

Il est donc essentiel pour les gestionnaires de digues de disposer de méthodes et outils leur permettant des prises de décision efficaces afin de réaliser les travaux de maintenance nécessaire à la sécurité de leurs ouvrages. Ces décisions reposent sur une évaluation de la vulnérabilité ou de la performance (inverse de la vulnérabilité) de l'ouvrage. Des modèles à base de connaissances pour l'évaluation de la performance des digues ont été proposés par Serre (2005) et Vuillet (2012).

Le modèle de Vuillet (2012) propose une structure hiérarchique comportant trois niveaux (cf. figure 1). L'indicateur de vulnérabilité vis-à-vis d'un mécanisme de détérioration donné est la sortie du modèle. Il est obtenu par agrégation de critères fonctionnels eux même évalués à partir d'indicateurs d'état qui sont ainsi les entrées du modèle. Ces derniers sont issus d'une ou plusieurs données d'entrée, relevant de mesures visuelles, instrumentales, indirectes ou issues du dossier de conception-réalisation de l'ouvrage.



**Figure 1.** Structure hiérarchique générale du modèle d'évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales (Vuillet, 2012)

Ainsi, pour le mécanisme de détérioration par érosion interne auquel nous nous intéressons plus particulièrement dans cette communication, les critères fonctionnels sont par exemple, « perméabilité du corps de digue », « Résistance du corps de digue à l'érosion interne », « singularité dans le corps de digue ». Les indicateurs d'état renseignant ces critères fonctionnels sont par exemple, « perméabilité du matériau », « fuites »...

Actuellement, une liste d'indicateurs d'état, non formalisés est fournie à l'utilisateur pour réaliser l'évaluation de chacun des critères. Chacun de ces critères est alors évalué de manière probabiliste par l'utilisateur qui les renseigne directement sous la forme de distribution de probabilité (la valeur la plus vraisemblable du critère est élicitée par le mode et l'intervalle des valeurs vraisemblables du critère, avec les quantiles 5% et 95%, permettant d'évaluer sa dispersion). Cette démarche d'utilisation des probabilités subjectives permet de prendre en compte l'incertitude entachant chacun des critères lors de leur évaluation de manière globale.

Actuellement, la démarche d'évaluation est par conséquent explicitée pour le niveau le plus haut du modèle mais le passage indicateurs d'état – critère fonctionnel se fait uniquement à dire d'expert selon un mode "boîte noire" à partir de variables non formalisées. Ceci peut entraîner des problèmes de répétabilité ou de reproductibilité de l'évaluation (Curt et al., 2010). En effet, les indicateurs n'étant pas décrits notamment par une définition mais l'étant seulement par un nom, chacun peut donner à cet indicateur, une interprétation différente : il n'y a aucune garantie que la dimension évaluée soit la même pour chaque évaluateur. Par ailleurs, sans aucune échelle de notation décrivant le champ possible connu des notes pour cet indicateur, chaque évaluateur crée sa propre échelle de notation qui ne couvre que l'étendue des cas qu'il aura rencontrés ou dont il aura pris connaissance. Enfin, il est important de formaliser les agrégations qui permettent le passage des indicateurs d'état à un critère fonctionnel pour les mêmes raisons : chaque évaluateur peut avoir son propre modèle d'évaluation en fonction notamment de son expérience passée, du nombre et de la variété des cas qu'il a rencontrés.

La modélisation proposée doit considérer l'ensemble des facteurs de fragilité qui contribuent à la réalisation des dommages en cas d'occurrence d'un aléa extérieur comme les crues. Ainsi, on identifie quatre principaux facteurs pouvant influencer la vulnérabilité d'une digue fluviale :

- Les facteurs géométriques (la taille de l'ouvrage, ses pentes de talus...),
- Les facteurs géotechniques (le type de matériaux constitutifs, sa granulométrie, sa teneur en eau...),
- Les facteurs hydrauliques (la charge hydraulique que peut subir l'ouvrage en cas de crue),
- Les facteurs biologiques (la présence de terriers d'animaux fouisseurs et la présence de végétation).

Parmi ces facteurs de fragilité et plus particulièrement parmi les facteurs biologiques, la présence de végétation arborescente sur ou aux abords de l'ouvrage pose de nombreux problèmes car elle peut favoriser l'apparition de mécanismes de détérioration à court, moyen et long termes (Mériaux et al., 2006). D'une part, la présence d'arbres favorise la concentration des écoulements en cas de crue et provoque des affouillements autour de la zone concernée. D'autre part, à la mort de l'arbre, la décomposition de son système racinaire favorise, selon la nature du sol soit la création de conduits à travers la digue, susceptibles d'initier une érosion interne de conduit, soit l'augmentation de la perméabilité globale dans le remblai, par la décomposition d'un volume racinaire important (Zanetti et al., 2008). Or, le modèle actuellement développé prend en compte l'aspect végétation mais seulement de manière partielle : des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborée doivent être proposés. Par ailleurs, 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 (typiquement l'objet de la mesure est à l'intérieur de la digue) : ceci conduit là aussi à générer des incertitudes.

Ainsi, les deux limitations que sont d'une part, l'absence de formalisations des indicateurs et des agrégations et d'autre part, la difficulté de mesure de certaines informations vont entraîner des incertitudes et donc peut entraîner des actions correctives plus drastiques qu'elles ne devraient l'être pour respecter le principe de précaution. Ces incertitudes relèvent d'un manque de connaissance et non d'une variabilité naturelle résultant de phénomènes stochastiques. Ce sont donc des incertitudes épistémiques dites réductibles (Bouchon-Meunier, 1999). Pour ce faire, des méthodes particulières doivent être développées. Dans cet article, nous proposons des approches permettant une réduction des incertitudes épistémiques pour une meilleure évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales. Deux grands types d'approches sont mises en œuvre dans notre travail. En premier lieu, la formalisation des indicateurs relève typiquement de l'explicitation de connaissances détenues par des experts implicitement utilisées dans les résolutions de problèmes et de prise de décision. 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 experts du génie civil réalisant régulièrement des missions d'appuis techniques pour le compte du ministère de l'environnement. En deuxième lieu, un développement de mesures adaptées est nécessaire pour l'évaluation de caractéristiques importantes mais actuellement impossibles à mesurer ou à estimer. Deux types d'approches sont envisageables : l'adaptation et la création de capteurs ou la reconstruction de données manquantes au travers de la mise en place de mesures indirectes ou de capteurs logiciels. Dans notre cas, nous nous sommes tournés vers la mise en place d'une mesure indirecte.

## Réduire les incertitudes épistémiques en formalisant les indicateurs d'état

### 1 Méthodes

L'identification puis la formalisation des indicateurs d'état sont des étapes essentielles pour la construction du modèle d'évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales. Actuellement, une liste d'indicateurs d'état non formalisé est proposée aux utilisateurs du modèle d'évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales. Nous cherchons dans un premier temps à compléter cette liste notamment en identifiant les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente. Afin de déterminer ces indicateurs 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 d'une analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). Dans un deuxième temps, il s'agit de formaliser l'ensemble des indicateurs nécessaires à l'évaluation des critères. En effet, la liste existante permet aux utilisateurs d'évaluer les critères fonctionnels relatifs à un mécanisme de détérioration donné. Les indicateurs proposés résultent d'une ou plusieurs mesures visuelles, instrumentales et/ou indirectes. Or, la difficulté posée par ce type de mesures est qu'elle est liée, tant qu'elle n'a pas été formalisée, à chaque utilisateur : chacun d'eux a pu en définir les qualificatifs, les mesurer sur une échelle variable... Un indicateur d'état a été défini par Curt et al. (2010) comme une information ou une donnée formalisée de manière à rendre son utilisation répétable et reproductible. L'objectif de la formalisation est d'obtenir une description non ambiguë des mesures et des évaluations. Il a été montré qu'une grille en 5 champs permettait d'atteindre cet objectif (Curt, 2010) : nom de l'indicateur, définition, échelle de mesure et références (différents états possibles de l'indicateur), caractéristiques spéciales (lieu d'échantillonnage, lieu de la mesure) et les caractéristiques temporelles (pas de temps pour la mesure de l'indicateur et l'analyse de la tendance de cette mesure) (Curt, 2010). Cette grille permet de formaliser les différents types de mesures : observations visuelles, mesures instrumentales, données de conception ou réalisation, données issues de modèles.

L'étape de formalisation des indicateurs nécessite de choisir une échelle de mesure ainsi que des références sur cette échelle. Nous proposons d'utiliser une échelle d'évaluation double c'est-à-dire une échelle ordinale qui se caractérise par l'ordonnement des catégories en fonction d'un critère d'intensité et une échelle d'intervalle qui permet de travailler sur des grandeurs numériques continues (cf. figure 2). 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. Les choix de l'échelle et des références sont essentiels dans l'objectif de réduction des incertitudes épistémiques en ancrant la mesure dans un référentiel.

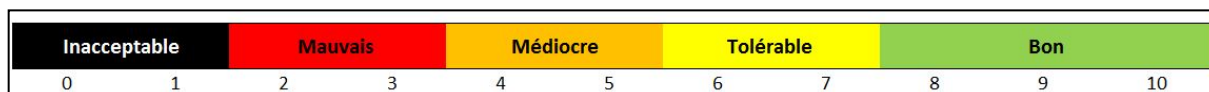


Figure 2. Echelle de mesure double retenue pour l'évaluation de la vulnérabilité des digues de protection

### 2 Résultats

Notre problématique étant de considérer la présence d'une végétation arborescente sur la digue, une analyse fonctionnelle externe centrée sur l'élément extérieur « végétation arborescente » a été réalisée. Ce travail préliminaire d'énumération permet de cerner les différentes contraintes liées à la présence de la végétation sur l'ouvrage, notamment en fonction de son positionnement sur l'ouvrage. De plus, nous avons pris en compte dans notre analyse deux types de remblai :

- un remblai constitué de sols fins et cohésifs (sols argileux, limoneux ou sableux) caractérisé par des valeurs de perméabilité faibles ;
- un remblai constitué de sols granulaires (sols limoneux graveleux, sableux graveleux, sableux caillouteux, graveleux caillouteux) caractérisés par des valeurs de perméabilité élevées.

En effet, selon le type de sol et la position de l'arbre sur la digue, soit son accès à l'eau, les spécificités du système racinaire de l'arbre seront différentes.

Nous avons complété l'analyse fonctionnelle du système de digue en remblai homogène réalisé par Vuillet (2012), ce qui nous a permis d'identifier les fonctions de résistance que doit posséder la digue vis-à-vis des contraintes liées à la présence de végétation ligneuse. Trois types de fonctions sont concernés : « résister aux sollicitations mécaniques », « résister à l'érosion interne », « limiter les flux hydrauliques ».

Une AMDE spécifique à la problématique de la végétation arborée présente sur les digues en remblai a ensuite été réalisée. Cette AMDE a permis d'identifier les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente. Il en résulte un tableau synthétique rassemblant composant, fonctions et indicateurs associés (cf. table 1).

N°	Composant	Fonctions	Indicateurs
1	Couronnement amont	<p><b>1 – Résister aux sollicitations mécaniques</b></p> <p>1. résister à la déstructuration du remblai</p> <p>2. résister à l'affouillement</p> <p>3. résister à l'érosion externe</p> <p><b>2 – limiter les flux hydrauliques</b></p> <p>1. limiter les eaux d'infiltration sur le couronnement amont</p>	<p>Largeur / pente VS densité des individus au m<sup>2</sup></p> <p>Volume de sols déstructuré et / ou volume arraché</p> <p>Port des arbres</p> <p>Volume racinaire par individu</p> <p>Densité des individus</p> <p>Volume racinaire par individu</p> <p>Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu</p>

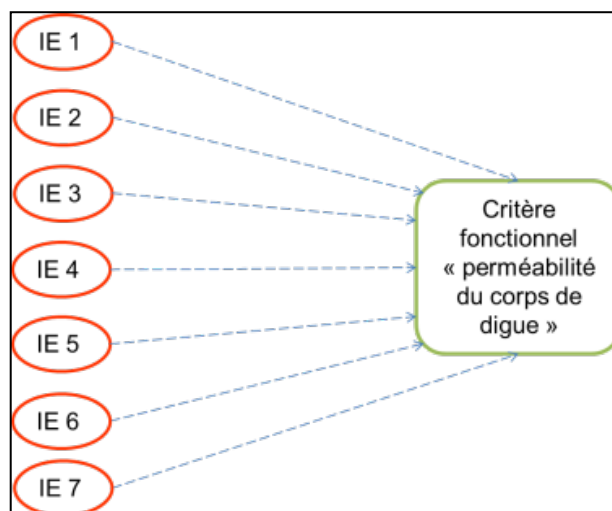
**Table 1.** Extrait du tableau de synthèse de l'AMDE rassemblant les indicateurs d'état associés à chaque fonctions (et sous-fonctions) pour la partie de digue N°1

Le déploiement des méthodes de la sûreté de fonctionnement nous a permis d'identifier 7 indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente.

Parmi ces 7 indicateurs, certains participent à l'évaluation du critère « perméabilité du corps de digue » auquel nous nous intéresserons plus particulièrement dans cet article, ce critère étant lui-même nécessaire à l'évaluation de la vulnérabilité d'un tronçon de digue homogène vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne.

7 indicateurs d'état (IE) ont été identifiés par le groupe d'expertise comme étant nécessaires à l'évaluation de ce critère (cf. figure 3) :

- IE1 – Fuites (eau) ou indices de fuites (zones humides) ;
- IE2 – Perméabilité du matériau ;
- IE3 – Géométrie de la digue ;
- IE4 – Volume racinaire par individus ;
- IE5 – Densité des individus ;
- IE6 – Types de structure racinaire des individus ;
- IE7 – Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu.



**Figure 3.** Indicateurs d'état nécessaires pour l'évaluation du critère fonctionnel « perméabilité du corps de digue »

Chacun de ces indicateurs d'état a été formalisé en utilisant la grille de formalisation. Quatre d'entre eux sont particuliers à la présence de végétation (et font partie de l'ensemble des indicateurs issus de l'AF et de l'AMDE « végétation »). Ces 7 indicateurs permettant de qualifier le critère « Perméabilité » relèvent soit d'observations visuelles (IE1, IE4, IE5, IE6), soit de données de conception-réalisation (IE2, IE3). Par contre, pour ce qui concerne IE7, il n'est pas possible de faire une observation in situ de cet indicateur et actuellement aucun capteur n'est capable de mesurer cette caractéristique. Nous y reviendrons dans la dernière section de cet article.

Nous présentons ci-dessous, la grille de formalisation de l'indicateurs IE5 « *densité des individus* » en exemple (cf. table 2).


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

Table 2. Grille de formalisation pour l'indicateur visuel « densité des individus »

## Réduire les incertitudes épistémiques en formalisant les agrégations des indicateurs d'état

### 1 Méthodes

La dernière étape de construction du modèle d'évaluation des critères fonctionnels est la recherche de structures d'agrégation adéquates permettant d'évaluer chaque critère fonctionnel à partir des indicateurs concernés. En dehors du cas des indicateurs directs, comme par exemple l'indicateur « *fuites ou indices de fuites* » pour le critère fonctionnel « *perméabilité du corps de digue* », qui permettent d'évaluer directement le critère analysé, nous utilisons des modèles d'agrégation décrits lors des séances de recueil (cf. Figure 4). Un modèle d'agrégation est décrit pour chaque critère fonctionnel. Ces travaux relèvent du champ des systèmes à base de connaissances (Akerkar and Sajja, 2009; Booker and McNamara, 2004). Ce type de modèle a pour intérêt d'être proche du raisonnement réalisé par les experts que nous cherchons à mimer et d'être lisible pour les futurs utilisateurs. Ils ont également l'avantage de passer d'un modèle boîte noire à un modèle de type boîte blanche en explicitant les connaissances. A partir de l'analyse experte nous avons déterminé des règles d'agrégation des indicateurs d'état qui sont synthétisées sous la forme de tables de vérité (cf. figure 5).

Afin de valider la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état, des simulations sur des cas simplifiés présentés dans un format d'une demi-page environ et inspirés de cas réels sont réalisés. Environ trois à quatre simulations pour l'évaluation d'un critère fonctionnel sont produites. Une description des ouvrages est donnée aux experts pour chaque cas. Une partie des cas fait l'objet d'une notation des experts par consensus pour l'ensemble des indicateurs d'état. Cette procédure permet de valider avec les experts le modèle d'agrégation produit pour l'évaluation d'un critère fonctionnel. Une dernière simulation fait l'objet d'une notation individuelle des experts et ce, afin de tester la répétabilité et la reproductibilité de l'utilisation des indicateurs d'état, c'est-à-dire pour valider les formalisations réalisées.

### 2 Résultats

Dans la continuité de notre exemple d'identification et de formalisation des indicateurs d'état nécessaire à l'évaluation du critère fonctionnel « *perméabilité du corps de digue* », nous présentons ici leurs structures d'agrégation.

Le critère fonctionnel « *perméabilité du corps de digue* » est évalué directement à partir de la note de l'indicateur d'état direct IE1 « *Fuites (eau) ou indices de fuites (zones humides)* » si celle-ci est, conformément aux références établies lors de la formalisation, considéré comme étant « médiocre ». Si l'indicateur IE1 est évalué comme étant « bon », le critère fonctionnel est évalué à partir de la structure d'agrégation développée à partir de l'analyse experte (cf. figure 4).

Nous avons alors déterminé des règles d'agrégation pour les indicateurs IE2 à IE7 qui sont synthétisées sous la forme de tables de vérité expertes (cf. figure 5). Notre choix d'utilisation de plusieurs tables de vérité se justifie au regard du nombre d'indicateurs à agréger pour l'évaluation du critère fonctionnel « *perméabilité du corps de digue* ». Les tables pour obtenir la perméabilité intrinsèque du corps de digue et une estimation de la propension aux écoulements sont définies et une dernière table vise à évaluer le critère « *perméabilité du corps de digue* ».



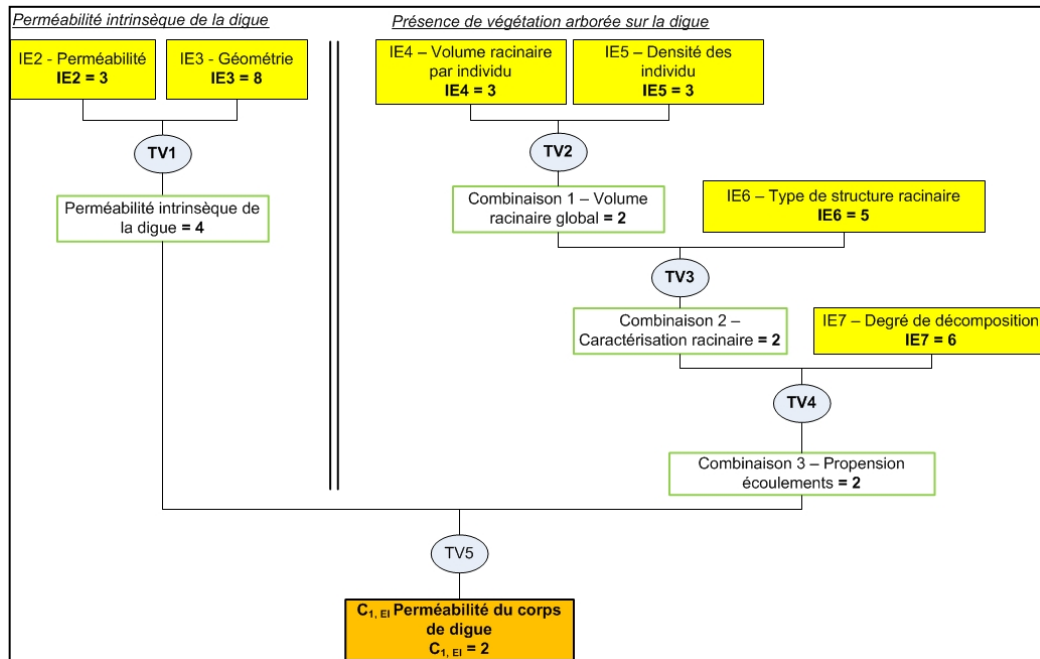


Figure 4. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel C<sub>1, EI</sub> « perméabilité du corps de digue » (TV : table de vérité)

La figure 5 présente un exemple de table de vérité (IE2 et IE3) ayant comme résultat, l'évaluation de la perméabilité intrinsèque de la digue. Les deux premières lignes de la table sont grisées car IE3 ne prend pas les valeurs [0 ; 1] dans les références qui ont été établies.

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

Figure 5. Table de vérité experte pour l'agrégation des indicateurs d'état IE2 et IE3

Les modèles décrits sont de type boîte blanche et explicitent les différents phénomènes, ici liés à la présence de végétation et conduisant à une dégradation de la perméabilité du corps de digue. Pour la propension aux écoulements, les indicateurs IE4, IE5, IE6 et IE7 sont agrégés de manière à expliciter le raisonnement expert pas à pas. En effet, nous cherchons dans un premier temps à obtenir le volume racinaire global par la combinaison 1 des indicateurs IE4 et IE5. Puis nous agrégeons le résultat de cette première combinaison avec l'indicateur IE6 afin d'obtenir une première caractérisation générale des systèmes racinaires (combi. 2) présent dans le corps du tronçon de digue analysé. Enfin, nous combinons ce résultat avec l'indicateur IE7, ce qui permet l'estimation de la propension aux écoulements (combi. 3) dans le corps de digue soumis à la présence de végétation arborée. L'évaluation du critère fonctionnel « perméabilité du corps de digue » est finalement réalisé par l'agrégation des résultats obtenus pour la perméabilité intrinsèque de la digue et pour la propension aux écoulements liée à la présence de végétation arborée (cf. figure 4).

L'explicitation des connaissances permet d'asseoir les différentes agrégations qui suivent bien une logique phénoménologique. Ceci introduit au final une plus grande robustesse dans la notation et donc une réduction des écarts de notation qui pourraient exister entre deux évaluateurs et par conséquent participe à la réduction des incertitudes épistémiques. Il est par contre bien sûr essentiel de valider que les tables de vérité font consensus. Pour cela, des séances de validation sont réalisées.

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

A partir de ce descriptif, les experts ont évalué les indicateurs d'état IE2 à IE7. La figure 4 présente ces résultats. Pour cette simulation, l'attribution des notes de chaque indicateur a été réalisée par consensus du groupe d'experts. Le résultat obtenu et la validation de ce résultat par le groupe d'experts, permet de valider la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état relatif à l'évaluation du critère fonctionnel « perméabilité du corps de digue ». La formalisation de chacun des indicateurs assure la répétabilité et la reproductibilité de l'évaluation de ce critère. Ces formalisations ont été validées avec le groupe d'experts lors d'une autre simulation qui a donné lieu à une notation, non pas par consensus, mais par attribution individuelle d'une note pour chaque indicateurs d'état.

## **Réduire les incertitudes épistémiques en développant des mesures indirectes**

### **1 Méthodes**

Parmi les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, l'indicateur « degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu » a été identifié par le groupe d'experts comme étant un indicateur important pour l'évaluation de la propension aux écoulements dans le corps de digue et donc pour l'évaluation du corps de digue vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne. Cet indicateur ne peut être obtenu à partir d'une information directement accessible car l'objet de la mesure, la souche ou les racines sont à l'intérieur de la digue. Deux solutions sont alors possibles : développer un capteur installé à l'intérieur de la digue et qui mesurerait le degré de décomposition des racines ou mettre en place une mesure indirecte donnant une estimation de ce degré. C'est cette dernière solution qui a été adoptée. Dans le cadre de cet article nous cherchons à définir la grille de formalisation de l'indicateur « degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu » et plus particulièrement à définir les références sur l'échelle d'évaluation présentée à la figure 2. Ainsi, quelle note donner à cet indicateur quand est présente sur la digue une souche de chêne coupé 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 fortement porteuse d'incertitude sur la donnée, ce qui est d'autant plus problématique que cet indicateur est jugé comme un indicateur essentiel par les experts en charge de la notation de la digue.

Une méthodologie permettant l'accès à cette information a donc été mise au point. Des mesures indirectes permettront, in fine, d'établir un lien de type phénoménologique entre la grandeur mesurée et la grandeur d'intérêt. Le principe utilisé dans cette mesure indirecte est une mesure chimique par spectrométrie proche infra-rouge (SPIR) couplée à de l'analyse de données et spectrale. Le principe est de suivre, au cours du temps, le degré de décomposition de racines de différentes espèces végétales représentatives d'espèces présentes sur des digues et de différents diamètres. Nous justifions notre choix de l'étude quantitative de la décomposition racinaire par voie chimique avec la méthode SPIR car 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 Jr, 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 digues « tests » situées dans différentes zones géographiques. 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 (38) mis en place en 2008 et un dispositif situé sur la digue de fermeture du barrage de Castérino (06) mis en place en 2009 (cf. photo 1).



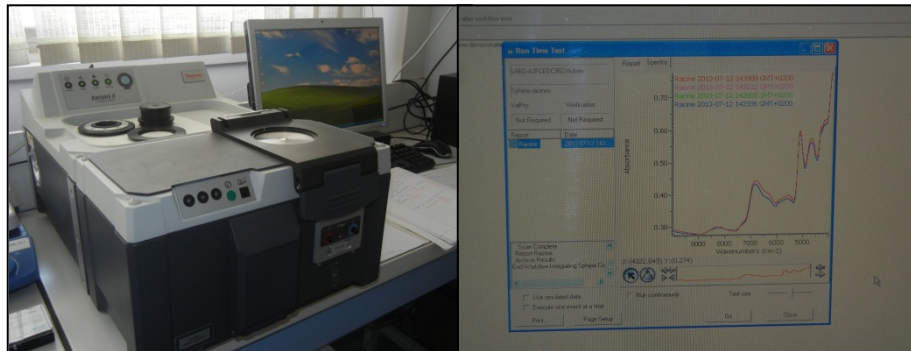
**Photo 1.** Illustration du dispositif expérimental de Castérino lors du déterrage des échantillons de racines ligneuses après 4 ans de décomposition

L'évolution de la décomposition des échantillons des 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 sont disposés dans des paniers en inox et sont enfouis à environ 50 cm de profondeur. 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 2 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. 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 secs et préalablement écorcés.

L'analyse par SPIR est réalisée sur les échantillons de racines réduits en sciure (broyés et tamisés). 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 (cf. photo 2).



**Photo 2.** Illustration du spectromètre proche infrarouge utilisé et de l'acquisition des spectres des échantillons de racines

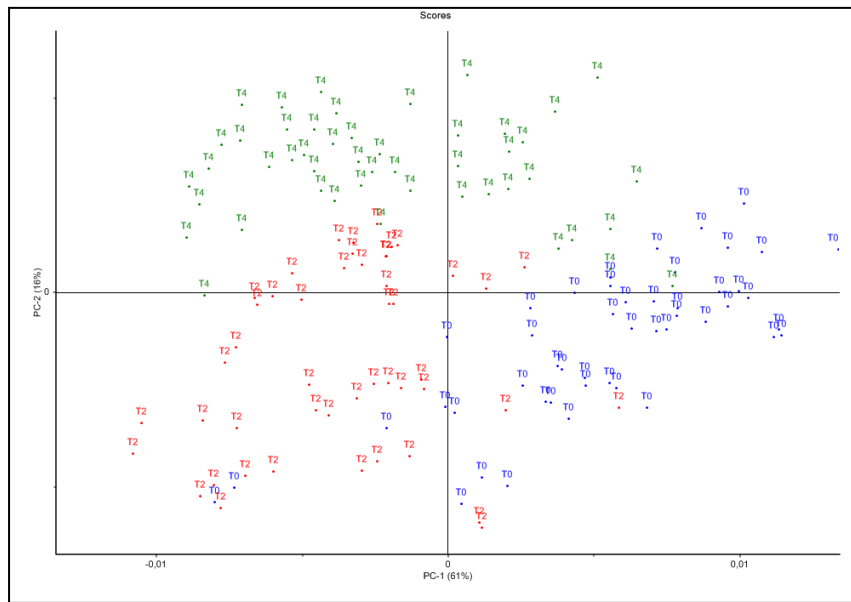
Le traitement de ces données est réalisé à l'aide des outils chimiométriques, notamment en réalisant une analyse en composantes principales (ACP). Les spectres ayant une variation de ligne de base importante sont préalablement prétraités avec une dérivée première. L'ACP permet de discriminer les échantillons entre eux en fonction de leur stade de décomposition, de leur espèce et de leur diamètre (Bambara et al., 2013).

## 2 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.

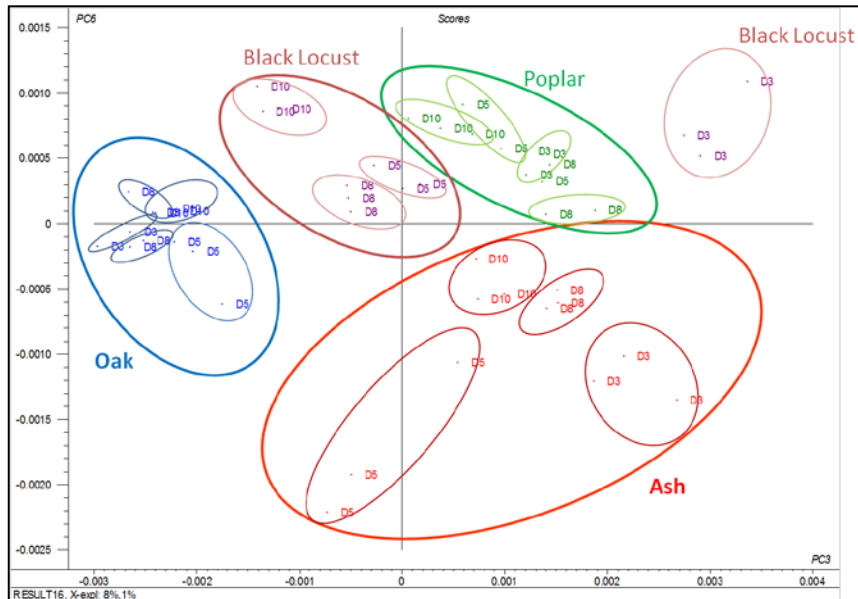
Une ACP (Analyse en Composantes Principales) a été réalisée sur l'ensemble des échantillons. Sur cette ACP, nous pouvons distinguer clairement trois groupes représentatifs des 3 stades de décomposition analysés. Le stade de décomposition apparaît alors comme le premier facteur discriminant les échantillons (cf. figure 6).





**Figure 6.** 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%)

La dispersion observée au sein des groupes (T0, T2 et T4) est liée à d'autres sources de variabilité, en particulier l'espèce ligneuse à laquelle appartient les échantillons et les différents diamètres (cf. figure 7).



**Figure 7.** 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 4, 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.

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 de réduire l'incertitude épistémique entachant cet indicateur en apportant des connaissances sur la décomposition de racines de différentes espèces végétales présentes sur les digues

### Conclusion

La méthodologie proposée, basée sur l'amélioration du modèle d'évaluation des digues fluviales déjà en place et opérationnel, représente une avancée scientifique et technique sur plusieurs plans : d'abord, par la prise en compte de la végétation arborée au travers d'indicateurs spécifiques et, parallèlement par le développement de mesures indirectes qui fournissent des sources de connaissances supplémentaires permettant de renseigner les indicateurs d'état, ensuite, par la formalisation et l'agrégation des indicateurs d'état permettant l'obtention des critères fonctionnels qui permettent de rendre le modèle d'évaluation plus robuste. Notre démarche permet finalement d'accroître la connaissance du système « digue de protection fluviale en remblai homogène » notamment vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne. Cet apport de connaissances permet de réduire les incertitudes épistémiques qui entachent les entrées du modèle d'évaluation de la vulnérabilité que sont les indicateurs d'état, ce qui se caractérise logiquement par une amélioration de la gestion du risque.

### Remerciements

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

### 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.
- Bouchon-Meunier, B., 1999. La Logique floue, Édition : 2e édition. ed. Presses Universitaires de France - PUF, Paris.
- 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.
- 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.
- 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.
- Jones Jr, 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.
- Lei, P., Bauhus, J., n.d. Use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict species composition in tree fine-root mixtures. Plant Soil 333, 93–103.
- 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.
- 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.
- Vuillet, M., 2012. Élaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales (Génie Urbain). Université PARIS-EST. Ecole doctorale "Ville, Transports et Territoires," Paris.
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Royet, P., Dufour, S., Provansal, M., 2008. L'enracinement des arbres dans les digues en remblai: étude des systèmes racinaires et impacts sur la sécurité des ouvrages. Ingénieries-Eat 49–67.