



**HAL**  
open science

# Évaluation de la performance de digues comportant des infrastructures : méthode basée sur la formalisation des connaissances

P. Di Maiolo, C. Curt, L. Peyras, R. Tourment, B. Beullac

## ► To cite this version:

P. Di Maiolo, C. Curt, L. Peyras, R. Tourment, B. Beullac. Évaluation de la performance de digues comportant des infrastructures : méthode basée sur la formalisation des connaissances. Dignes 2024, Inrae, Mar 2024, Aix en Provence, France. hal-04552140

**HAL Id: hal-04552140**

**<https://hal.science/hal-04552140>**

Submitted on 24 Apr 2024

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

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

# **Evaluation de la performance de digues comportant des infrastructures : méthode basée sur la formalisation des connaissances**

## ***Performance evaluation of levees with included networks: a knowledge formalization based method***

**P. Di Maiolo<sup>1</sup>, C. Curt<sup>1</sup>, L. Peyras<sup>1</sup>, R. Tourment<sup>1</sup>, B. Beullac<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Inrae 3275 route de Cézanne CS 40061 13182 Aix en Provence, France  
[pascal.dimaiolo@inrae.fr](mailto:pascal.dimaiolo@inrae.fr)

### **Résumé**

La défaillance d'un ouvrage hydraulique est susceptible d'avoir des conséquences lourdes en termes de vies humaines, de pertes économiques et de dommages environnementaux. Ces défaillances peuvent être initiées par la présence d'infrastructures de gaz, d'eau, d'électricité ou de communication...qui peuvent générer elles-mêmes ou par effet induit des dégradations et donc une possible atteinte à l'intégrité et à la durabilité des digues dans lesquelles elles sont présentes. Notre travail vise à développer une méthode d'évaluation de la performance des digues prenant en compte l'influence de la présence d'infrastructures (traversantes ou longitudinales) dans la digue ou à sa proximité. Cette approche « de premier niveau » est facile à utiliser et ne repose pas nécessairement sur des ensembles de données précis et complets. Elle est conçue pour répondre aux besoins de réalisation d'expertises rapides avec des moyens limités (humains ou économiques). L'objectif est de recenser tous les facteurs pertinents de vulnérabilité pour ce qui concerne la performance de la digue dus à la présence d'infrastructures : par exemple en cas de fuites d'eau d'une canalisation vers le corps de digue ou inversement d'une fissure dans une conduite créant un départ de matériau de la digue vers cette conduite.

Cette analyse des interactions infrastructures-digues a débouché sur l'identification et la formalisation de dix indicateurs d'état spécifiques qui assurent une évaluation robuste (répétable et reproductible). Les indicateurs sont recensés et formalisés, ce qui permet de caractériser l'effet de telles infrastructures sur la performance des digues. Enfin, ils ont été agrégés de manière à évaluer la performance de la digue vis-à-vis de l'érosion interne en présence d'infrastructures.

L'érosion interne, définie comme l'entraînement progressif des particules au sein de l'ouvrage, sous l'action de l'écoulement qui le traverse, est à l'origine de très nombreuses ruptures de digues engendrées ces dernières années par des crues. Elle fut entre autres responsable des 16 départs de brèches des digues de Camargue durant les crues du Rhône d'octobre 1993 et janvier 1994, ainsi que des brèches de la crue du Gard de septembre 2002.

Cette méthode a été testée avec succès sur plusieurs configurations de digues présentant des réseaux traversants, dans une approche de validation par jugement expert.

### **Mots-clés**

Digue, défaillance, évaluation, aide à la décision, infrastructures

## **Abstract**

The failure of a hydraulic structure is likely to have serious consequences in terms of human lives, economic losses and environmental damages. These failures can be initiated by the presence of gas, water, electricity or communication infrastructures, which can generate damage by themselves or by induced effect and therefore a possible attack on the integrity and durability of the levees in which they are present.

Our work aims to develop a method for evaluating the performance of levees taking into account the influence of the presence of infrastructure (crossing or longitudinal) in the levee or near it. This “first tier” approach is easy to use and does not necessarily rely on accurate and complete datasets. It is designed to meet the needs of carrying out rapid expertise with limited resources (human or economic). The objective is to identify all the relevant vulnerability factors with regard to the performance of the levee due to the presence of: for example in the event of water leaks from a pipe towards the levee body or conversely a crack in a pipe creating a departure of material from the levee towards this pipe.

This analysis of infrastructure-levee interactions led to the identification and formalization of ten specific status indicators that ensure a robust assessment (repeatable and reproducible). The indicators are listed and formalized, which makes it possible to characterize the effect of such infrastructures on the performance of the levees. Finally, they were aggregated in order to assess the performance of the levee with respect to internal erosion in the presence of infrastructure.

Internal erosion, defined as the gradual entrainment of the particles constituting a structure under the action of seepage, is the cause of many levee failures in recent years during floods. Among other things, it was responsible for the 16 breaches in the Camargue levees during the Rhône floods of October 1993 and January 1994, as well as the breaches during the Gard flood in September 2002.

This method has been successfully tested on several configurations of levees with crossing networks, in an expert judgment validation approach.

## **Key Words**

Levee, failure, evaluation, decision support, infrastructure

## Introduction

La défaillance d'une digue, est susceptible d'avoir des conséquences lourdes en termes de vies humaines, de pertes économiques et de dommages environnementaux. Dans ce contexte, la réglementation française sur la sécurité des ouvrages hydrauliques a été renforcée et a introduit la réalisation périodique de diagnostics et d'études de dangers sur ces ouvrages. L'évaluation de la performance des digues, liée aux problématiques intrinsèques des ouvrages (vieillesse, défaut d'entretien ou de maintenance, conception ou réalisation non conforme) ou en lien avec les aléas naturels du territoire (crues, séismes), est fondamentale pour les exploitants ou les propriétaires chargés des activités de surveillance, d'entretien et d'exploitation. Le maintien de la sécurité des ouvrages rend donc important le développement de méthodes et d'outils d'aide à la décision permettant d'évaluer leur performance et leur sécurité. Selon [6] la performance est définie comme l'aptitude d'une infrastructure ou d'un composant à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu. La perte de performance d'une digue est liée à des détériorations causées par de nombreux phénomènes dynamiques plus ou moins liés tels que la perte d'étanchéité ou l'érosion ayant des origines variées et souvent multiples [5]. Or, l'évaluation de la performance passe par plusieurs méthodes complémentaires (modélisation physique, auscultation des ouvrages, observations visuelles...) qui nécessitent l'avis d'experts du domaine pour conclure. Aussi, des travaux menés ces dernières années ont conduit à la modélisation de raisonnements experts pour l'évaluation de la performance sous la forme de systèmes à base de connaissances basés sur des indicateurs de [2-3-10-11].

Cet article s'inscrit dans la suite de ces travaux et s'intéresse plus particulièrement à la problématique de la prise en compte de l'influence de la présence d'infrastructures (réseaux d'eau, d'énergie, de télécommunication...) sur la performance des digues. L'objectif est de recenser les données pertinentes pour le diagnostic relatif à l'interaction entre ces infrastructures et la digue. Le diagnostic est examiné uniquement selon un angle de préjudice possible pour la performance de la digue : par exemple en cas de fuites d'eau d'une canalisation vers le corps de digue ou inversement d'une fissure dans une conduite créant un départ de matériau de la digue vers cette conduite.

### Méthodologie

L'approche de modélisation adoptée dans nos travaux est un système à base de connaissances [1-2], qui répond bien aux contraintes du système et rend possible de combiner des données de natures différentes. Ce type d'approche a aussi pour avantage de produire des modèles aisément compréhensibles par les ingénieurs et techniciens. La démarche comporte 4 étapes (Figure 1) :

i) recensement des données pertinentes pour fournir un ensemble de causes possibles à la dégradation ii) formalisation des indicateurs iii) développement de modèles d'agrégation menant à la performance de la digue vis-à-vis de l'érosion interne en présence d'infrastructures iv) validation.

Quatre ingénieurs seniors spécialisés dans les ouvrages hydrauliques et l'aide à la décision ont été impliqués au cours de séances de recueil et de formalisation des connaissances.

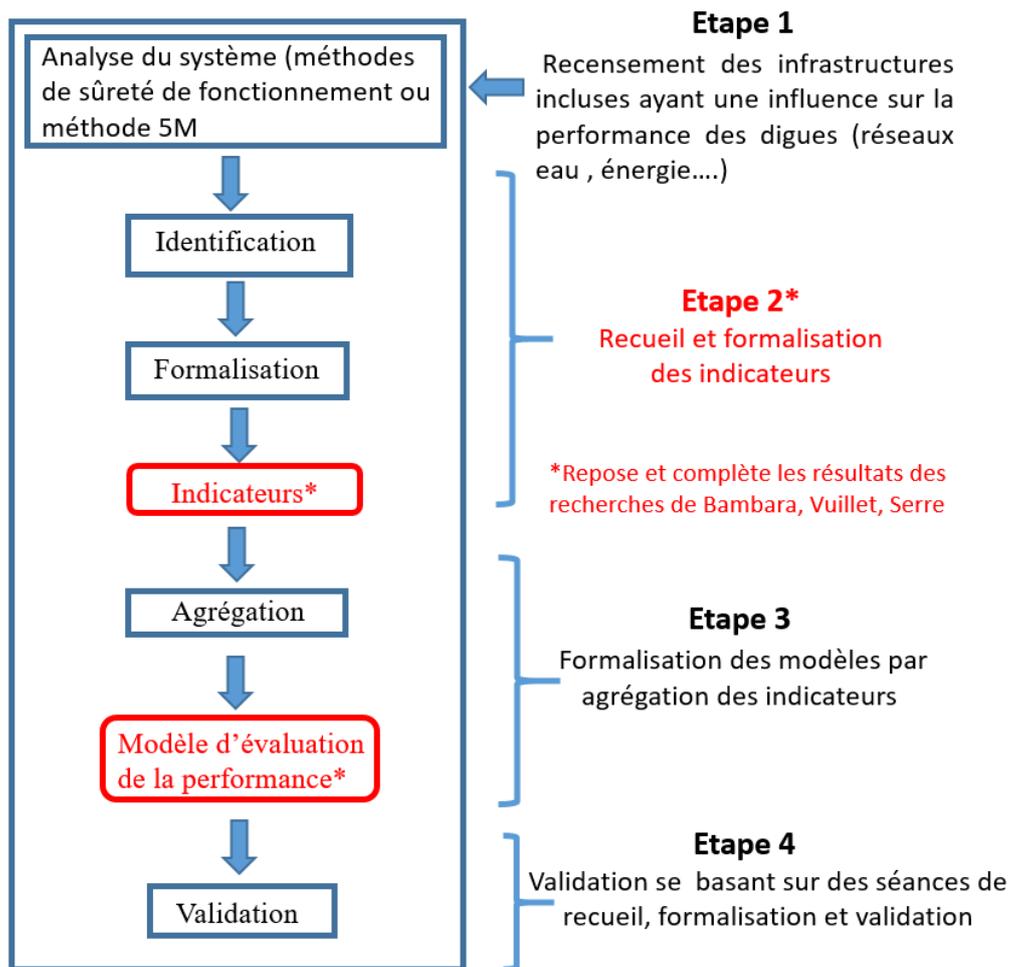


FIGURE 1. Principales étapes de la démarche

La première étape repose sur la méthode des 5M [8]. Le diagramme des 5M est un outil de démarche qualité qui permet d'analyser de manière synthétique l'ensemble des causes d'un problème. Il permet ici de structurer la recherche de données en les classant par familles selon les cinq typologies « Main d'œuvre, Matériel, Méthodes, Milieu, Matière ». L'objectif est de recenser les données pertinentes pour fournir un ensemble de causes possibles à la dégradation d'une digue du fait de la présence d'une infrastructure [7]. Toutes les phases de vie de l'infrastructure sont considérées : conception (e.g. caractéristiques des canalisations), installation (e.g. contrôle du compactage), fonctionnement (e.g. maintenance des canalisations).

À titre d'exemple nous présentons sur la Figure 2, les causes potentielles d'apparition d'une fuite dans une canalisation d'eau déclenchant un mécanisme d'érosion interne dans la digue, classées selon la méthode des 5 M. Ces causes sont exprimées sous la forme de données : présence de racines proche de la canalisation, détérioration de la canalisation par des rongeurs... Certaines données se répètent d'un mode à l'autre (e.g. la donnée « présence de racines » intervient comme donnée pour les canalisations de type gaz de ville, produits chimiques dangereux, eau).

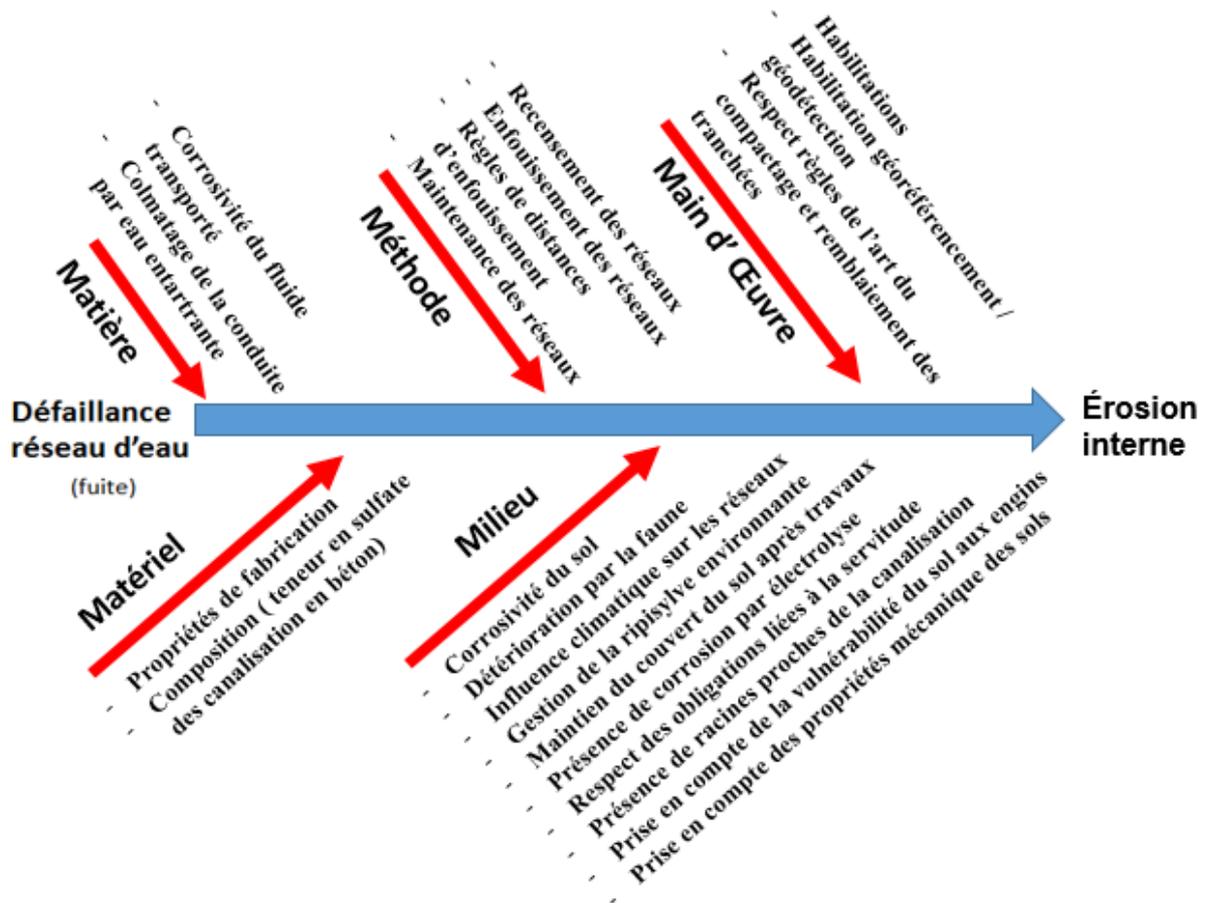


FIGURE 2. Identification et classification des causes de la défaillance (fuite) d'une canalisation d'eau déclenchant un mécanisme d'érosion interne dans la digue selon la méthode des 5M

L'étape suivante consiste en l'identification et la formalisation d'indicateurs qui assurent une évaluation robuste (répétable et reproductible). Les indicateurs proviennent des causes de l'analyse 5M (par exemple « Compactage et remblaiement des tranchées de pose des réseaux » ou « Sensibilité à la corrosion et aux interactions eau-réseau... »).

Ils sont décrits selon une grille unique en 5 points : nom de l'indicateur d'état, définition, mode opératoire, échelle de mesure et références associées qui sont les points d'ancrage sur l'échelle et permettent de décrire les différents états possibles de l'indicateur et caractéristiques spatiales spécifiant la partie de l'ouvrage à analyser [6].

Comme nous l'avons illustré sur le Tableau 1, nous proposons d'utiliser pour tous les indicateurs une même échelle d'évaluation. La gradation est effectuée en fonction des jalons de couleurs représentés sur une double échelle de notation : échelle de référence discrète de six modalités pour formaliser et modéliser la connaissance experte couplée à une échelle de référence continue entre [0 ; 10] où 0 (inacceptable) correspond à la situation la plus critique, tandis que 10 correspond à une situation idéale (très bon).

Cette dernière permet des analyses quantitatives sur les valeurs des différents critères. Le Tableau 1 donne un exemple de grille de formalisation pour l'indicateur « Interaction entre les gestionnaires de la digue et des réseaux ».

TABLEAU 1. Description de l'indicateur « Interactions entre les gestionnaires de la digue et des réseaux »

Nom	Interactions entre les gestionnaires de la digue et du (es) réseau(x)
Définition	<p>Connaitre le positionnement spatial du réseau dans un cadre unique et une situation géographique bien définie dans un système de coordonnées et de références</p> <p>Ainsi que la connaissance de la nature du produit acheminé (eau, gaz, électricité, produit pétrolier...) et du gestionnaire du réseau enterré (coordonnées)</p>
Echelle et références	 <p>10 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Positionnement et recensement des réseaux effectués selon le protocole établi</li> <li>- Connaissance par le gestionnaire de la digue de la nature du produit acheminé et des coordonnées du gestionnaire de réseau (personne contact)</li> </ul> <p>6 ou 7 : Existence des réseaux connus mais pas géoréférencés</p> <p>4 ou 5 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'interaction entre les gestionnaires de la digue et du (es) réseau(x)</li> <li>- Réseaux abandonnés</li> <li>- Absence de positionnement et de recensements</li> <li>- Absence de connaissance de la nature du produit acheminé et du gestionnaire de réseau</li> </ul> <p>La propriété la plus défavorable vis à vis du mécanisme de détérioration est choisie. et la notation s'effectue pour chacun des réseaux</p>
Caractéristiques de lieu	Ensemble du réseau
Caractéristiques de temps	Lors de la conception ou lors d'un besoin pour consultations des éléments du dossier de la digue, lors d'une inspection visuelle normale

Durant la troisième phase, les modèles sont construits à partir des Indicateurs d'Etat (IE) des digues comme par exemple l'IE 2.6 « Interactions entre les gestionnaires de la digue et des réseaux » (Figure 3). Ils sont les indicateurs des causes et des effets des défaillances des composants du système digue. Ils détaillent les informations à prendre en considération pour le renseignement de chaque critère d'évaluation des digues. Ils correspondent aux phénomènes entrant dans l'évaluation des critères. On considère ces éléments comme la manifestation de la dégradation d'une fonction de la digue.

Les critères fonctionnels comme par exemple le critère C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne » (Figure 3), sont les éléments décisionnels considérés par l'ingénierie pour évaluer les digues. Ils correspondent aux éléments permettant de définir le degré de réalisation des fonctions assignées aux composants des ouvrages, en relation avec leurs caractéristiques intrinsèques, aux sollicitations lors de crues et aux phénomènes pouvant occasionner des dégradations, voire des défaillances allant jusqu'à la rupture.

Les fonctions d'agrégation sont généralement définies et utilisées pour combiner et résumer plusieurs valeurs, souvent numériques, en une seule, de telle sorte que le résultat final prenne en compte de manière prescrite toutes les valeurs individuelles.

Les agrégations que nous avons réalisées ont été établies entre autres à partir d'opérations mathématiques simples comme par exemple « minimum ». Cette méthode selon [9] présente l'avantage d'être non compensatoire : on ne peut pas compenser un mauvais score par un bon et inversement. Corollairement, le « min » ne prend en compte que le critère le plus défavorable et la comparaison des actions sur les autres critères peut être ainsi omise.

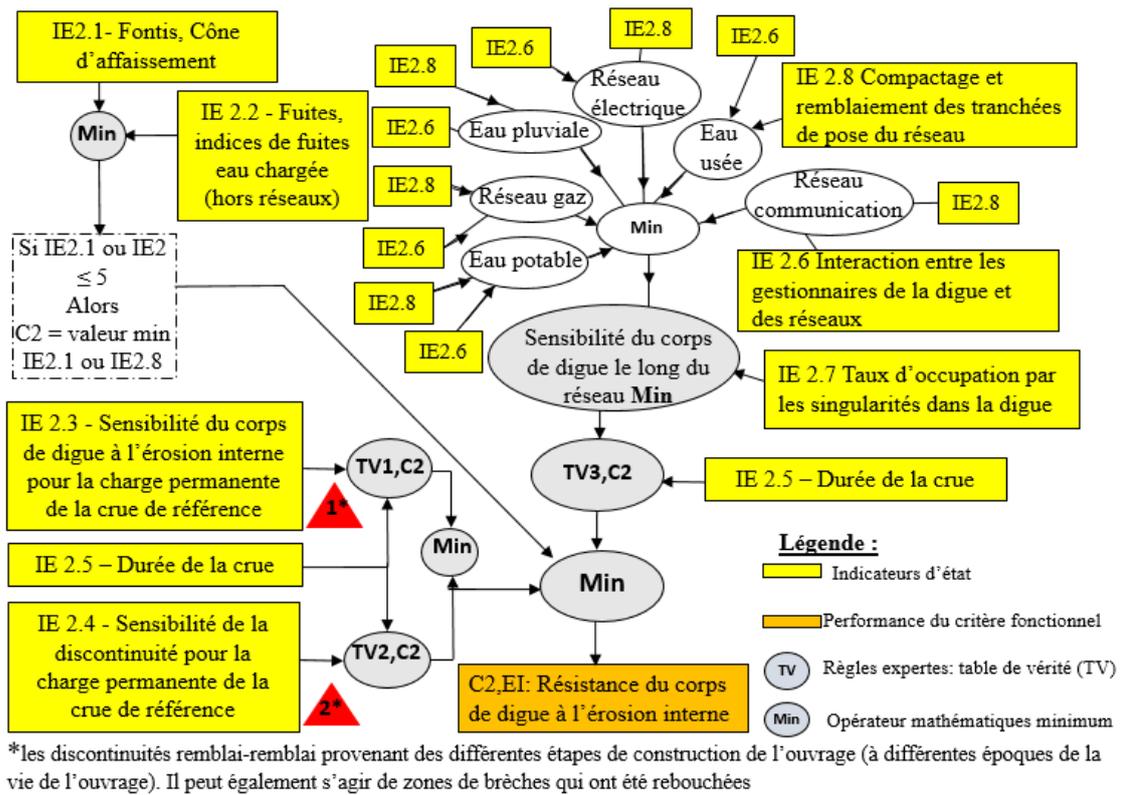


FIGURE 3. Diagramme d'agrégation des indicateurs d'état pour l'évaluation du critère fonctionnel C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne »

Nous avons aussi utilisé pour réaliser les agrégations des tables de vérités (Figure 4) qui représentent les valeurs que prend une expression booléenne pour chaque combinaison possible de ses entrées. Ainsi, par exemple Si nous prenons la table de vérité (TV2, C2) de la Figure 4 avec l'indicateur « Durée de crue » évalué à 5 : crue intermédiaire au regard de la taille de l'ouvrage et de la perméabilité et l'indicateur « Sensibilité de la discontinuité présente dans le corps de digue pour la charge permanente de la crue de référence » évalué à 10 : pas de discontinuité au sein du remblai Alors la valeur de TV2, C2 est évaluée à 8 (Bon)

		IE2.4 - Sensibilité de la discontinuité pour la charge permanente de la crue de référence	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			Echelle d'évaluation indicateur 2.4										
IE2.5 - Durée de la crue													
Inacceptable	0		0	0	2	2	4	4	6	6	8	8	8
Mauvais	1		0	1	2	2	4	4	6	6	8	8	8
Mauvais	2		1	1	2	2	4	4	6	6	8	8	8
Médiocre	3		1	1	2	3	4	4	6	7	8	8	8
Médiocre	4		1	2	3	4	4	4	6	8	8	8	8
Médiocre	5		1	2	3	4	5	5	6	8	8	8	8
Passable	6		2	3	4	4	5	6	8	9	9	9	9
Passable	7		2	4	4	6	7	8	9	9	9	9	9
Bon à très bon	8		4	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10
Bon à très bon	9		6	8	8	8	8	8	9	9	10	10	10
Bon à très bon	10		8	8	8	8	8	8	9	9	10	10	10

FIGURE 4. Exemple de table de vérité TV2, C2 – Potentialité a l'érosion interne en cas de discontinuités remblai-remblai

Les critères fonctionnels (C1, C2, C3,.....C8) de la Figure 5 ont été par la suite eux-mêmes agrégés pour obtenir la performance de digues comportant des infrastructures vis-à-vis de l'érosion interne.

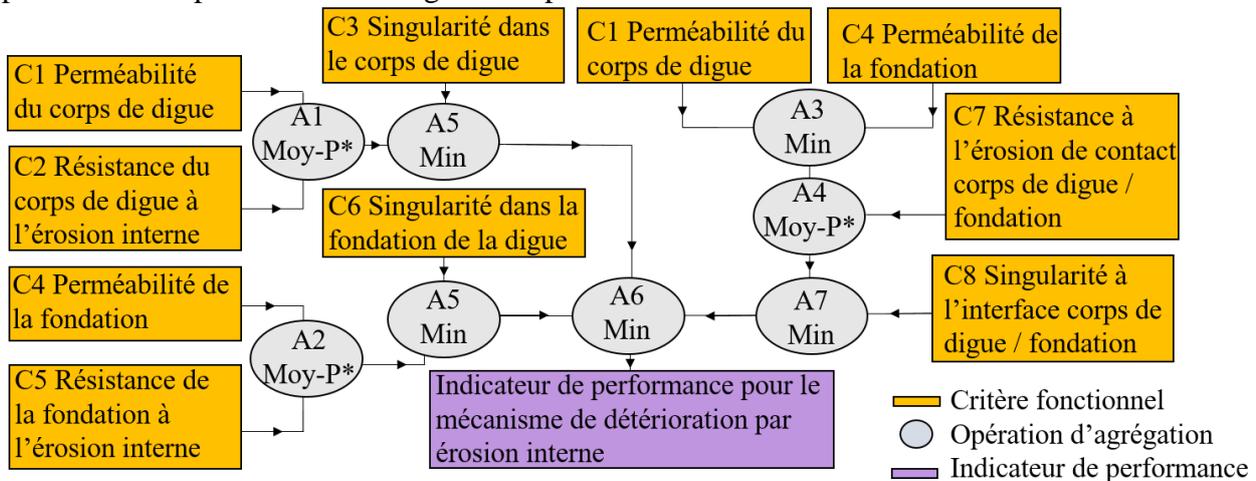


FIGURE 5. Diagramme de construction de l'indicateur de performance vis-à-vis du mécanisme de défaillance par érosion interne

La dernière phase concerne la validation des formalisations et des modèles par confrontation à quatre études de cas de digues accueillant des infrastructures dans trois zones différentes (corps de digue, fondation de la digue et interface corps de digue / fondation).

Les tests sont menés par le groupe d'experts, à l'aide d'un outil informatique prototype, permettant de tracer les données et de réaliser automatiquement les calculs de performance. Cette étape permet de valider (après quelques recalibrages), la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état pour l'évaluation des différents critères. Les notations sont effectuées dans un premier temps de manière individuelle afin de vérifier la justesse des formalisations des indicateurs d'état puis une notation par consensus est demandée aux experts.

Ces études de cas sont inspirées de cas réels, dans lesquels nous avons rajouté des infrastructures, enlevé le suivi des infrastructures, simulé la pose de réseaux aux exigences normatives dépassées, simulé une fuite, etc.

Elles sont les suivantes :

- une digue accueillant un réseau d'eau potable ayant une légère fuite ;
- une digue accueillant un réseau d'eau potable ainsi qu'un réseau d'eau pluviale aux capacités d'évacuation sous dimensionnées. Les deux réseaux ont des exigences normatives dépassées et un mauvais suivi ;
- une digue laissée sans entretien accueillant un réseau d'eau usées, un réseau électrique et un réseau d'eau potable. Il n'y a pas d'interaction entre les gestionnaires de la digue et des réseaux;
- une digue accueillant des réseaux de communication posés avec un mauvais compactage et un remblaiement inapproprié des tranchées.

### Résultats

A ce stade, nous avons identifié et formalisé 10 indicateurs d'état analysant les impacts potentiels de la présence d'infrastructures sur la digue :

- pour C1, EI « Perméabilité du corps de digue » et C4, EI « Perméabilité de la fondation de digue:

- Fuites, indices de fuites du réseau ;
  - Suivi du réseau ;
  - Caractéristiques du réseau ;
  - Vérification du réseau après pose ;
  - Sensibilité à la corrosion et aux interactions « eau-réseau » ;
  - Capacité d'évacuation des eaux pluviales par le réseau ;
  - Règles de voisinage entre les réseaux et les végétaux.
- pour C2, EI « Résistance du corps de digue à l'érosion interne », C5, EI « Résistance de la fondation à l'érosion interne » et C7, EI « Résistance à l'érosion de contact corps de digue / fondation » :
- Interaction entre les gestionnaires de la digue et des réseaux (Tableau 1) ;
  - Taux d'occupation par les singularités dans la digue ;
  - Compactage et remblaiement des tranchées de pose des réseaux.

Nous avons complété les huit critères fonctionnels développés lors de travaux de recherche précédents [2-3-10-11] (Figure 5) qui nous ont permis d'agréger les indicateurs pour obtenir la performance de digues comportant des infrastructures vis-à-vis de l'érosion interne.

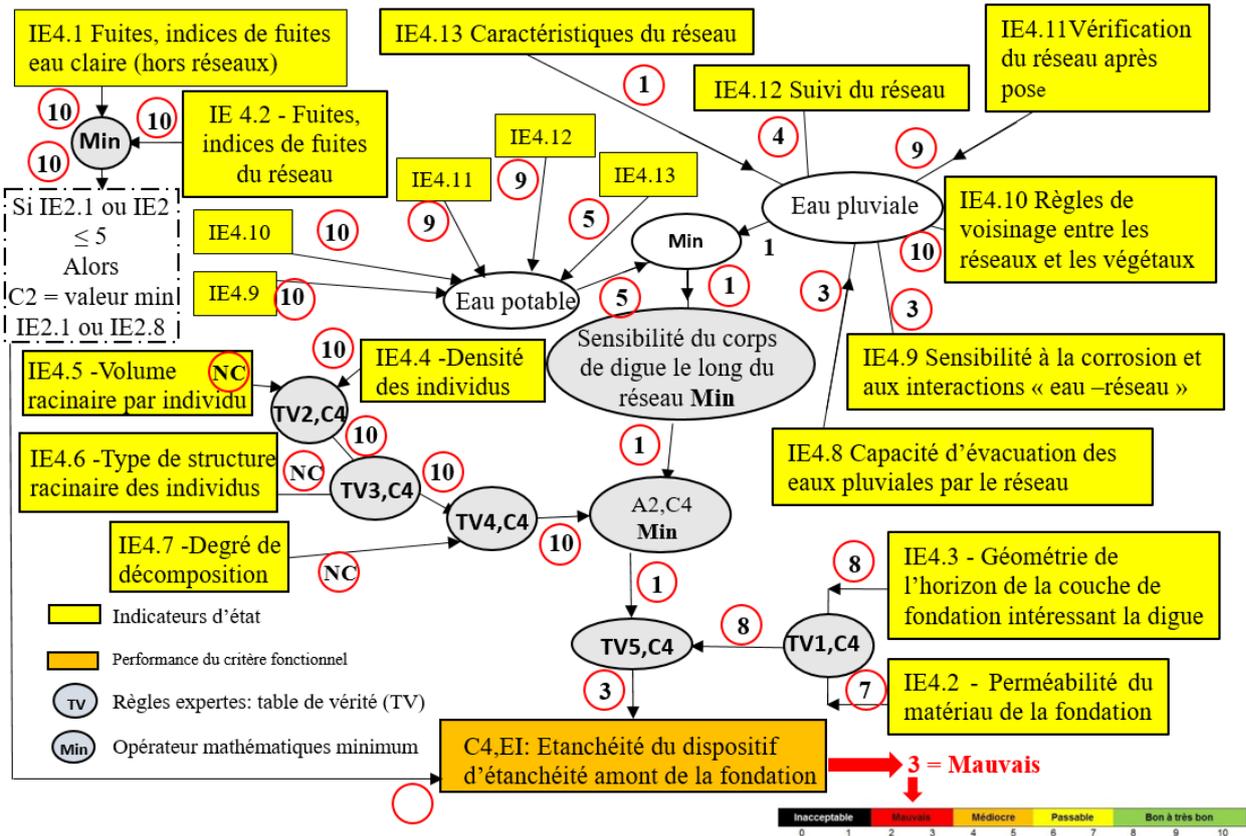


FIGURE 6. Exemple de notation du critère fonctionnel C4, EI « Perméabilité de la fondation de digue »

Sur la Figure 6, nous avons à titre d'exemple représenté les notations consensuelles permettant l'évaluation du critère fonctionnel C4, EI « Perméabilité de la fondation de digue ».

Ce critère a été évalué comme mauvais avec un score de 3. Le fait que le matériel ne répondait pas correctement aux exigences normatives, la non prise en compte de l'évolution de

l'imperméabilisation des sols engendrant une inadéquation de la capacité d'évacuation des eaux pluviales et un suivi des réseaux trop léger ont donné une valeur d'évaluation du critère fonctionnel C4, EI classée comme mauvaise. Mais au-delà des scores, durant cette phase, il nous importait de vérifier si la façon dont nous avons déterminé les échelles de notation et la manière d'agréger les indicateurs entre eux était bien en adéquation avec les prérogatives des experts.

Ces validations visaient à tester la méthode sur des exemples réalistes, les experts seniors ont trouvé la démarche intéressante car elle permet de prioriser les investigations nécessaires pour l'amélioration de la performance de la digue et de ces infrastructures dans le temps.

### Conclusion

La performance des digues peut présenter une grande variabilité tout le long du linéaire du fait de l'hétérogénéité des ouvrages ou du fait de la présence de singularités (conduites traversantes, végétation, terriers, etc.). Ces travaux complètent les méthodes et outils d'aide à la décision développés antérieurement en répondant à des situations de présence d'infrastructures sur ou dans les ouvrages. L'approche a été réalisée dans une optique de formalisation des connaissances d'interaction entre les gestionnaires de la digue et des réseaux.

A ce stade, nos travaux ont été développés pour le mécanisme de défaillance par érosion interne. Nous avons comme perspectives de poursuivre nos développements d'évaluation de la performance de digues comportant des infrastructures pour les mécanismes de défaillances par affouillement, par glissement ou par surverse.

### Références

- [1] Akerkar, R., & Sajja, P. (2009). Natural Language Interface: Question Answering System. Knowledge-Based Systems, Jones & Bartlett Learning, 333-344.
- [2] Bambara, G. ; Curt, C.; Mériaux, P.; Peyras, L.; Tourment, R.; Vennetier, M.; Vanloot, P (2019). Modèles d'évaluation de la performance des digues soumises à la présence de végétation arborescente – cas de l'érosion interne. DOI:10.5281/zenodo.2530124
- [3] Bambara, G. (2016). Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente, PhD Thesis, Université d'Aix-Marseille).
- [4] Booker, J. M., & McNamara, L. A. (2004). Solving black box computation problems using expert knowledge theory and methods. Reliability Engineering & System Safety, 85(1-3), 331-340.
- [5] CIGB, (1994). Ageing of dams and appurtenant works - Review and recommendations.
- [6] Curt, C., Peyras, L., & Boissier, D. (2010). A knowledge formalization and aggregation-based method for the assessment of dam performance. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 25(3), 171-184.
- [7] Di Maiolo, P., Curt, C., & Peyras, L. (2017). Dégradation des digues due à la présence d'infrastructures: recensement et classification des causes par la méthode des 5 M. In 35èmes Rencontres de l'AUGC (pp. 4-p).
- [8] Ishikawa, K. (1982). Guide to quality control (No. TS156. I3713 1994.).
- [9] Roy, B., Bouyssou, D. (1993). Aide multicritère à la décision : méthodes et cas. Editions Economica, Paris, 695 p.
- [10] 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, PhD Thesis, Université de Marne-La-Vallée, Paris.
- [11] 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, PhD Thesis, Université Paris Est.