



HAL
open science

Évaluation de la performance d'ouvrages hydrauliques en remblai basée sur la formalisation et l'agrégation des connaissances

Pascal Di Maiolo, Corinne Curt, Gisèle Bambara, Laurent Peyras, François Chappaz, Rémy Tourment, Bruno Bellac

► To cite this version:

Pascal Di Maiolo, Corinne Curt, Gisèle Bambara, Laurent Peyras, François Chappaz, et al.. Évaluation de la performance d'ouvrages hydrauliques en remblai basée sur la formalisation et l'agrégation des connaissances. 22e Congrès de Maîtrises des Risques et Sécurité de Fonctionnement $\lambda\mu 22$, Oct 2020, Havre, France. hal-02974812

HAL Id: hal-02974812

<https://hal.inrae.fr/hal-02974812v1>

Submitted on 22 Oct 2020

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 d'ouvrages hydrauliques en remblai basée sur la formalisation et l'agrégation des connaissances

Di Maiolo Pascal
Recover
Inrae
Aix en Provence, France
pascal.dimaiolo@inrae.fr

Bambara Gisèle
Recover
Inrae
Aix en Provence, France
gisèle.bambara@inrae.fr

Chappaz François
Recover
Inrae
Aix en Provence, France
francois.chappaz@inrae.fr

Curt Corinne
Recover
Inrae
Aix en Provence, France
corinne.curt@inrae.fr

Peyras Laurent
Recover
Inrae
Aix en Provence, France
laurent.peyras@inrae.fr

Tourment Remy
Recover
Inrae
Aix en Provence, France
remy.tourment@inrae.fr

Bellac Bruno
Recover
Inrae
Aix en Provence, France
bruno.bellac@inrae.fr

Notre communication s'intéresse à deux problématiques : la prise en compte de l'influence, sur la performance des digues, de la présence d'infrastructures incluses (réseaux d'eau, d'énergie...) et l'évaluation de la performance des barrages de taille modeste, en l'absence d'instruments d'auscultation.

Mots-clés : ouvrage hydraulique, défaillance, évaluation, aide à la décision, réseau

Our communication focuses on two issues: the taking into account the influence on the performance of levees of the presence of included infrastructure (water, energy, networks, etc.) and assessing the performance of modest size dams, in the absence of monitoring instruments.

Keywords: hydraulic structure, failure, evaluation, decision support, network

I. - INTRODUCTION

La défaillance d'un ouvrage hydraulique, barrage ou 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 à partir du décret du 11 décembre 2007. Avec la parution de la loi MAPTAM du 27 janvier 2014, une série de mesures visant à clarifier et renforcer les compétences décentralisées ont été mises en place pour ce qui concerne plus spécifiquement les digues et autres ouvrages de protection contre les inondations. Ces dispositions entrées en vigueur le 1er janvier 2018 créent la compétence de la maîtrise d'ouvrage sur le territoire en

matière de Gestion des Milieux Aquatiques et de Prévention des Inondations (Gemapi) attribuée aux communes ou aux établissements publics de coopération intercommunale si la commune ne peut assumer seule. En France, la réglementation impose aux gestionnaires la réalisation périodique de diagnostics et d'études de dangers sur ces ouvrages.

L'évaluation de la performance des digues ou des barrages, 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. 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 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 [1]. 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 [2]; [3]; [4]; [5]; [5]; [6].

Cet article s'inscrit dans la suite de ces travaux et s'intéresse plus particulièrement aux ouvrages en remblai et à deux problématiques :

- la prise en compte de l'influence sur la performance des digues de la présence d'infrastructures (réseaux d'eau, d'énergie...). L'objectif est de recenser les données pertinentes pour le diagnostic relatives 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. Nous proposons une analyse des interactions infrastructures-digues qui débouche sur une première identification d'indicateurs permettant de caractériser l'effet de telles infrastructures sur la performance des digues ;

- l'évaluation de la performance des barrages de taille modeste, en l'absence d'instruments d'auscultation. Les modèles développés dans les travaux antérieurs concernaient des barrages de grande taille et donc bien auscultés. Dans cette communication nous nous intéressons au mécanisme d'érosion interne : les indicateurs et les modèles d'évaluation seront présentés.

II. - MÉTHODOLOGIE

Les données concernées dans l'évaluation d'un ouvrage sont très nombreuses (géométrique, géotechnique, hydraulique et biologique) et de diverses natures (données auscultées, observations visuelles...). L'approche de modélisation retenue est un système à base de connaissances [7]; [8] car elle 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 méthode comporte 4 étapes dont une étape préalable[9] présentées sur la Fig. 1.

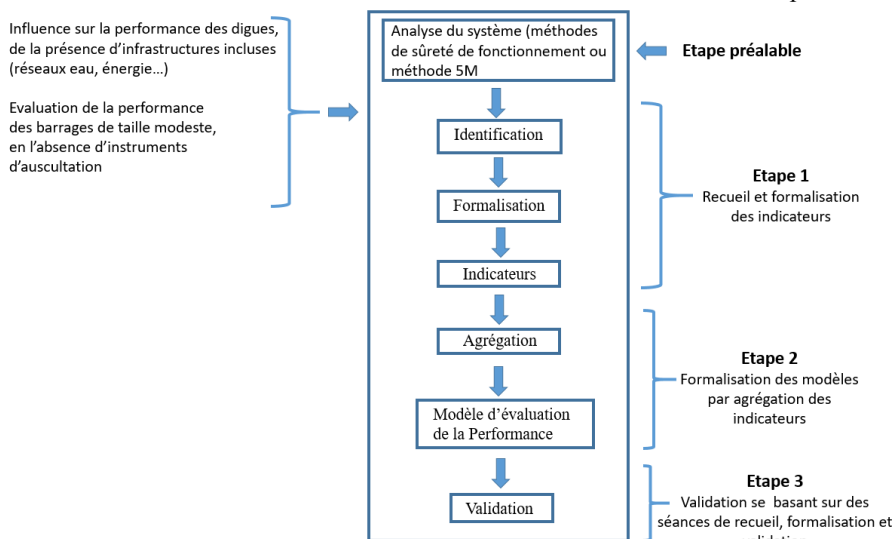


Fig. 1. Principales étapes de la démarche

Est tout d'abord réalisée une analyse préalable reposant sur deux méthodes différentes en fonction de l'application afin de structurer les formalisations futures. Pour les digues, nous avons employé la méthode des 5M [10].

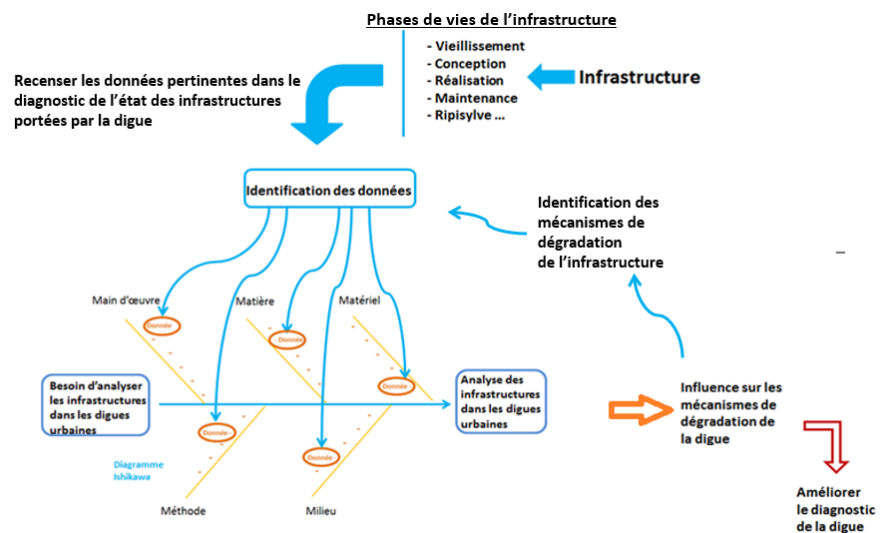


Fig. 2. Méthodologie développée autour du diagramme des 5M


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 la typologie « Main d'œuvre, Matériel, Méthodes, Milieu, Matière ». L'objectif est de recenser les données pertinentes pour le diagnostic de l'état des infrastructures portées par la digue (cf. Fig 2). Toutes les phases de vie de l'infrastructure sont considérées : conception (exemple : caractéristiques des canalisations), installation (exemple : contrôle du compactage), fonctionnement (exemple : maintenance des canalisations).

- Pour les barrages a été réalisée une analyse structurelle, fonctionnelle et dysfonctionnelle (non présentée ici – Voir [2]).

Les étapes 1 à 3 reposent sur des séances de recueil des connaissances auprès d'un groupe d'experts des ouvrages hydrauliques.

L'étape 1 consiste en l'identification et la formalisation d'indicateurs qui assurent une évaluation robuste (répétable et reproductible). Une grille de formalisation est alors utilisée. Elle repose sur 5 champs : 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 [9]. 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]. 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 « Densité des individus ».

Tab 1. Description de l'indicateur « Densité des individus » (Bambara et al, 2018)

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. Les gros arbres sont recensés prioritairement
Mode opératoire	La mesure de cet indicateur s'effectue sur le terrain en relevant (pour chaque profil analysé) le nombre d'individus présents sur 10m ² . Le profil le plus défavorable vis à vis du mécanisme de détérioration est choisi.
Echelle et référence	 10 : absence d'individus 5-4 : présence d'un individu par 10 m ² 3-2 : présence de 2 à 5 individus par 10 m ² 1-0 : présence > 5 individus par 10 m ²
Caractéristiques de lieu	Profil de l'ouvrage analysé : un profil représentatif de la structure dans son ensemble et si nécessaire, un second profil présentant une densité de végétation arborée plus pénalisante
Caractéristiques de temps	Evaluation réalisée lors d'une inspection visuelle axée sur la qualification de la végétation présente sur l'ouvrage.

Les indicateurs permettant l'évaluation de la performance des ouvrages se déclinent en 3 catégories : indicateurs visuels, indicateurs d'auscultation, indicateurs calculés par modèles.

Une fois les indicateurs recensés et formalisés, la performance des ouvrages est évaluée au travers d'un modèle hiérarchique (Etape 2 – Fig.1). Les indicateurs sont agrégés pour évaluer la performance des fonctions (étanchéité, drainage...) puis la performance globale vis-à-vis d'un mode de rupture est obtenue par agrégation de performances des fonctions. Les agrégations sont réalisées par des opérateurs mathématiques simples (moyenne pondérée ou minimum) ou par table de vérité (fig. 4).

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

Fig. 4. Exemple de table de vérité combinant l'indicateur « Perméabilité du matériau » et « Géométrie » - Issu de Bambara (2016)

La troisième étape concerne la validation des formalisations et modèles par confrontation à un cas réel simplifiés puis des cas réels. Les tests sont menés par le groupe d'experts, à l'aide d'outils informatiques prototypes, facilitant la notation pour les utilisateurs, et permettant de tracer les données et de réaliser automatiquement les calculs de performance. Dans un premier temps, des simulations de l'évaluation des critères sont réalisées en séances avec le groupe d'experts sur des cas simplifiés. Cette étape permet de valider la cohérence des formalisations et des agrégations des indicateurs d'état pour l'évaluation des différents critères. Dans un second

temps, un dossier présentant des cas réels sont évalués individuellement par chaque expert et les notes sont ensuite confrontées. Enfin, une application, sur cas réels avec déplacement sur le terrain du groupe d'experts, est réalisé afin de valider les modèles d'évaluation de la performance d'un ouvrage hydraulique. 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. Cette phase de validation permet de modifier, le cas échéant, les formalisations des indicateurs et les modèles.

III. - EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES DIGUES TENANT COMPTE DE LA PRESENCE D'INFRASTRUCTURES

Notre étude s'intéresse aux différentes infrastructures présentes dans les digues. Elles sont principalement utilisées pour transporter de l'eau (de consommation ou usée), du gaz naturel ou des produits chimiques dangereux, de l'électricité ou des communications (internet, téléphone). Positionnées longitudinalement, transversalement ou en fondation, ces infrastructures pouvant être considérées comme des singularités au sein des digues peuvent générer des dégradations et donc une possible atteinte à l'intégrité et à la pérennité de ces ouvrages. Nous avons identifié les 5 mécanismes possibles de dégradation de la digue en remblai en lien avec la présence d'une infrastructure :

- Fuite de canalisation d'eau entraînant un mécanisme d'érosion interne et/ou glissements rotationnels ou translationnels ;
- Fuite de canalisation de gaz ou opération de maintenance entraînant un mécanisme d'érosion externe voire un effondrement partiel ;
- Saturation des réseaux lors d'épisode pluvieux (les débits à écouler dépassent les capacités des réseaux collecteurs) entraînant un mécanisme de surverse ;
- Evacuation des réseaux d'eau pluviale ou de sortie de station d'épuration entraînant un mécanisme par érosion externe (affouillement) côté eau ;
- Tassement provoqué par des travaux de compactage et remblaiement ou par la présence d'infrastructures dans les tranchées ;
- Exécution de travaux de compactage et de remblaiement entraînant un mécanisme de tassement de la digue.

À titre d'exemple nous présentons sur la Fig. 5, les causes potentielles d'apparition d'une fuite dans une canalisation d'eau déclenchant un mécanisme d'érosion interne dans la digue, classées selon les 5M. Ces causes sont exprimées sous la forme de données : présence de racines proche de la canalisation... Ce type de résultats a été produit pour chacun des modes de dégradation de la digue. Certaines données se répètent d'un mode à l'autre (par exemple la donnée « présence de racines » intervient pour les canalisations de type eau, gaz de ville, produits chimiques dangereux).

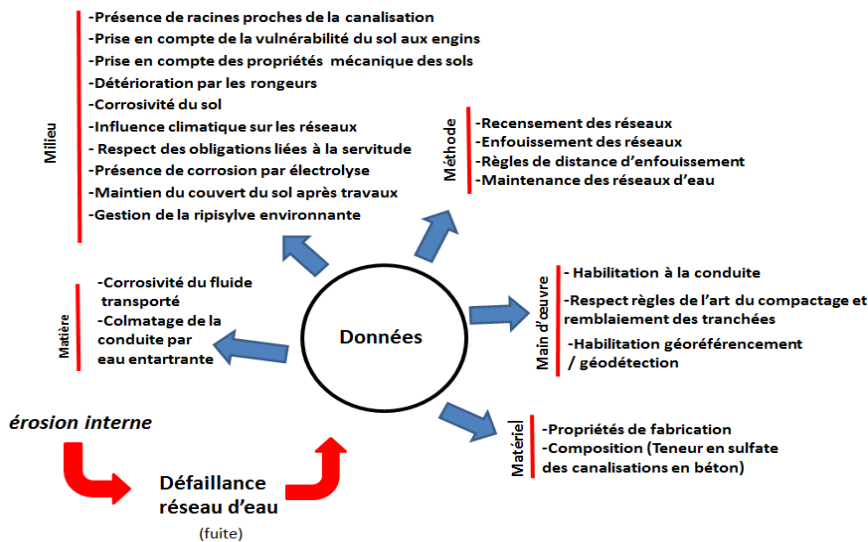


Fig 5. Identification et classification des causes de la défaillance (fuite) d'une canalisation d'eau déclenchant un mécanisme d'érosion interne dans la digue selon la méthode des 5M

Le tableau 2 indique le nombre de données recueillies pour l'ensemble des modes de défaillance des digues et des infrastructures considérées. Au total 34 données ont été identifiées pour l'ensemble des modes de défaillance des digues et des infrastructures considérées, ces données pouvant être utilisées plusieurs fois. Le nombre de données varie entre 17 pour le réseau d'électricité et 28 pour les réseaux de gaz et d'eau. Enfin, nous pouvons nous apercevoir de la prépondérance des données types « Milieu ».

Tab2. Récapitulatif du nombre d'entrées triées selon les 5M et infrastructures concernées

Type	Matériel	Main d'œuvre	Méthode	Milieu	Matière	Total
Infrastructure : Gaz	4	5	6	11	2	28
Infrastructure : Eau	3	3	8	12	2	28
Infrastructure : Électricité et communication	2	4	5	6	0	17
Total de données (hors redondances)	5	5	7	13	4	34

Pour élaborer les indicateurs « infrastructure », nous avons réalisé d'importants regroupements des données référencées à l'aide de la méthode de 5M comme par exemple pour l'indicateur « Règles de voisinage entre réseaux et les végétaux » représenté sur le tableau 3 qui provient du regroupement de deux données type « Milieu » (racines et canalisations, présence d'arbres), trois type « Méthode » (protection du couvert végétal, gestions concertées, gestion de la ripisylve environnante).

Tab 3. Description de l'indicateur « Règles de voisinage entre réseaux et végétaux »

Nom	Règles de voisinage entre les réseaux et végétaux
Définition	L'indicateur permet d'évaluer le respect des règles de voisinage entre la végétation environnante et les canalisations enterrées au sein d'une digue. Tous les types de fluides sont concernés : eau, gaz, hydrocarbures...
Mode opératoire	La mesure de cet indicateur s'effectue sur le terrain en relevant la distance* entre les réseaux et les végétaux
Echelle et références	<p>10 : répond aux exigences normatives (NF P 98-332)</p> <ul style="list-style-type: none"> - La distance* entre les réseaux et les végétaux de hauteur max 1m doit être d'au moins 1 m. - La distance* entre les réseaux et les arbres (sup à 1m) doit être d'au moins 2 m, avec et sans barrière anti-racines. En aucun cas cette distance ne doit être inférieure à 1,50 m. <p>8 : répond aux exigences normatives (NF P 98-332)</p> <ul style="list-style-type: none"> - La distance* entre les réseaux et les arbres (sup à 1m) doit être d'au moins 2 m, sans barrière anti-racines, comprise entre 1,50 et 2 m, avec protection. En aucun cas cette distance ne doit être inférieure à 1,50 m. <p>0 : ne répond pas aux exigences</p> <p>La propriété la plus défavorable vis à vis du mécanisme de détérioration est choisie. Par exemple si la digue comporte plusieurs réseaux, la note la plus défavorable est retenue ou</p> <p>La notation s'effectue pour chacun des réseaux</p>
Caractéristiques de lieu	Profil de l'ouvrage analysé
Caractéristiques de temps	Evaluation réalisée lors d'une inspection visuelle normale

* La distance mesurée est la distance entre la génératrice de la canalisation la plus proche de l'arbre et le tronc de l'arbre, à 1 m de hauteur.

A ce stade, nous avons identifié 11 indicateurs d'état spécifiques comme par exemple « Règles de voisinage entre les réseaux et les végétaux » ou « Corrosion des matériaux des réseaux » décrits sur la fig. 5. Ces indicateurs sont en cours de formalisation et validation.

Ces indicateurs seront intégrés par la suite aux modèles d'évaluation de la performance et de la conformité développés dans des travaux antérieurs [5] ; [6].

IV. - EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES BARRAGES DE TAILLE MODESTE, EN L'ABSENCE D'INSTRUMENTS D'AUSCULTATION

A. Ouvrages et mécanismes considérés

Afin d'adapter des modèles développés pour des barrages instrumentés à des ouvrages qui ne le sont pas, nous considérons des barrages homogènes (barrages de moyenne altitude voire de plaines dédiées majoritairement à des fins d'irrigation agricole) et le mécanisme d'érosion interne. Comme ces ouvrages peuvent comporter de la végétation arborescente, nous avons été amenés à produire deux

variantes de modèle soit avec ou sans végétation. Des indicateurs d'auscultation avaient été identifiés dans les modèles décrits précédemment. Il s'agit donc de reconstruire les modèles d'évaluation de la performance vis-à-vis de ces mécanismes en considérant une absence d'instruments d'auscultation.


B. Modèle développé pour des barrages instrumentés

Les modèles d'évaluation de la performance des barrages vis-à-vis du mécanisme de détérioration par érosion interne développés par [4] s'adressent à des barrages de grande taille, généralement bien entretenus donc avec une présence végétale très limitée. Ces modèles reposent ainsi sur un certain nombre d'indicateurs auscultés (Fig. 6).

Or, les barrages en remblai soumis à la présence de végétation arborescente sont souvent des petits barrages ne possédant pas forcément de dispositifs d'auscultation : les modèles de [4] doivent alors être modifiés afin de tenir compte de ces spécificités d'équipement et les indicateurs de végétation ont été introduits [6].

« Perméabilité du corps du remblai » (cf. tableau 4) et « géométrie du remblai » dont la combinaison (Fig. 6) permet d'avoir une évaluation indirecte de la quantité d'eau qui se déplace à l'intérieur du remblai.

Tab. 4 : grille de formalisation de l'indicateur « Perméabilité » - Issu de Bambara (2016)

Nom	Perméabilité du remblai
Définition	La perméabilité d'un matériau correspond à son aptitude à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient de pression. Elle varie de plusieurs ordres de grandeur en fonction de la nature et de l'état des sols et des matériaux rencontrés ; ce paramètre est également influencé par les défauts et irrégularités géotechniques ou de construction comme par exemple la granulométrie constitutive de l'ouvrage, le compactage...
Source d'obtention des données	Cet indicateur est un indicateur issu de mesures instrumentales ou des éléments du dossier de conception-réalisation
Echelle et référence	 10 : perméabilité 10^{-7} 9-8 : perméabilité 10^{-6} 7-6 : perméabilité 10^{-5} 5-4 : $10^{-5} < \text{perméabilité} < 10^{-4}$ 3-2 : $10^{-4} < \text{perméabilité} < 10^{-3}$ 1-0 : perméabilité $> 10^{-3}$
Caractéristique de lieu	Un tronçon de barrage homogène analysé

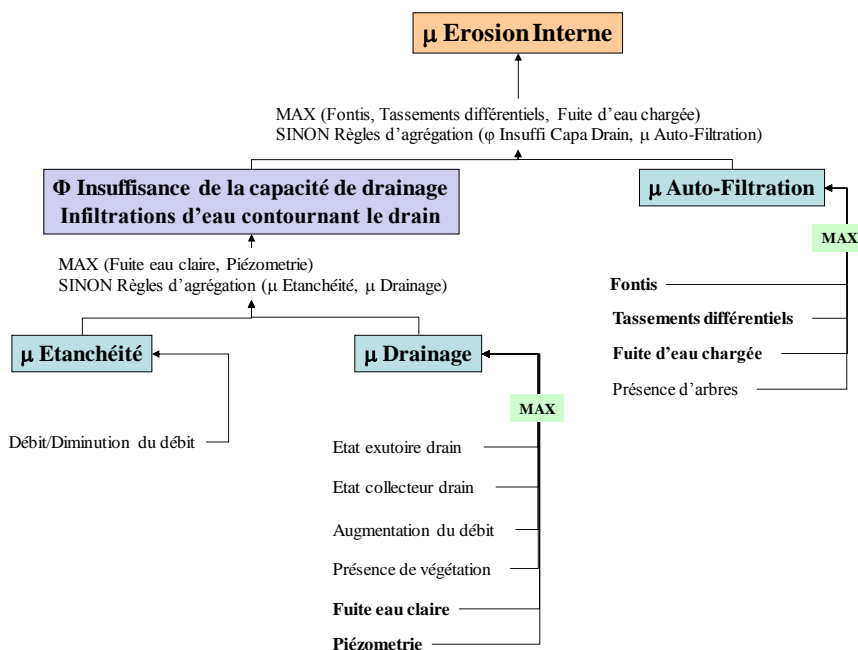


Fig 6 : modèle d'évaluation de la performance pour des barrages homogènes instrumentés (indicateurs évalués sur une échelle de 0 (excellent) à 10 (inacceptable) – les indicateurs indiqués en gras sont des indicateurs directs de la performance de la fonction) – Issu de Curt (2008)

C. Modèle et indicateurs développés pour des barrages non instrumentés

Trois indicateurs auscultés sont présents dans le modèle décrit pour les grands barrages : augmentation du débit (fonction d'étanchéité), diminution du débit (fonction de drainage) et piézométrie. Ces indicateurs doivent donc être éliminés du modèle si le barrage ne comporte pas de dispositif d'auscultation. Dans ce cas, la fonction d'étanchéité se trouve privée de tout indicateur. L'indicateur direct « Augmentation du débit » a été remplacé par deux autres indicateurs à savoir

En outre, 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 [6]. Il s'agit donc de compléter les modèles « grands barrages » par des indicateurs rendant compte de la végétation. Quatre indicateurs ont été décrits [6]; [11] Bambara et al, 2019 : 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. Ces indicateurs remplacent de manière plus précise les 2 indicateurs « végétation » du modèle présenté en fig 6 : « Présence de végétation » pour la fonction de drainage et « Présence d'arbres » pour la fonction d'auto-filtration.

La fig. 7 présente le modèle d'évaluation obtenu. Dans le cas où les indicateurs « Fuites d'eau localisées et chargées », « Fontis – cône d'affaissement » ou « Tassements différentiels » sont activés, l'évaluation est directement effectuée par le calcul du minimum des notes affectées à ces 3 indicateurs. Si ce n'est pas le cas, les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance des fonctions d'« Etanchéité », de « Drainage » et de « Résistance à l'érosion interne ».

Des validations ont été réalisées sur sept ouvrages réels : elles ont permis d'affiner la description de certains indicateurs et ont montré l'intérêt des développements.

