

UTILISATION DE LA THEORIE DES POSSIBILITES POUR L'EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES BARRAGES

USE OF THE THEORY OF POSSIBILITY FOR THE ASSESSMENT OF DAM PERFORMANCE

Corinne CURT

Cemagref
Unité Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie
3275 Route de Cézanne
CS 40061
13182 Aix-en-Provence CEDEX 5 – France
tel : 04.42.66.99.38
corinne.curt@cemagref.fr

Daniel BOISSIER

Laboratoire Génie Civil
Polytech'Clermont
Université Blaise Pascal
24, avenue des Landais – BP 206
63174 Aubière Cedex – France
tel : 04.73.40.75.21
daniel.boissier@univ-bpclermont.fr

Résumé

La perte de performance ou de sécurité d'un barrage peut se traduire par des dégradations ou des défaillances se matérialisant par des événements dramatiques comme la rupture de l'ouvrage ou par des événements plus mineurs comme la baisse de capacité du réservoir. Le développement de méthodes et d'outils d'aide à l'évaluation de la performance et de la sécurité des barrages représente par conséquent un enjeu fort. Les différentes données utilisées pour évaluer la performance d'un barrage (observations visuelles, données issues des instruments d'auscultation, données issues de modèles et données de conception et réalisation) sont entachées d'imperfections (incertitude, imprécision, incomplétude). Cet article présente une méthode permettant de représenter ces imperfections, de les propager dans un modèle d'évaluation de la performance puis de fournir, le cas échéant, une évaluation précise de la performance. Cette méthode permet de ne pas perdre une information intéressante et l'évaluation qu'elle fournit représente mieux la réalité que ne le ferait une note déterministe. Elle repose sur la théorie des possibilités et comporte trois phases principales : fuzzification, propagation dans le modèle d'évaluation de la performance et défuzzification. L'application de la méthode à des cas simplifiés a montré son intérêt et sa facilité d'utilisation par les experts en charge de la notation.

Summary

The performance loss of a civil engineering works can lead to deteriorations or failures such as dam failure. The development of tools and methods able to manage the performance and the safety of dams represents a main industrial issue and an interesting way of research. The various data used in the assessment of the performance of dam (visual inspections, monitoring data, design and construction information and data, calculated data obtained with mechanical models) are frequently imprecise, uncertain or incomplete. This paper presents a method that allows the representation of these imperfections, their propagation in a model developed for the assessment of the performance of dam and, if necessary, the proposition of a precise assessment of performance. This allows keeping interesting information and getting a better representation of the reality than a precise mark can do. This method is based on the theory of possibility. It relies on three main stages: fuzzification, propagation into the performance assessment model and defuzzification. The method was applied on simplified cases. The experts found the method relevant and easy to use.

Introduction

La performance et la sécurité des ouvrages de génie civil peuvent se dégrader sous l'effet d'événements extrêmes comme les séismes ou les crues mais également sous l'effet du vieillissement naturel si aucune action corrective n'est engagée pour contrecarrer l'effet du temps. La perte de performance ou de sécurité d'un ouvrage de génie civil peut se traduire par des dégradations ou des défaillances se matérialisant par des événements dramatiques comme la rupture d'un barrage ou d'un pont ou par des événements plus mineurs comme la baisse de capacité du réservoir. Le développement de méthodes et d'outils d'aide à l'évaluation de la performance et la sécurité des ouvrages de génie civil représente par conséquent un enjeu fort. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des ouvrages complexes que sont les barrages.

Différentes méthodes ont été proposées dans la littérature pour l'évaluation de la performance des barrages : modélisation mathématique, analyse des données d'auscultation, méthodes expertes, approches basées sur les historiques de ruptures, des incidents et des accidents... Ces différentes méthodes manipulent des données et des informations de natures très différentes : observations visuelles, données issues de capteurs, données de conception et de réalisation, données issues de modèles... Toutefois, ces différentes données sont entachées d'imperfection, terme général sous lequel nous regroupons les notions d'imprécision, d'incertitude et d'incomplétude :

- l'imprécision est associée à un énoncé approximatif de la connaissance, une difficulté à l'exprimer clairement soit parce que les données numériques sont mal connues, soit parce que les termes du langage utilisés pour qualifier une caractéristique du système sont vagues, comme par exemple, « léger tassement », « marche assez importante qui atteint quelques décimètres » ;
- l'incertitude exprime un doute sur la validité d'une connaissance. Dans notre cas, nous nous plaçons dans le cadre d'une incertitude épistémique réductible : elle provient d'un manque de connaissances, de données ou d'informations (« Digue fondée a priori sur un massif granitique »). Elle peut être aussi liée à la variabilité spatiale et/ou temporelle des propriétés mécaniques et hydrauliques dite variabilité aléatoire qui elle n'est pas réductible ;
- l'incomplétude qui est l'absence de connaissances ou l'existence de connaissances partielles. Elle peut être due à l'impossibilité d'obtenir certains renseignements (aucune information sur la conception du réseau de drainage dans le dossier du barrage, absence de dispositifs d'auscultation sur l'ouvrage) ou à un problème au moment de la prise de données (capteur en panne).

Les différentes formes d'imperfections ne sont pas indépendantes : par exemple, les incomplétudes entraînent des incertitudes et par ailleurs, plus on demande de précision dans un énoncé, moins il est certain.

Il est important de prendre en compte ces imperfections afin de ne pas perdre une information intéressante et de mieux représenter la réalité que ne le ferait une note déterministe. L'objectif est ici de proposer une méthode basée sur la théorie des possibilités et la logique floue permettant de représenter ces imperfections, de les propager dans le modèle d'évaluation de la performance puis de fournir, le cas échéant, une évaluation précise de la performance. La théorie des possibilités et la logique floue ont déjà été utilisées avec succès pour la prise en compte des imperfections, dans le secteur du génie civil, pour l'évaluation de la fiabilité des fondations [1], de la stabilité de pentes [2], de la performance d'un système d'alimentation en eau [3], [4] ou de ponts [5]. La Section 2 présente rapidement le modèle d'évaluation de la performance des barrages. La Section 3 traite de la représentation et de la prise en compte des imperfections. La Section 4 est dédiée à l'application de la méthodologie à des cas de barrages à partir de dossiers simplifiés.

Modèle d'évaluation de la performance des barrages

Nous avons proposé une approche permettant de prendre en compte des informations de natures différentes utilisées par les experts pour évaluer la performance du barrage. Dans cette approche, les différentes données sont formalisées sous le format d'« indicateurs » de manière à fournir des évaluations robustes. Un modèle d'agrégation des indicateurs permet d'obtenir en sortie, la performance des différentes fonctions du barrage (drainage, étanchéité...), la performance de l'ouvrage vis-à-vis de modes de rupture (érosion interne, glissement des talus...) et la conformité aux règles de l'art des différents composants du barrage (drain, masque d'étanchéité amont...). Ce modèle a été détaillé dans [6] et utilisé avec des données précises. Seuls sont présentés ici les éléments nécessaires à la compréhension de la prise en compte des imperfections.

Données brutes

Pour évaluer la performance et la sécurité d'un barrage, les experts utilisent des données de différentes natures :

- des observations visuelles : observations de fissures, fuites, présence de végétation sur les talus... ;
- des données issues des appareils d'auscultation : mesures de la piézométrie, des débits de drainage... ;
- des sorties de modèles mathématiques : calcul du gradient hydraulique, coefficient de résistance au glissement du remblai ;
- des données sur la conception et la réalisation : caractéristiques des matériaux et des composants (perméabilité, épaisseur du masque amont, type de drain...), moyens mis en œuvre (type de scarification, nombre de passes...)...

Données formalisées

Nous avons proposé une grille de formalisation unique permettant de représenter ces différentes données brutes et rendre leur utilisation robuste, respectant des critères de répétabilité et reproductibilité. La grille qui définit le format des « indicateurs » comprend sept champs : nom, définition, mode opératoire, échelle et références, caractéristiques spatiales (échantillonnage, localisation spatiale) et temporelles (fréquence de mesure, fréquence d'analyse). Les notes fournies par tous les indicateurs sont des niveaux de dégradation, définis sur une échelle de 0 (excellent – aucune dégradation) à 10 (inacceptable – niveau élevé de dégradation) avec 6 jalons (excellent, bon, passable, médiocre, mauvais, inacceptable). Le Tableau 1 donne un exemple d'indicateur formalisé.

Nom	Fontis – cônes d'affaissement
Définition	Effondrement de terrain localisé, souvent en forme d'entonnoir provoqué par la présence d'un vide qui se propage verticalement vers la surface du barrage. Se traduit par un affaissement du terrain (cône) ou la présence d'un trou (fontis)
Echelle et référence	0 : absence de fontis ou de cône d'affaissement 6 : fontis isolé, de petite taille (quelques dm) et ancien (quelques années) OU suspicion de fontis (cônes d'affaissement) 7 – 9 : fontis isolé, de petite taille, et récent (<1 an) OU fontis isolé, de grande taille et ancien 10 : fontis de grande taille et récent
Localisation	Crête, talus amont, talus aval
Caractéristique de temps	Evaluation menée une fois par semaine

Tableau 1. Exemple d'indicateur

En phase opérationnelle, les experts utilisent ces grilles afin de noter les différents indicateurs identifiés et formalisés.

Sorties du modèle

Le nombre de variables impliquées (indicateurs) dans des systèmes complexes peut être très important. Les personnes en charge de leur contrôle essayent souvent d'obtenir une évaluation plus synthétique du système par agrégation des données disponibles. Cette évaluation globale permet à l'expert, dans un contexte d'aide à la décision, de proposer, si nécessaire, des actions correctives pouvant être des actions de maintenance, un confortement ou des actions d'urgence.

Un modèle a ainsi été établi pour chacun des modes de rupture ou de dégradation du barrage : érosion interne dans le remblai, érosion interne dans la fondation, érosion liée à la présence d'un ouvrage traversant, glissement du talus ou du talus et de la fondation, surverse, tassement... Les entrées du modèle sont les indicateurs formalisés. Pour chacun de ces modes, les sorties sont la performance des

fonctions impliquées dans ce mode de rupture ainsi que la performance du barrage vis-à-vis de ce mode de rupture. Par exemple, pour l'érosion interne dans le remblai sont impliquées les fonctions d'étanchéité, de drainage et d'auto-filtration ; quatre données seront donc obtenues en sortie du modèle : la performance de la fonction d'étanchéité, de la fonction de drainage, de la fonction d'auto-filtration et la performance du barrage vis-à-vis de l'érosion interne. Pour illustration, le modèle d'évaluation de la performance des fonctions et de la performance du barrage vis-à-vis d'un mode de rupture est représenté sur la Figure 1.

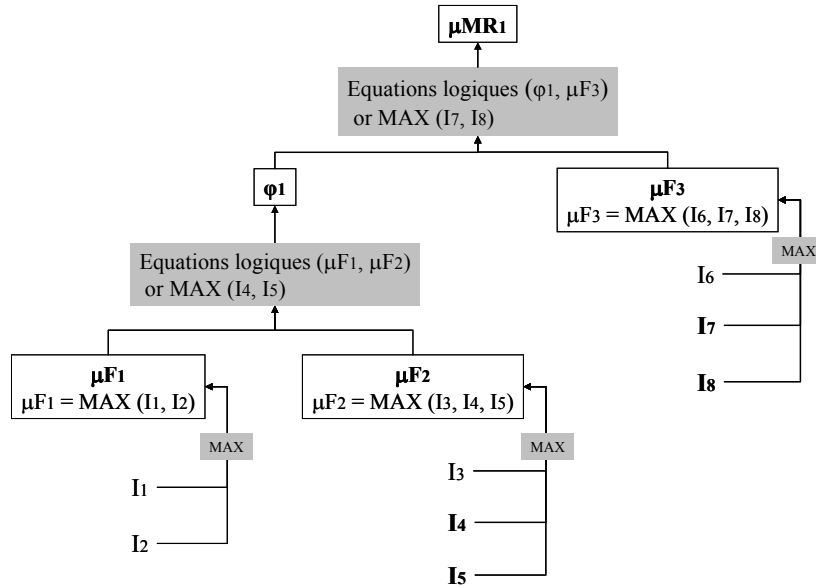


Figure 1. Modèle d'évaluation de la performance – Indicateurs directs en gras

La performance des fonctions (μF_j) est évaluée en calculant le maximum des valeurs des $(n-m+1)$ indicateurs (I_j) impliqués dans l'évaluation de la fonction :

$$\mu F_j = \max_{j=m}^n [I_j] \quad [1]$$

Par exemple, la performance de la Fonction 1 (μF_1) est évaluée par $\text{MAX}(I_1, I_2)$.

Des calculs intermédiaires sont menés pour évaluer la performance vis-à-vis d'un mode de rupture. Premièrement, les performances de deux fonctions sont combinées. Par exemple sur la Figure 1, μF_1 et μF_2 sont combinées pour évaluer ϕ_1 qui est un phénomène. Ces combinaisons sont effectuées en employant des équations logiques faisant intervenir μF_1 , μF_2 et des indicateurs « directs » c'est-à-dire des indicateurs qui renseignent directement sur un phénomène. I_4 et I_5 sont des indicateurs directs sur la Figure 1. Les équations logiques agrégeant μF_1 et μF_2 pour obtenir ϕ_1 sont :

$$\begin{aligned} & \text{SI } I_4 > 2 \text{ OU } I_5 > 2 \\ & \text{ALORS } \phi_1 = \text{MAX}[I_4, I_5] \end{aligned} \quad [2]$$

$$\begin{aligned} & \text{SI } I_4 \leq 2 \text{ ET } I_5 \leq 2 \text{ ET } \mu F_1 \leq 2 \\ & \text{ALORS } \phi_1 = \mu F_1 \end{aligned} \quad [3]$$

$$\begin{aligned} & \text{SI } I_4 \leq 2 \text{ ET } I_5 \leq 2 \text{ ET } \mu F_1 > 2 \\ & \text{ALORS } \phi_1 = \mu F_2 \end{aligned} \quad [4]$$

La note attribuée lors de l'évaluation de ce phénomène est ensuite combinée avec μF_3 pour obtenir μMR_1 selon le même principe d'agrégation.

La Figure 2 présente une application de la Figure 1 au cas de l'érosion interne dans le remblai. Trois fonctions sont concernées : Etanchéité, Drainage et Auto-filtration. Quatorze indicateurs permettent d'évaluer la performance des fonctions et par combinaison, la performance vis-à-vis de l'érosion interne dans le remblai. Cinq indicateurs directs ont été identifiés : deux d'entre eux renseignent directement le phénomène d'insuffisance de la capacité de drainage (fuite eau claire et piézométrie) et trois renseignent directement l'occurrence d'une érosion interne dans le remblai (fontis, tassements différentiels et fuite d'eau chargée). Les agrégations sont réalisées avec les équations [1] à [4].

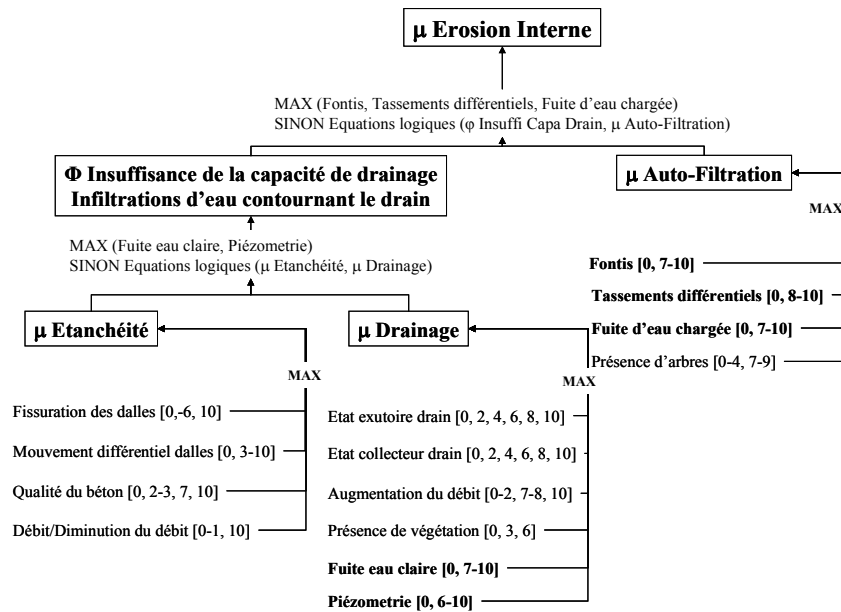


Figure 2. Modèle d'évaluation de la performance – Indicateurs directs en gras

Le modèle peut être utilisé avec des données précises ou imprécises ; nous expliquons dans le paragraphe suivant comment sont prises en compte les imperfections.

Démarche de prise en compte des imperfections

Dans l'approche développée, les experts expriment la valeur de chaque indicateur à partir des données qu'ils possèdent sur l'ouvrage : observations in situ, données d'auscultation traitées, données présentes dans le dossier du barrage et résultat de modèles. Si ces données présentent des imperfections, celles-ci doivent être prises en compte afin de mieux représenter la réalité que ne le ferait une note précise : en effet, imposer une notation des indicateurs sous forme d'une note précise alors que des imperfections sont présentes, pourrait conduire à une note très sévère ce qui aurait pour conséquence directe la proposition de mise en œuvre d'actions pouvant être plus drastiques qu'elles ne devraient être. Il s'agit donc de proposer une méthode qui permette aux experts de représenter les imperfections qui entachent ces différentes données puis de les propager dans le modèle d'évaluation de la performance.

En fonction du type d'imperfection, imprécision ou incertitude, et de la nature des données disponibles, des méthodes particulières ont été développées et peuvent être mises en œuvre [7] : probabilités, théorie de l'évidence, théorie des possibilités, méthodes par intervalles, sous-ensembles flous. Dans notre cas, les approches possibilistes sont bien adaptées car elles permettent de traiter les dires d'experts. Les approches possibilistes ont également l'intérêt de représenter les incertitudes et les imprécisions dans un cadre unique, d'assurer une représentation facilement manipulable de façon automatique et offrent un mode de représentation pertinent et pratique d'usage pour l'utilisateur c'est-à-dire l'expert en charge de la notation des indicateurs. Les approches possibilistes ont été initiées en 1965 [8] pour la logique floue, puis en 1978 pour la théorie des possibilités [9]. Elles ont donné lieu à de nombreuses recherches parmi lesquelles on peut citer [10], [11], [12], [13].

La démarche comporte les trois étapes classiques de fuzzification, propagation des imperfections et défuzzification (cf. Figure 3) qui sont détaillées dans les paragraphes suivants.

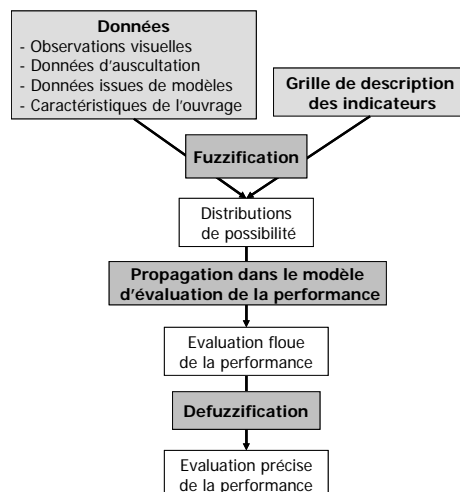


Figure 3. Démarche de représentation et propagation des imperfections

Fuzzification

L'étape de fuzzification correspond à l'expression de la note d'un indicateur et des imperfections qui le caractérisent par une distribution de possibilité modélisée par un sous-ensemble flou normalisé. Un sous-ensemble flou est caractérisé par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x de X le degré $\mu_A(x)$ avec lequel x appartient à A ; $\mu_A(x)$ est compris entre 0 et 1. La Figure 4 donne un exemple de sous-ensemble flou normalisé trapézoïdal. Sur cet exemple :

- $\mu_A(3) = 0,5$ ce qui signifie que la valeur 3 appartient au sous-ensemble flou A avec un degré de 0,5 ;
- $\mu_A(4) = 1$ ce qui signifie que la valeur 4 appartient au sous-ensemble flou A avec un degré de 1.

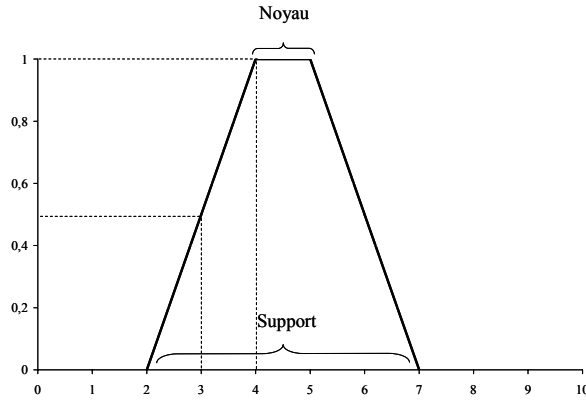


Figure 4. Distribution de possibilité

Un sous-ensemble flou peut être défini par des alpha-coupes C_α :

$$C_\alpha = \{x | \mu(x) \geq \alpha\} \tag{5}$$

Deux alpha-coupes particulières définissent le noyau et le support du sous-ensemble flou.

Le noyau du sous-ensemble flou A est défini par :

$$C_1 = \text{Noy}(A) = \{x \in X | \mu_A(x) = 1\} \tag{6}$$

Le support du sous-ensemble flou est défini par :

$$C_0 = \text{Supp}(A) = \{x \in X | \mu_A(x) > 0\} \tag{7}$$

Dans notre cas, cette distribution est déclarée par un expert à partir des informations dont il dispose et en utilisant la grille de formalisation des indicateurs qui définit notamment l'échelle et les références sur cette échelle. Le noyau représente les valeurs les plus vraisemblables de l'indicateur évalué sur une échelle de 0 à 10. Cette déclaration est téméraire mais informative. Cet intervalle correspond au sous-ensemble dans lequel l'expert pense que la valeur réelle a le plus de chance de se trouver. Le support représente, quant à lui, l'ensemble des valeurs possibles de l'indicateur. Cette déclaration est prudente mais peu informative. Cet intervalle correspond au sous-ensemble dans lequel l'expert est certain que la valeur réelle se trouve. Enfin, l'expert considère que l'indicateur ne peut pas prendre certaines valeurs jugées impossibles (les notes de 0 à 1 et de 8 à 10 sur la Figure 4). La construction de la distribution est faite par interpolation linéaire du support et du noyau. Pour simplifier le travail de l'expert, nous lui proposons de choisir une distribution parmi des distributions prédéfinies : triangulaire (triangle I et triangle II), trapézoïdale, intervalle précis, note précise (cf. Figure 5). La paramétrisation de la fonction d'appartenance dépend de l'analyse, implicite actuellement, que l'expert aura faite sur les données.

Nombre précis	
Intervalle précis	
Nombre flou triangle I	
Nombre flou triangle II	
Intervalle flou	

Figure 5 : Différentes distributions de possibilité

Propagation dans le modèle

Les imperfections représentées par les distributions de possibilité sont propagées dans le modèle d'évaluation de la performance. Zadeh [8] a proposé le principe d'extension pour étendre les opérations entre nombres réels aux opérations correspondantes entre sous-ensembles flous. Soit $\tilde{B} = f(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n)$. La fonction d'appartenance μ_B de ce sous-ensemble flou \tilde{B} est obtenue à partir des fonctions d'appartenance μ_{A_i} des sous-ensembles flous $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$ par :

$$\mu_B(b) = \sup_{\substack{a_1 \dots a_n \\ b=f(a_1, \dots, a_n)}} \min(\mu_{A_1}(a_1), \mu_{A_2}(a_2), \dots, \mu_{A_n}(a_n)) \quad [10]$$

Par ce principe, il est alors possible de réaliser les combinaisons en utilisant notamment les opérateurs mathématiques classiques : addition, soustraction, produit, quotient, calcul du minimum, calcul du maximum. Ainsi, dans notre cas, les a_i correspondent aux notes données aux indicateurs et b est l'évaluation de la performance. La fonction f est la fonction Maximum ou une fonction issue des équations [2] à [4].

La Figure 6 illustre la propagation des imperfections dans le modèle d'évaluation de la performance du barrage vis-à-vis du mode de rupture par érosion interne dans le remblai. Cette Figure se rapporte à un barrage équipé d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG).

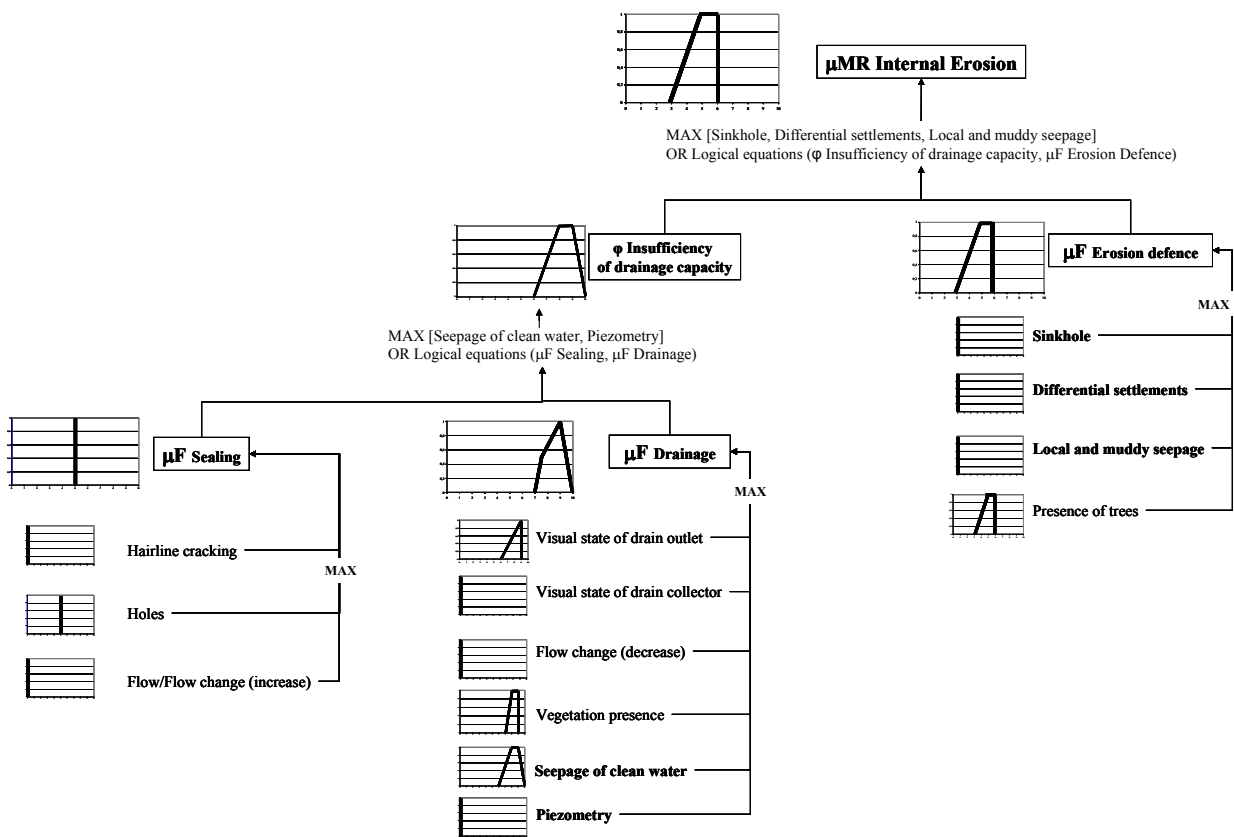


Figure 6. Propagation des distributions de possibilité dans le modèle d'évaluation de la performance

Défuzzification

Le résultat obtenu à l'issue de la propagation dans le modèle d'évaluation global du barrage est un sous-ensemble flou. Ces informations peuvent être utilisées directement par les experts afin de prendre des décisions, voire être les entrées d'un système d'aide à la décision. Toutefois, il peut être pertinent de réaliser une opération de défuzzification qui permette d'obtenir une note précise ; c'est le cas quand les experts sont amenés à communiquer les résultats concernant la sécurité du barrage aux autres acteurs de la sécurité que sont le propriétaire et l'exploitant du barrage. Ainsi, la présentation de notes précises ou d'intervalles figurant la sécurité du barrage vis-à-vis des différents modes de rupture sur un diagramme radar pourrait être un outil intéressant pour la communication des résultats.

Différentes méthodes de défuzzification sont envisageables et mènent à des résultats différents : méthodes liées au maximum, au centre de gravité... Sur la Figure 6, la défuzzification a été faite par la méthode du maximum. Le choix de la méthode de défuzzification est délicat car le résultat obtenu constitue l'information sur laquelle s'appuie la prise de décision ultérieure (réparation, maintenance...). La Figure 7 traduit les difficultés de cette étape : en fonction de la méthode de défuzzification employée, le résultat peut être identique alors que les sous-ensembles flous sont très différents de par leur support et leur noyau. C'est le cas avec les méthodes LOM (Last of Maxima), LOS (Last of Support) et COG (Center of Gravity) Il est à noter que la Figure 6 ne présente qu'une partie des méthodes décrites dans la littérature.

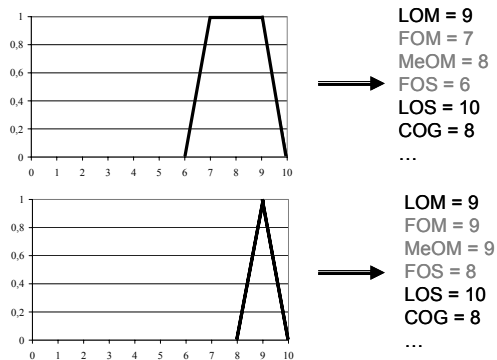


Figure 7. Défuzzification

LOM : Last of Maxima – FOM : First of Maxima – MeOM : Mean of Maxima – FOS : First of Support – LOS : Last of Support – COG : Center of Gravity

Nos recherches actuelles s'orientent vers une défuzzification par intervalles [14], [15] qui permet d'obtenir non plus une seule note mais un intervalle ce qui permet de conserver une grande partie de l'information intéressante mais également de pouvoir effectuer des comparaisons facilement et de présenter de manière simple les résultats à des personnes non averties.

Applications

L'objectif est de tester la faisabilité de la méthode auprès des futurs utilisateurs et de faire une comparaison des distributions fournies par différents experts afin d'analyser la compatibilité de ces notes. Trois experts ont évalué des indicateurs sous forme de distributions de possibilité, en se référant à des fiches et aux grilles de description des indicateurs décrites plus haut et illustrées avec l'exemple de l'indicateur « Fontis » (cf. Tableau 1). Les fiches comportent les sections suivantes : description du barrage (hauteur, date de premier remplissage, capacité du réservoir, type d'étanchéité, nature des fondations...), description de l'indicateur en quelques paragraphes et photos dans le cas d'indicateurs visuels (cf. Figure 8).

Indicateur n°1

1) Description du barrage

Le barrage V1-JAK1 est un petit ouvrage dont la première mise en eau date de 1979. Il est fondé sur des maxims alluviaux. Il est constitué d'un remblai de 8 mètres de hauteur étanché par un masque amont réalisé par géomembrane confinée. Les fruits amont et aval sont respectivement de 2,5 et 2. Le volume retenu est de 350 000 m³.

L'étanchéité amont du remblai est obtenue par membrane Colétraçha, confinée sous une couche de 2 m de graves type tout-venant et rip-rap en enrochements jusqu'à la cote RN.

2) Description de l'indicateur à noter

Le Rip Rap est formé de petits enrochements, qui se sont déplacés vers le bas par rapport à leur position originale, sous l'effet du battillage. Cette couche de Rip Rap est maintenant fortement dégradée. Nous remarquons ainsi une marche d'érosion externe dans la zone de marnage (autour de la cote RN). Cette marche est assez importante et atteint quelques décimètres.






Figure 8. Exemple de fiche descriptive pour la notation des imperfections

Quinze indicateurs ont ainsi été notés sous la forme de distributions de possibilité. Différents types de distributions ont été employés : trapèze, triangle, intervalle précis et note précise (cf. Figure 9). La longueur maximale utilisée pour définir le support des distribution est de 5 intervalles (par exemple F0 = [2, 3, 4, 5, 6]) et la longueur maximale pour définir le noyau est de 2 intervalles (par exemple, F1 = [5, 6]).

Des analyses de compatibilité par calcul de la surface d'intersection des distributions données par deux experts pour un même indicateur ont été réalisées. Pour la majorité des indicateurs, il existe une réelle compatibilité entre les notes données par les trois experts. Toutefois, pour certains indicateurs, la compatibilité est faible voire nulle lorsqu'on considère les notes de deux experts (et a fortiori, les notes des trois experts). Nous pouvons dès à présent évoquer une difficulté de notation à partir de seuls dossiers très simplifiés (un dossier est composé de quelques paragraphes et le cas échéant, de quelques photos). Des exercices de notation directement sur site avec une lecture préalable du dossier du barrage devront être conduits afin d'améliorer cette situation. Par ailleurs, cette analyse de compatibilité devra être examinée dans le cadre d'une étude de sensibilité du modèle aux variations des indicateurs. En effet, une incompatibilité faible pour un indicateur donné aura d'autant moins d'importance sur le résultat final que le modèle est peu sensible aux variations de cet indicateur.

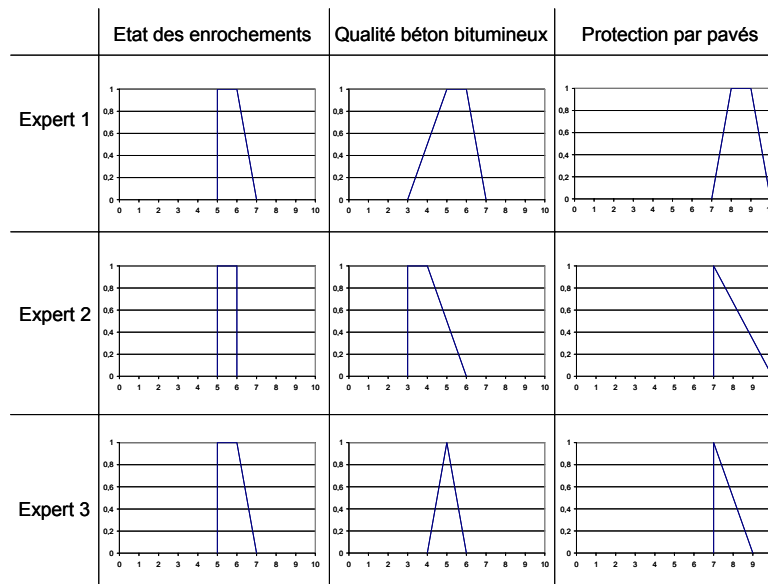


Figure 9. Exemples de distributions de possibilité déclarées par trois experts pour trois indicateurs

Les distributions de possibilité déclarées par les experts ont ensuite été propagées dans le modèle d'évaluation de la performance. La Figure 6 est un exemple partiel de la propagation des imperfections des données dans le modèle d'évaluation de la performance tiré de ces séances de notation par les experts.

Conclusion

Une démarche de prise en compte des imperfections dans le cadre de l'évaluation de la performance des barrages a été proposée. Cette démarche, basée sur une approche possibiliste repose sur trois phases : fuzzification, propagation dans le modèle et défuzzification. Elle a été appliquée sur des cas concrets de dossiers simplifiés d'ouvrages. Ceci a permis, en première approche, de vérifier la pertinence et la facilité d'utilisation de la méthode auprès des experts.

Ce type de méthodes apporte une alternative aux méthodes probabilistes, plus classiques en matière de sûreté de fonctionnement, lorsque ces méthodes ne peuvent être employées du fait d'une méconnaissance de la loi de probabilité, d'un nombre de données réduit, d'une incertitude épistémique et non aléatoire... Les méthodes possibilistes sont par contre bien adaptées notamment pour expliciter des dires d'experts en intégrant une prise en compte des incertitudes et imprécisions. Dans le cas qui nous intéresse, il est important de signaler que les experts qui ont participé à l'exercice ont bien accepté la démarche et l'ont trouvée pertinente pour une application concrète future dans des diagnostics et des expertises d'ouvrages. L'approche proposée doit pouvoir être appliquée à d'autres exemples de maîtrise des risques où les êtres humains jouent un rôle fort dans l'évaluation du système et la prise de décision.

Bibliographie

- [1] Boissier D. and Alhajar J., Probabilistic and fuzzy approaches for foundations reliability, dans les actes de la conférence ICOSAR'97, Kyoto, Japan, 1997.
- [2] Cheng M. Y. and Ko C. H., Automated safety monitoring and diagnosis system for unstable slopes, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18, 64-77, 2003.
- [3] El-Baroudy I. and Simonovic S. P., Application of the fuzzy performance measures to the City of London water supply system, *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 255-265, 2006.
- [4] Najjaran H., Sadiq R. and Rajani B., Fuzzy expert system to assess corrosion of cast/ductile pipes from backfill properties, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21, 67-77, 2006.
- [5] Sasmal S., Ramanjaneyulu K., Gopalakrishnan S. and Lakshmanan N., Fuzzy logic based condition rating of existing reinforced concrete bridges, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20, 261-273, 2006.
- [6] Curt C., Peyras L. and Boissier D., Méthode d'évaluation de la performance des barrages basée sur l'expertise. Application aux barrages en remblai, dans les actes de la conférence LambdaMu15 - 15e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Lille, France, 2006.
- [7] Ben Armor S. and Martel J. M., Le choix d'un langage de modélisation des imperfections de l'information en aide à la décision, dans les actes de la conférence Congrès de l'ASAC, Québec, Canada, 2004.
- [8] Zadeh L., The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning, *Information Sciences*, 8, 199-249, 1975.
- [9] Zadeh L. A., Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 3-28, 1978.
- [10] Baudrit C., Dubois D. and Fargier H., Practical representation of incomplete probabilistic information, dans les actes de la conférence 2nd International Conference on Soft Methodology and Random Information Systems, Oviedo, Spain, 2004.
- [11] Bouchon-Meunier B., *La logique floue*, Presses Universitaires de France, 1999.
- [12] Dubois D., Possibility theory and statistical reasoning, *Computational Statistics & Data Analysis*, 51, 47-69, 2006.
- [13] Mauris G., Lasserre V. and Foulloy L., Fuzzy modeling of measurement data acquired from physical sensors, *IEEE Trans on Measurement and Instrumentation*, 49, 1201-1205, 2000.
- [14] Dubois D. and Prade H., The mean value of a fuzzy number, *Fuzzy Sets and Systems*, 24, 179-300, 1987.
- [15] Dubois D. and Prade H., *Fundamentals of Fuzzy sets*, Kluwer Academic Publishers, 2000.

UTILISATION DE LA THEORIE DES POSSIBILITES POUR L'EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES BARRAGES

USE OF THE THEORY OF POSSIBILITY FOR THE ASSESSMENT OF DAM PERFORMANCE

Corinne CURT

Cemagref
Unité Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie
3275 Route de Cézanne
CS 40061
13182 Aix-en-Provence CEDEX 5 – France
tel : 04.42.66.99.38
corinne.curt@cemagref.fr

Daniel BOISSIER

Laboratoire Génie Civil
Polytech'Clermont
Université Blaise Pascal
24, avenue des Landais – BP 206
63174 Aubière Cedex – France
tel : 04.73.40.75.21
daniel.boissier@univ-bpclermont.fr

Résumé

Cet article présente une méthode basée sur la théorie des possibilités qui permet de représenter et propager des imperfections qui entachent les données d'entrée d'un modèle d'évaluation de la performance d'un barrage puis de fournir, le cas échéant, une évaluation précise de la performance. Elle comporte trois phases : fuzzification, propagation dans le modèle d'évaluation de la performance et défuzzification. L'application de la méthode à des cas simplifiés a montré son intérêt et sa facilité d'utilisation par les experts en charge de la notation.

Summary

This article presents a method based on the theory of possibility. It allows the representation of these imperfections, their propagation in a model developed for the assessment of the performance of dam and, if necessary, the proposition of a precise assessment of performance. It relies on three main stages: fuzzification, propagation into the performance assessment model and defuzzification. The method was applied on simplified cases. The experts found the method relevant and easy to use.

Le développement de méthodes et d'outils d'aide à l'évaluation de la performance et de la sécurité des barrages représente un enjeu fort. Nous avons proposé un modèle d'évaluation de la performance basé sur une formalisation et une agrégation des connaissances de nature différente manipulées par un groupe d'experts : observations visuelles in situ, données d'auscultation traitées, données présentes dans le dossier du barrage et résultat de modèles. Dans cette approche, les différentes données sont formalisées sous le format d'« indicateurs » de manière à fournir des évaluations robustes. Les indicateurs constituent les entrées d'un modèle d'agrégation qui permet d'obtenir en sortie, la performance des différentes fonctions du barrage (drainage, étanchéité...), la performance de l'ouvrage vis-à-vis de modes de rupture (érosion interne, glissement des talus...) et la conformité aux règles de l'art des différents composants du barrage (drain, masque d'étanchéité amont...).

Toutefois, les données d'entrée du modèle sont entachées d'imprécision, d'incertitude et/ou d'incomplétude. Il est important de prendre en compte ces imperfections afin de ne pas perdre une information intéressante et d'avoir une évaluation qui représente mieux la réalité que ne le ferait une note déterministe. L'objectif est ici de proposer une méthode basée sur la théorie des possibilités et la logique floue permettant de représenter ces imperfections, de les propager dans le modèle d'évaluation de la performance puis de fournir, le cas échéant, une évaluation précise de la performance. Les approches possibilistes sont ici bien adaptées car elles permettent de traiter les dires d'experts. Elles ont également l'intérêt de représenter les incertitudes et les imprécisions dans un cadre unique, d'assurer une représentation facilement manipulable de façon automatique et offrent un mode de représentation pertinent et pratique d'usage pour l'utilisateur c'est-à-dire l'expert en charge de la notation des indicateurs. La démarche comporte les trois étapes classiques : fuzzification, propagation des imperfections et défuzzification.

La fuzzification consiste à exprimer la note d'un indicateur et des imperfections sous la forme d'une distribution de possibilité. Dans notre cas, cette distribution est déclarée par un expert à partir des informations dont il dispose et en utilisant la grille de formalisation des indicateurs qui définit notamment l'échelle et les références sur cette échelle. Différentes distributions sont proposées aux experts pour la notation : triangulaire, trapézoïdale, intervalle précis, note précise. Les imperfections représentées par les distributions de possibilité sont ensuite propagées dans le modèle d'évaluation de la performance en mettant en œuvre le principe d'extension de Zadeh qui permet d'étendre les opérations entre nombres réels aux opérations correspondantes entre sous-ensembles flous. Le résultat obtenu à l'issue de la propagation dans le modèle d'évaluation global du barrage est un sous-ensemble flou. Ces informations peuvent être utilisées directement par les experts afin de prendre des décisions voire être les entrées d'un système d'aide à la décision. Toutefois, il peut être pertinent de réaliser une opération de défuzzification qui permet d'obtenir une note précise à partir d'une distribution de possibilité quand les experts sont amenés à communiquer les résultats concernant la sécurité du barrage à d'autres acteurs de la sécurité que sont le propriétaire et l'exploitant du barrage. Nos recherches actuelles s'orientent vers une défuzzification par intervalles qui permet d'obtenir non plus une seule note mais un intervalle ce qui permet de conserver une grande partie de l'information intéressante mais également de pouvoir effectuer des comparaisons facilement et de présenter de manière simple les résultats à des personnes non averties.

Ce type de méthodes apporte une alternative aux méthodes probabilistes, plus classiques en matière de sûreté de fonctionnement, lorsque ces méthodes ne peuvent être employées du fait d'une méconnaissance de la loi de probabilité, d'un nombre de données réduit, d'une incertitude épistémique et non aléatoire... Les méthodes possibilistes sont par contre bien adaptées notamment pour expliciter des dires d'experts en intégrant une prise en compte des incertitudes et imprécisions. Dans le cas qui nous intéresse, il est important de signaler que les experts qui ont participé un exercice de notation des indicateurs sous la forme de distributions de possibilité ont bien accepté la démarche et l'ont trouvée pertinente pour une application concrète future dans des diagnostics et des expertises d'ouvrages. L'approche proposée doit pouvoir être appliquée à d'autres exemples de maîtrise des risques où les êtres humains jouent un rôle fort dans l'évaluation du système et la prise de décision.