

# ANALYSE DE FIABILITE POUR EVALUER LA PROBABILITE D'INITIATION DE DIFFERENTS MECANISMES D'EROSION INTERNE D'UN BARRAGE EN REMBLAI

## *Reliability analysis to assess the probability of initiation of different internal erosion mechanisms in an embankment dam*

Claudio CARVAJAL, Fengdong CHI, Laurent PEYRAS

INRAE, 3275 route de Cézanne, 13182 Aix-en-Provence

[claudio.carvajal@inrae.fr](mailto:claudio.carvajal@inrae.fr) ; [fengdong.chi@inrae.fr](mailto:fengdong.chi@inrae.fr) ; [laurent.peyras@inrae.fr](mailto:laurent.peyras@inrae.fr)

Pierre BREUL

Université Clermont-Auvergne, Clermont-Ferrand

[pierre.breul@uca.fr](mailto:pierre.breul@uca.fr)

### MOTS CLEFS

Probabilité de défaillance, analyse de fiabilité, éléments finis stochastiques, analyse d'écoulements, variabilité spatiale

### KEY WORDS

Failure probability, reliability analysis, stochastic finite elements, seepage analysis, spatial variability

### RÉSUMÉ

*L'étude de l'accidentologie des barrages en remblai montre que l'érosion interne est l'une des principales causes à l'origine d'incidents ou d'accidents sur ces ouvrages. Ce mécanisme reste toutefois difficile à évaluer dans un cadre probabiliste du fait d'un état de l'art sur les conditions d'état-limite toujours en cours de construction par la profession et du fait que les paramètres intervenant dans ces conditions d'état-limite sont difficiles à obtenir et à évaluer de façon probabiliste.*

*Cette étude présente une analyse probabiliste des mécanismes d'initiation de l'érosion interne qui prend en compte la variabilité spatiale des propriétés hydrauliques des matériaux. L'initiation d'une érosion interne dans un barrage (érosion régressive, suffusion et érosion de contact) peut être due à une faiblesse locale du remblai et il est nécessaire d'apporter avec finesse une analyse stochastique spatialisée des propriétés de résistance dans le corps de l'ouvrage. Ainsi, nous proposons une analyse probabiliste de la variabilité spatiale des matériaux par des champs aléatoires. En raison du faible nombre d'essais de perméabilité généralement disponibles, cette étude utilise des corrélations avec d'autres propriétés des matériaux telles que la densité et la granulométrie, pour évaluer la variabilité spatiale de la perméabilité.*

*La méthode des simulations de Monte-Carlo est utilisée pour générer des réalisations des champs aléatoires de perméabilité qui sont ensuite intégrés dans le modèle aux éléments finis d'analyse d'écoulements. L'analyse probabiliste des résultats du modèle aux éléments finis permet d'évaluer ensuite la moyenne et la variance de la vitesse d'écoulement, du gradient hydraulique, de la pression interstitielle et d'autres paramètres liés à l'initiation de l'érosion interne. En combinaison avec les critères correspondant aux trois différents mécanismes d'initiation d'érosion interne (érosion régressive, suffusion et érosion de contact), la sûreté d'un barrage existant est évaluée en calculant la probabilité de défaillance ( $P_f$ ) à partir de la distribution de probabilité du facteur de sécurité ( $FS$ ) vis-à-vis du mécanisme d'initiation d'érosion interne.*

*La méthode proposée a été appliquée sur le cas d'un barrage en remblai existant pour évaluer la probabilité d'initiation de trois mécanismes d'érosion interne. Les résultats de cette analyse probabiliste peuvent être utilisés dans le cadre d'une étude d'analyse des risques d'un barrage en remblai et intégrés dans une étude de dangers, permettant d'évaluer la probabilité d'initiation des mécanismes d'érosion interne dans les scénarios de défaillance pouvant conduire à une rupture par érosion interne.*

## ABSTRACT

*The accidentology of embankment dams shows that internal erosion is one of the main causes of incidents or accidents involving these structures. However, this mechanism remains difficult to assess in a probabilistic framework, as the state of the art on limit state conditions is still being developed, and the parameters involved in these limit state conditions are difficult to obtain and assess probabilistically.*

*This study presents a probabilistic analysis of internal erosion initiation mechanisms that takes into account the spatial variability of the hydraulic properties of soils. The initiation of internal erosion in a dam (backward erosion, suffusion and contact erosion) may be due to a local weakness in the embankment, and it is necessary to provide a detailed spatial stochastic analysis of the strength properties in the body of the structure. We therefore propose a probabilistic analysis of the spatial variability of materials by random fields. Due to the small number of permeability tests generally available, this study uses correlations with other material properties, such as density and grain size distribution, to assess the spatial variability of permeability.*

*Monte Carlo simulations are used to generate samples of random fields of permeability, which are then incorporated into the finite element seepage analysis model. Probabilistic analysis of the finite element model results is then used to evaluate the mean and variance of flow velocity, hydraulic gradient, pore pressure and other parameters related to the initiation of internal erosion. In combination with the criteria corresponding to the three different internal erosion initiation mechanisms (backward erosion, suffusion and contact erosion), the safety of an existing dam is assessed by calculating the probability of failure (Pf) from the probability distribution of the factor of safety (FS) with respect to the internal erosion initiation mechanism.*

*The proposed method was applied to an existing embankment dam to assess the probability of initiation of three internal erosion mechanisms. The results of this probabilistic analysis can be used as part of a risk analysis study for an embankment dam and incorporated into a hazard study, making it possible to assess the probability of initiation of internal erosion mechanisms in failure scenarios that could lead to failure by internal erosion.*

## 1. INTRODUCTION

L'érosion interne correspond à l'entraînement de particules de sol suite à l'action des écoulements internes. L'initiation de l'érosion interne se présente généralement sous la forme de quatre mécanismes élémentaires : l'érosion régressive, la suffusion, l'érosion par contact et l'érosion de conduit [1]. Parmi les 232 cas de ruptures de barrages en remblai répertoriés dans le bulletin 188 de la CIGB [2], 80 sont attribués à l'érosion interne, représentant ainsi 34 % des cas. L'étude et la description du processus d'érosion interne font l'objet de nombreux travaux de recherche dans les domaines de l'ingénierie géotechnique, de l'ingénierie hydraulique et de la géomorphologie. La capacité du sol à résister à l'érosion interne et les mécanismes associés sont au cœur de cette question, et les expériences et les études de simulation numérique connexes sont également abondantes dans la littérature.

Quelques travaux récents disponibles dans la littérature ont visé à évaluer l'érosion interne dans un cadre probabiliste. Nous pouvons citer par exemple :

- Hekmatzadeh et al., [3] ont évalué la stabilité contre l'érosion régressive d'une fondation de barrage selon quatre configurations de parois d'étanchéité en utilisant la méthode des éléments finis stochastiques. L'initiation d'érosion régressive est définie par le rapport entre le gradient hydraulique critique et le gradient hydraulique de sortie, en utilisant les critères de Terzaghi.
- Liu et al., [4] ont étudié la vitesse d'infiltration locale par le biais d'une analyse stochastique de l'infiltration incorporant la prise en compte de l'hétérogénéité du sol. Les résultats ont montré que l'augmentation du coefficient de variation des propriétés du sol peut conduire à une augmentation du gradient hydraulique moyen de sortie.

- Robbins et Griffiths [5] ont présenté une étude numérique de l'influence de la variation spatiale de la perméabilité sur l'érosion régressive. L'étude a indiqué que la probabilité de progression de l'érosion est liée à la fois à la variance et à la longueur de corrélation des champs aléatoires de perméabilité.
- Yang et al., [6] ont proposé un modèle de différences finies pour la suffusion basé sur le processus d'autofiltration. L'étude probabiliste a analysé l'effet de la variance et de la longueur de corrélation spatiale de la porosité initiale aléatoirement distribuée et de la teneur en fines sur la masse érodée et sur l'évolution de la perméabilité.
- Kovacs [7] a proposé le critère géométrique pour la suffusion, qui concerne le ratio entre les paramètres  $d_{85}$  ( $d_{85}$  de la fraction la plus fine du sol) et  $O_{50}$  (taille effective de constriction de la fraction grossière).
- En se basant sur le critère géométrique de Kovacs et le critère de Terzaghi, Li et Fannin [8] ont proposé un critère hydromécanique déduit d'essais sur des matériaux instables. Ce critère prend en compte le facteur de réduction  $\alpha$ , qui a été proposé pour la première fois par Skempton & Brogan [9] pour illustrer la proportion de la contrainte effective  $\alpha$  supportée par les fines.
- Shire et al., [10] ont établi un modèle d'éléments discrets qui peut être utilisé pour analyser la distribution des contraintes effectives au sein d'échantillons idéalisés à granulométrie discontinue. Shire et al., [10] ont proposé que le sol avec une teneur en fines de 35 % ou plus a une valeur  $\alpha$  de 1 et est sur-rempli et non suffusif (stable à l'intérieur).
- Certains chercheurs [11, 12, 13] qui ont étudié l'érosion de contact ont proposé des expressions pour les conditions hydrauliques, qui impliquent le détachement et le transport des particules.

Cette étude présente une analyse probabiliste des mécanismes d'initiation de l'érosion interne qui prend en compte la variabilité spatiale des propriétés hydrauliques des matériaux. Ce travail fait partie d'une thèse encadrée par INRAE et l'université Clermont-Auvergne [14]. Les principaux objectifs de cette étude sont les suivants : (1) Représenter la variabilité spatiale des paramètres hydrauliques (densité sèche, densité saturée et porosité) à l'aide de champs aléatoires stationnaires ; (2) Estimer la perméabilité à partir de la distribution granulométrique du sol et de la densité sèche ; (3) Évaluer la sûreté d'un barrage existant en termes de position d'initiation et de probabilité de défaillance pour différents mécanismes d'érosion interne (érosion régressive, suffusion et érosion de contact). L'érosion de conduit n'a pas été examinée dans cet article, car aucun conduit d'écoulement préférentiel n'a été identifié pour le barrage étudié.

Cette approche d'analyse probabiliste pour évaluer la probabilité de défaillance de l'érosion interne pourrait être utilisée dans une analyse de risque d'un barrage existant.

## 2. BARRAGE ETUDIÉ ET CRITÈRES ADOPTÉS POUR L'ANALYSE DE L'ÉROSION INTERNE

### 2.1. Présentation de l'étude de cas

Le barrage étudié, construit en 1998, est un remblai en terre de 23,8 m de haut situé en France. Le barrage ferme une vallée couverte de dépôts alluviaux et peut retenir un réservoir d'environ 5 millions de  $m^3$ . Le niveau maximal de la retenue en exploitation normale est à la cote 50 m NGF (cote RN).

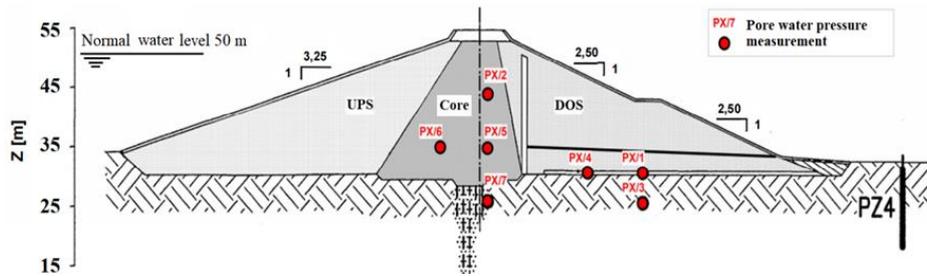


Figure 1 : Coupe transversale principale du barrage d'étude

La Figure 1 présente la coupe transversale principale du barrage. On peut voir que le barrage est formé de trois zones différentes, dont un noyau constitué de limons sableux et deux zones de remblai constituées de sables graveleux, respectivement dans les parties amont et aval du noyau. Ces trois zones sont respectivement identifiées : noyau (CORE), recharge amont (UPS) et recharge aval (DOS). Un drain vertical et un drain horizontal ont été installés dans la partie aval afin de collecter les écoulements d'eau et de rabattre les pressions interstitielles à l'intérieur du barrage. Le drain vertical a une sortie qui est connectée à un tube qui envoie les écoulements d'infiltration vers le pied aval du barrage. Dans la fondation, l'étanchéité a été renforcée avec un rideau d'injections d'environ 15 m de profondeur.

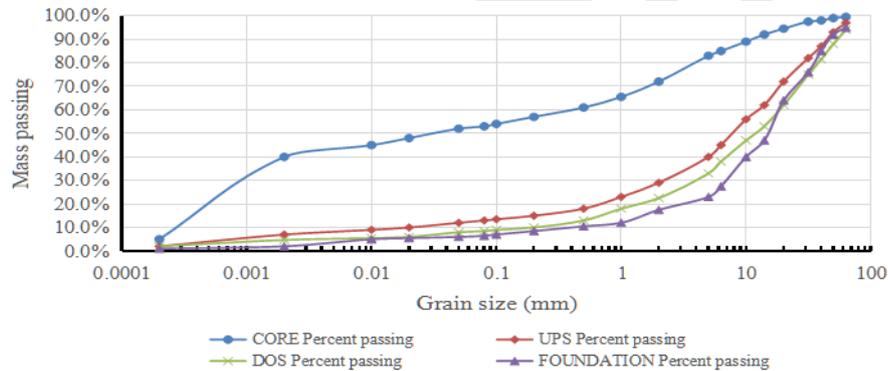


Figure 2 : Courbe granulométrique des zones du barrage d'étude

L'analyse de la distribution granulométrique disponible est présentée dans la Figure 2. Les matériaux de sol utilisés pour la recharge amont UPS (en rouge), la recharge aval DOS (en vert), le noyau (en bleu) et la fondation (en violet). Les données sur les analyses de la distribution granulométrique disponibles se réfèrent à l'étude de Mouyeaux et al., [15].

## 2.2. Critères adoptés dans cette étude pour l'analyse de l'érosion interne

### 2.2.1. Erosion régressive

L'érosion régressive se produit principalement dans la fondation, mais peut également se produire dans le remblai. L'initiation de l'érosion interne commence à la surface libre du côté aval du barrage. Ensuite, le chemin de fuite s'érode en direction de l'amont (vers l'arrière) à travers ou sous les remblais, ce qui finit par former une conduite le long de ce chemin.

Le gradient hydraulique  $i$  est lié à l'initiation de l'érosion régressive. Terzaghi [16] a proposé un critère théorique pour calculer le gradient hydraulique critique  $i_{cr}$  pour l'initiation d'une conduite. Il est valable pour les sols stables à l'intérieur (autofiltrants) et est défini comme suit :

$$i_{cr} = (1 - n) \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$F_{os} = \frac{i_{cr}}{i} = \begin{cases} \geq 1, \text{ safe} \\ < 1, \text{ failure} \end{cases} \quad \text{Eq. (2)}$$

Où  $n$  est la porosité ;  $\rho_s$  et  $\rho_w$  sont les densités des solides du sol et de l'eau, respectivement ;  $\gamma'$  est le poids unitaire effectif du sol et  $\gamma_w$  est le poids unitaire de l'eau. Dans la plupart des cas, cette équation donne des valeurs de  $i_{cr}$  autour de 1 à 1,1.

### 2.2.2. Suffusion

La suffusion se produit lorsque les particules fines du sol sont transportées par le flux d'infiltration à travers les pores des particules plus grossières. La suffusion est due au fait que les particules fines du sol atteignent d'abord la condition d'initiation sous l'action de l'infiltration, se déplacent le long des pores entre les grosses particules et forment des canaux le long de la direction de l'infiltration. Au fur et à mesure que la vitesse d'infiltration augmente, le conduit d'érosion s'étend progressivement vers l'extérieur du sol.

Skempton & Brogan [9] ont indiqué que dans les graviers sableux instables, le conduit pouvait se produire à des gradients hydrauliques d'un tiers à un cinquième du gradient critique théorique suggéré par Terzaghi pour un matériau granulaire homogène de même porosité. Un facteur de réduction des contraintes  $\alpha$  a été introduit dans la définition du  $i_c$  pour tenir compte de l'influence des particules fines présentes dans la matrice des contraintes du sol :

$$i_c = (1 - \alpha) \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad \text{Eq. (3)}$$

Le facteur de réduction des contraintes  $\alpha$  est lié à la mobilité des particules les plus fines et dépend du critère géométrique  $d'_{85}/O_{50}$  de Kovacs [7], où  $d'_{85}$  est le  $d_{85}$  de la fraction la plus fine du sol et  $O_{50}$  la taille de constriction effective de la fraction grossière. Li [17] a suggéré que  $\alpha$  était lié à  $d'_{85}$  correspondant à la fraction fine et à la taille d'ouverture réelle  $O_{50}$  par l'expression suivante :

$$\alpha = 3.85 \frac{d'_{85}}{O_{50}} - 0.616 \quad \text{Eq. (4)}$$

### 2.2.3. Erosion de contact

L'érosion de contact se produit à la suite d'un contact entre des sols grossiers et des sols fins, ce qui entraîne une différence de vitesse d'écoulement dans la zone de contact. Cette différence de vitesse entraîne une érosion du sol fin, qui passe à travers la couche grossière.

L'analyse nécessite l'identification d'interfaces de contact entre deux matériaux ayant des distributions granulométriques différentes. Les conditions d'écoulement (vitesses d'écoulement) sont ensuite évaluées dans ces zones de contact. Brauns [11] a dérivé une formule pour estimer la vitesse critique basée sur les caractéristiques des deux couches :

$$U_{crit} = 0.65.n_D \sqrt{\left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) g d_{50}} \quad \text{Eq. (5)}$$

Avec  $n_D$  la porosité de la couche de gravier,  $\rho_s$  la densité des particules de sable,  $\rho_w$  la densité de l'eau, et  $d_{50}$  le diamètre médian de la courbe granulométrique du sable.

### 3. MODELISATION DE LA VARIABILITE SPATIALE DES PROPRIETES DU SOL DU BARRAGE D'ETUDE

Cette section présente une modélisation probabiliste de la variabilité spatiale de la perméabilité en utilisant les données disponibles sur les propriétés du sol pour le barrage d'étude. La variabilité spatiale des propriétés de résistance à l'érosion (gradient hydraulique critique et vitesse d'écoulement critique) a été réalisée à l'aide du critère des différents mécanismes d'érosion interne mentionnés dans le Bulletin 164 de la CIGB [1].

#### 3.1. Estimation de la perméabilité

La méthode d'estimation de la perméabilité utilisée dans cette étude correspond à celle proposée par Chapuis & Aubertin [18], qui peut être simplifiée par l'équation 6.

$$K_s = \sqrt{10} * \left( \frac{e^3}{(1+e)G_s^2 S_s^2} \right) = \sqrt{10} * \frac{n^3}{(1-n)^2 G_s^2 S_s^2} \quad \text{Eq. (6)}$$

Où  $K_s$  est la perméabilité saturée,  $e$  est l'indice de vide,  $n$  est la porosité,  $G_s$  est la gravité spécifique, et  $S_s$  est la surface spécifique.

Tableau 1 : Perméabilité et coefficient d'anisotropie estimés pour différentes zones du barrage

Zone	Surface spécifique estimée $S_s$ (m <sup>2</sup> /kg)	Coefficient d'anisotropie $K_x: K_y$	Perméabilité estimée	
			$K_x$ (m/s)	$K_y$ (m/s)
Amont	71.948	2	4.43E-6	2.22E-6
Aval	45.335	2	1.56E-5	7.82E-6
Noyau	930.480	5	5.02E-8	1.00E-8
Fondation	49.281	1	1.06E-5	1.06E-5

#### 3.2. Analyse statistique des données disponibles pour le mécanisme d'érosion régressive

Afin d'évaluer la variabilité spatiale du gradient critique, il est nécessaire de générer des champs aléatoires pour la densité sèche  $\rho_d$ , la densité saturée  $\rho_{sat}$  et la porosité  $n$ . Ces paramètres sont évalués à partir des équations classiques suivantes 7 et 8.

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\rho_{sat} = \rho_s + \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_w}\right) \cdot \rho_w \cdot n \quad \text{Eq. (8)}$$

Dans cette étude, la fonction d'auto-corrélation exponentielle (SNX) est utilisée pour simuler la variabilité spatiale des paramètres des propriétés du sol. Le tableau 2 présente les longueurs de corrélation utilisées dans cette étude.

Tableau 2 : Propriétés statistiques du sol (densité sèche, porosité et densité saturée)

Zone	Densité sèche			Porosité			Densité saturée			Longueur de corrélation (m)
	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )			$n$			$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )			
	$\mu$	$\sigma^2$	CoV	$\mu$	$\sigma^2$	CoV	$\mu$	$\sigma^2$	CoV	
UPS	1.99	0.004	3.2%	0.26	0.0004	8.9%	2.25	0.002	1.8%	$L_h=78.1$ $L_v=7.8$
Noyau	1.83	0.004	3.5%	0.32	0.0005	7.3%	2.11	0.002	1.9%	$L_h=13.0$ $L_v=1.5$
DOS	2.05	0.005	3.5%	0.24	0.0007	10.9%	2.29	0.001	1.5%	$L_h=4.9$ $L_v=1.9$
Fondation	2.03	-	-	0.25	-	-	2.28	-	-	-
Drain	2.16	-	-	0.2	-	-	2.36	-	-	-

$\mu$  est la moyenne,  $\sigma^2$  est la variance, et CoV est le coefficient de variation.

### 3.3. Analyse statistique des données disponibles pour le mécanisme de suffusion

Le critère d'initiation de la suffusion a été présenté sous la forme de l'équation 3 dans la section 2.2.2. Ce critère est basé sur le facteur de réduction  $\alpha$ , lequel peut être déterminé à partir de la courbe granulométrique et de la porosité. Dans cette étude, nous disposons des courbes granulométriques pour les différentes zones du barrage (Figure 2) et nous disposons des champs aléatoires de la porosité (évalués à partir des champs aléatoires de densité). Nous pouvons ainsi obtenir des champs aléatoires représentant la variabilité spatiale du gradient critique de suffusion à partir des champs aléatoires de la porosité et du facteur de réduction  $\alpha$ .

### 3.4. Analyse statistique des données disponibles pour le mécanisme d'érosion de contact

Le critère d'initiation de l'érosion de contact a été présenté sous la forme de l'équation 5 dans la section 2.2.3. Cette équation montre que le facteur de sécurité FS de l'érosion de contact est lié à la vitesse critique.

Afin d'étudier le mécanisme d'érosion de contact dans cette étude de cas, l'interface entre le drain horizontal et la recharge aval (limite supérieure) et l'interface entre le drain horizontal et la fondation (limite inférieure) sont sélectionnées, car ces zones présentent les vitesses d'écoulement les plus élevées (voir Figure 5 à gauche).

## 4. SIMULATIONS NUMERIQUES ET RESULTATS

Cette section présente les résultats de l'analyse probabiliste des écoulements dans le barrage étudié, basée sur la méthode des simulations de Monte-Carlo (MCS), afin d'évaluer la probabilité d'initiation des mécanismes d'érosion interne.

### 4.1. Résultats de la simulation de Monte-Carlo

Dans cette application, le logiciel MATLAB est utilisé pour effectuer une simulation de Monte-Carlo (MCS) en intégrant les champs aléatoires de perméabilité dans le modèle d'éléments finis développé avec le code Optum G2. La mise en œuvre a été effectuée selon les quatre étapes suivantes :

- 1) Les surfaces spécifiques des matériaux des recharges et du noyau ont été calculées à partir des courbes granulométriques.
- 2) Des champs aléatoires ont été générés pour la densité sèche, la porosité et la densité saturée. Le champ aléatoire de la densité sèche est ensuite couplé aux valeurs de surface spécifique pondérée pour déduire le champ aléatoire de la perméabilité, comme le montre la Figure 3. Les champs aléatoires de porosité et de densité saturée sont finalement utilisés pour déterminer la variabilité spatiale des propriétés de résistance à l'érosion (gradient hydraulique critique et vitesse d'écoulement critique).

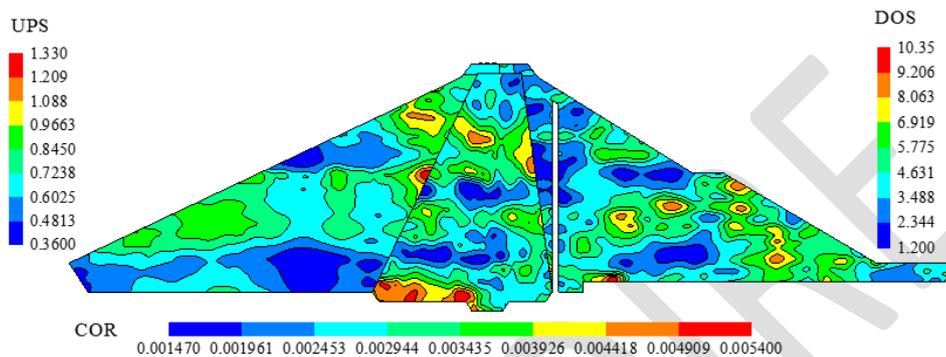


Figure 3 : Exemple de réalisation d'un champ aléatoire de perméabilité (en m/jour) [Chi, 2024]

- 3) Entrer les champs aléatoires de densité sèche, de densité saturée et de perméabilité dans le code Optum G2 et effectuer l'analyse d'infiltration.
- 4) Extraire les résultats de l'analyse d'infiltration à chaque nœud : gradient hydraulique, vitesse d'écoulement et pression interstitielle. Les propriétés de résistance à l'érosion interne (gradient hydraulique critique et vitesse d'écoulement critique) sont calculées pour chaque nœud du modèle sur la base du critère des différents mécanismes d'érosion interne. De cette manière, le facteur de sécurité FS peut être calculé pour chacune des simulations, permettant finalement d'effectuer une évaluation probabiliste pour chaque mécanisme d'érosion interne.

La convergence des statistiques (moyenne et écart-type) du débit (débit total du barrage) est illustrée à la Figure 4. Elle montre que la moyenne et l'écart-type estimés du débit ne varient pratiquement pas à partir de 200 simulations environ. De manière sécuritaire, 500 réalisations ont été effectuées dans cette étude pour assurer une bonne convergence des résultats.

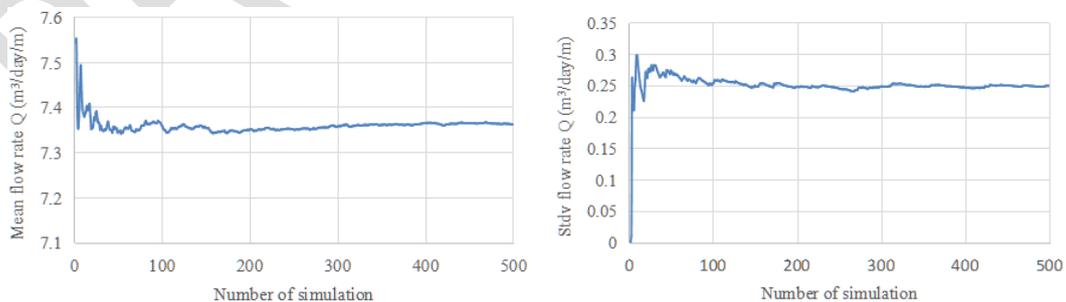


Figure 4 : Convergence de l'estimation de la moyenne et de l'écart-type du débit [Chi, 2024]

#### 4.2. Evaluation probabiliste de l'érosion interne

Avec la prise en compte de la variabilité spatiale des propriétés des matériaux et pour chaque simulation numérique, nous pouvons obtenir à chaque point du maillage une évaluation des différentes variables d'intérêt pour l'analyse de l'érosion interne (gradient hydraulique, vitesse

d'écoulement, ...). A l'issue des 500 simulations numériques considérées dans les simulations de Monte-Carlo, nous pouvons obtenir une distribution (moyenne et écart-type) pour chacune des variables d'intérêt et à chaque point du maillage. La Figure 5 présente la distribution des valeurs moyennes obtenues pour la vitesse d'écoulement et le gradient hydraulique. La Figure 6 montre la distribution des valeurs moyennes obtenues pour le gradient hydraulique critique vis-à-vis de l'érosion régressive et de la suffusion. La Figure 7 présente la distribution de la moyenne du Facteur de Sécurité pour l'érosion régressive et la suffusion. Les zones présentant les valeurs les plus faibles de moyenne du facteur de sécurité FS d'initiation de suffusion et d'érosion régressive se situent autour des pieds amont et aval du noyau (avec des valeurs comprises entre 1,282 et 1,58).

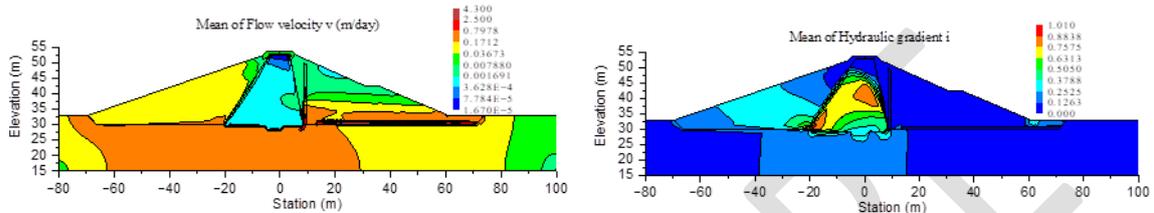


Figure 5 : Moyenne de la vitesse d'écoulement et du gradient hydraulique [Chi, 2024]

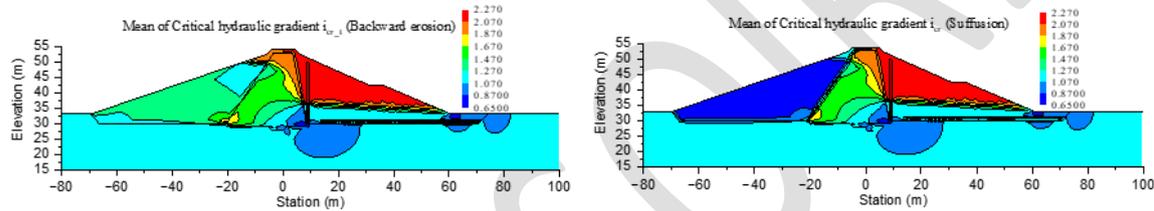


Figure 6 : Moyenne du gradient hydraulique critique (érosion régressive et suffusion) [Chi, 2024]

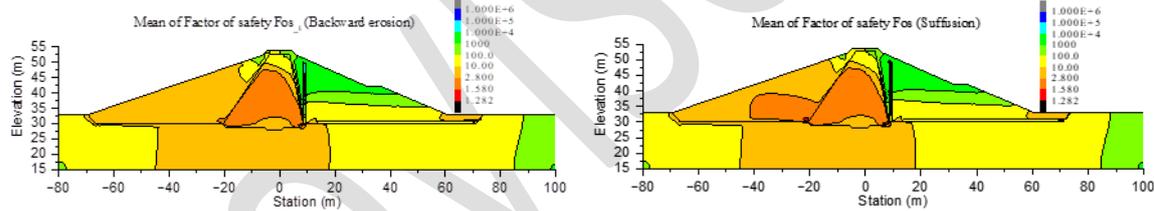


Figure 7 : Moyenne du facteur de sécurité FS (érosion régressive et suffusion) [Chi, 2024]

La probabilité d'initiation de l'érosion interne peut être calculée à chaque nœud du maillage à partir de la distribution du facteur de sécurité FS obtenue à l'issue des 500 simulations numériques. La distribution spatiale de la probabilité d'initiation de l'érosion régressive et la suffusion est présentée dans la Figure 8.

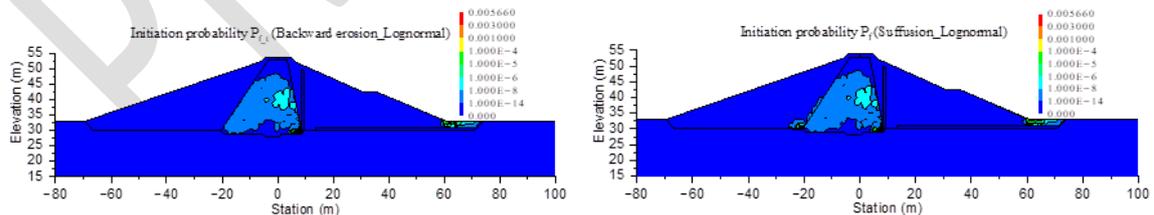


Figure 8 : Probabilité d'initiation d'érosion Pf (érosion régressive et suffusion) [Chi, 2024]

La zone présentant les valeurs les plus élevées de probabilité d'initiation d'érosion régressive se situe autour du pied aval du noyau (avec une valeur maximale de  $Pf=0,006$ , soit  $Pf=6 \times 10^{-3}$ ). Pour la suffusion, la zone autour du pied amont du noyau présente la valeur la plus élevée d'initiation de suffusion ( $Pf=0,005$ , soit  $Pf=5 \times 10^{-3}$ ).

Concernant l'érosion par contact, les limites supérieure et inférieure du drain horizontal ont été considérés dans cette étude. Pour chaque nœud sur les limites du drain horizontal, la vitesse d'écoulement, la vitesse d'écoulement critique, la moyenne du FS, l'écart type du FS et la probabilité

d'initiation  $P_f$  ont pu être calculés. La Figure 9 (gauche) illustre la fonction de densité de probabilité du FS pour le nœud situé sur la limite inférieure du drain horizontal avec le FS le plus bas, qui est relativement plus susceptible d'initier l'érosion par contact. La Figure 9 (droite) correspond au cas de la limite supérieure du drain horizontal.

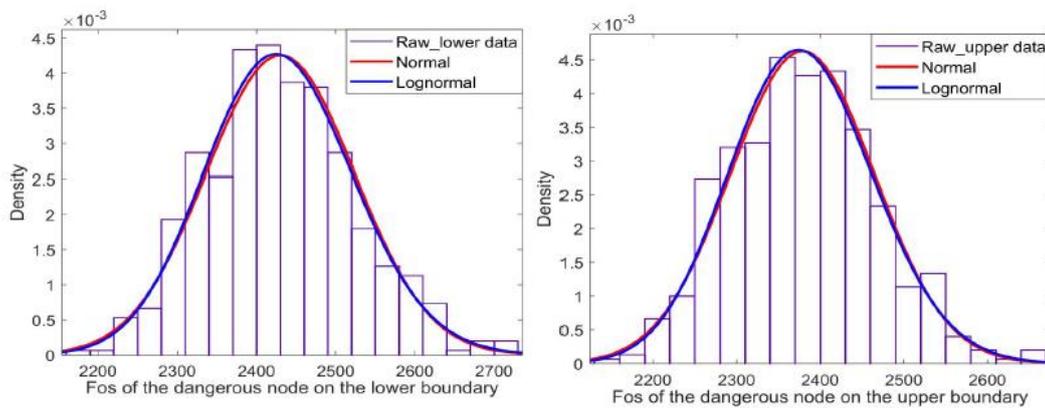


Figure 9 : Distribution du Facteur de sécurité à l'érosion de contact pour les deux nœuds les plus défavorables (limite inférieure et supérieure du drain) [Chi, 2024]

Les résultats des simulations numériques montrent que les vitesses d'écoulement restent très faibles (de l'ordre de  $3 \times 10^{-6}$  à  $5 \times 10^{-6}$  m/s pour les points les plus défavorables) par rapport à la vitesse critique d'initiation d'érosion (de l'ordre de 0,01 m/s). La vitesse critique est ainsi  $>2000$  fois plus élevée que la vitesse d'écoulement pour les points les plus défavorables. Les résultats de la Figure 9 montrent des facteurs de sécurité FS très élevés ( $>2000$ ) avec une distribution conduisant à une probabilité d'initiation d'érosion de contact pratiquement nulle ( $\sim 0$ ). Avec ces résultats, le risque d'initiation d'érosion de contact peut être écarté pour le cas d'étude considéré dans cet article.

Au final, l'approche présentée dans cet article permet de fournir des résultats concernant la distribution du facteur de sécurité et la probabilité de défaillance associée à différents mécanismes d'initiation de l'érosion interne. Les différents résultats de cette approche peuvent être utilisés dans le cadre d'une étude de dangers. En complément du facteur de sécurité évalué par la pratique actuelle pour le bilan de conception, cette approche permet d'afficher la distribution (ainsi que la marge d'incertitude) de ce facteur de sécurité.

Toutefois, le principal apport de cette approche est d'évaluer une probabilité de défaillance de différents mécanismes d'initiation d'érosion interne. Cette probabilité peut être utilisée dans l'analyse des risques d'une étude de dangers. En effet, dans le cadre des études de dangers de barrages en remblai, il est nécessaire d'analyser et quantifier les scénarios de défaillance conduisant à des événements redoutés comme une rupture par érosion interne. Ces scénarios sont généralement représentés par des diagrammes (type arbres de défaillances) comportant des enchaînements d'événements initiateurs ou modes de défaillance susceptibles de conduire à l'événement redouté. Dans ce cadre, l'approche présentée dans cet article permet d'évaluer la probabilité de défaillance de l'événement correspondant à l'initiation d'un mécanisme d'érosion interne.

Plutôt que d'estimer directement une probabilité d'érosion interne par simple jugement d'expert, cette approche présente deux principaux avantages : d'une part, elle mobilise l'expertise pour définir les variables d'entrée et construire le modèle numérique, et d'autre part, elle offre une évaluation quantitative de la probabilité de défaillance, calculée à l'aide d'une méthode de propagation des incertitudes dans le modèle numérique. Toutefois, son principal inconvénient pour une application opérationnelle réside dans son coût élevé en termes de temps d'ingénieur et de temps de calcul.

## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article a présenté une analyse probabiliste des trois mécanismes d'initiation d'érosion interne (érosion régressive, suffusion et érosion de contact) qui prend en compte la variabilité spatiale des propriétés hydrauliques des matériaux et qui a été appliquée sur le cas d'un barrage existant.

Cette étude s'appuie sur un modèle hydraulique aux éléments finis construit avec le code OptumG2. La variabilité spatiale des propriétés du remblai est représentée par des champs aléatoires basés sur une analyse géostatistique des données disponibles d'un barrage d'étude. Ces champs aléatoires sont ensuite intégrés dans le modèle numérique à l'aide de simulations de Monte-Carlo afin d'évaluer la variabilité spatiale des écoulements. Cette approche d'analyse probabiliste des infiltrations permet finalement d'effectuer une analyse de fiabilité pour évaluer la probabilité d'initiation des mécanismes d'érosion interne d'un barrage en remblai.

La méthode présentée dans cet article a été appliquée sur le cas d'un barrage existant. Nous pouvons présenter les conclusions suivantes :

- 1) La méthode permet de prendre en compte la variabilité spatiale des propriétés des matériaux. Elle peut également fournir une distribution spatiale ou cartographique (en chaque point du barrage et de sa fondation) de la distribution probabiliste (moyenne et écart-type) des résultats hydrauliques (vitesses d'écoulement, pressions interstitielles, gradients hydrauliques).
- 2) Sur la base des résultats des paramètres hydrauliques et des critères d'érosion interne disponibles dans la littérature, la méthode permet de fournir une cartographie de la distribution du facteur de sécurité et de la probabilité de défaillance de différents mécanismes d'initiation de l'érosion interne.
- 3) La méthode permet également d'identifier les zones les plus vulnérables avec les probabilités de défaillance les plus élevées dans le barrage, et elle pourrait être utilisée pour évaluer la probabilité des événements (initiation d'érosion) des arbres de défaillances habituellement utilisés dans les études d'analyse de risques de barrages.

Cette étude comporte également des points qui peuvent être améliorés dans les travaux futurs, tels que la prise en compte d'autres critères utilisés dans l'évaluation des différents mécanismes d'érosion interne, la prise en compte de la phase de filtration et la modélisation numérique des mécanismes d'érosion interne.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] CIGB, 2017. L'érosion interne dans les digues, barrages et leurs fondations. Bulletin 164, CIGB, 292p.
- [2] CIGB, 2019. Bulletin 188: ICOLD Incident database Bulletin 99 update Statistical analysis of dam failures. Bulletin 188 de la Commission Internationale Des Grands Barrages, CIGB, 65p.
- [3] Hekmatzadeh, A. A., Zarei, F., Johari, A., & Haghghi, A. T. 2018. Reliability analysis of stability against piping and sliding in diversion dams, considering four cutoff wall configurations. *Computers and Geotechnics*, 98, 217-231.
- [4] Liu, K., Vardon, P. J., & Hicks, M. A. 2018. Probabilistic analysis of seepage for internal stability of earth embankments. *Environmental Geotechnics*, 6(5), 294-306.

- [5] Robbins, B. A., Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. 2019. Influence of spatially variable soil permeability on backward erosion piping. In *7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR 2019) Taipei, Taiwan*.
- [6] Yang, J., Yin, Z. Y., Laouafa, F., & Hicher, P. Y. 2019. Analysis of suffusion in cohesionless soils with randomly distributed porosity and fines content. *Computers and Geotechnics*, 111, 157-171.
- [7] Kovacs, G. 1981. *Seepage hydraulics*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 730p
- [8] Li, M., & Fannin, R. J. 2008. Comparison of two criteria for internal stability of granular soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(9), 1303-1309.
- [9] Skempton, A. W., & Brogan, J. M. 1994. Experiments on piping in sandy gravels. *Geotechnique*, 44(3), 449-460.
- [10] Shire, T., O'Sullivan, C., Hanley, K. J., & Fannin, R. J. 2014. Fabric and effective stress distribution in internally unstable soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 140(12), 04014072.
- [11] Brauns, J. 1985, Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei horizontaler Durchströmung, *Wasserwirtschaft*, vol 75, p. 448-453
- [12] Adel, H. D., Koenders, M. A., & Bakker, K. J. 1994. The analysis of relaxed criteria for erosion-control filters. *Canadian geotechnical journal*, 31(6), 829-840.
- [13] Guidoux, C., Faure, Y. H., Beguin, R., & Ho, C. C. 2010. Contact erosion at the interface between granular coarse soil and various base soils under tangential flow condition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136, 741-750.
- [14] Chi, F. Probabilistic analysis of internal erosion in earth dams. Thèse de doctorat soutenue le 30 mai 2024 à l'université Clermont-Auvergne. 170p.
- [15] Mouyeaux, A., Carvajal, C., Bressolette, P., Peyras, L., Breul, P., & Bacconnet, C. (2019). Probabilistic analysis of pore water pressures of an earth dam using a random finite element approach based on field data. *Engineering Geology*, 259, 105190.
- [16] Terzaghi K., 1922, "Der Grundgruch an Stauwerken und seine Verhütung," (The failure of dams by piping and its prevention), *Die Wasserkraft* 17(24): 445-449 (in German). Reprinted in Terzaghi K (1960) *From Theory to Practice in Soil Mechanics*, NY, John Wiley and Sons, 1960, pp. 114-118.
- [17] Li M. 2008. Seepage induced instability in widely graded soils. University of British Columbia.
- [18] Chapuis, R. P., & Aubertin, M. 2003. On the use of the Kozeny Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 616-628.