



Montréal, Québec
May 29 to June 1, 2013 / 29 mai au 1 juin 2013

Considération de l'aspect aléatoire dans le calcul du débit de rupture et de sa durée d'atteinte : exemple d'une digue en remblai érodée par conduit traversant

Youssef Bentaiebi^A, Tew-fik Mahdi^A et Claude Marche^A

A : Département des génies Civil, Géologique et des Mines (CGM), École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada

Résumé: Le débit de rupture d'un barrage et sa durée d'atteinte sont deux paramètres principaux dans une étude de sécurité de barrage, ils découlent à partir d'une prévision du comportement du barrage durant sa rupture et de la forme finale de la brèche. Cette prévision est entachée de plusieurs sources d'incertitudes provenant autant des hypothèses de modélisation que du choix des paramètres qui interviennent dans les calculs. Dans cet article, l'utilisation d'une technique probabiliste sera exploitée pour l'évaluation des incertitudes pouvant être induites par la variabilité des paramètres lors du calcul du débit de rupture d'une digue érodée par conduit traversant. Des simulations par la méthode de Monte Carlo sont effectuées pour évaluer la propagation de ces incertitudes. Une telle évaluation est essentielle dans le domaine de gestion des risques pour prendre les décisions adéquates.

Abstract: The peak breach outflow and temporal parameters of the breach are often required in risk assessment studies. They ensue generally from a forecast of the behavior of the dam during its break and from the final shape of the breach. This forecast is generally soiled by several sources of uncertainties resulting as much from hypotheses of modeling as by the choice of the parameters which intervene in the calculation. In this work, the use of a probability technique will be exploited to predict uncertainties caused by the variability of some parameters during the calculation of the peak breach outflow of dike affected by piping flow erosion. Simulations by the method of Monte Carlo are made to estimate the distribution of these uncertainties. Such an evaluation is important in risk and safety analysis of dams.

1 Introduction

L'évaluation de la sécurité des barrages vieillissants et la conception des nouveaux ouvrages de retenue d'eau obtiennent une attention accrue de la part des intervenants. Les lois et les normes affichent depuis quelques années plus de sévérité en matière d'exigences, elles sollicitent d'une part les propriétaires des barrages de prévoir l'ampleur de la crue induite par une éventuelle rupture, et d'autre part les villes et les municipalités se trouvant en aval de se doter d'un plan d'urgence ajusté à cette rupture. D'un point de vue pratique, les deux principaux paramètres qui gouvernent toute prise de décision sont le débit de rupture (définition des zones potentiellement inondables) et son temps d'atteinte qui est la durée de formation de la brèche (procédures d'évacuation).

Pour expliciter ces paramètres, une étude de sécurité doit être menée, elle comporte essentiellement quatre étapes distinctes :

- Étude hydrologique visant à déterminer les débits de crues et leur temps de retour tout en intégrant les caractéristiques du bassin versant et du réservoir.

- Détermination du débit de rupture par l'estimation de sa valeur maximale. Ce paramètre est lié au temps de formation de la brèche et de sa forme finale.
- Simulation de la propagation de l'onde de rupture dans la vallée en aval.
- Détermination des zones inondables et estimation des pertes monétaires et des vies potentielles. La gravité des inondations et des autres impacts directs de telles ruptures dépend fortement du débit de rupture calculé à l'étape précédente.

L'ingénieur dispose pour accomplir une telle analyse de plusieurs outils théoriques et numériques qui décrivent le mieux le comportement physique des phénomènes. Toutefois, la modélisation de ces étapes est généralement basée sur des approches déterministes où l'aspect aléatoire et l'effet des incertitudes est négligé, ou bien pris en considération de manière simplifiée sous la forme d'un facteur de sécurité. Les sources d'incertitudes dans ces calculs proviennent d'une part des données de terrain (topographie, paramètres hydrauliques et géotechniques, etc.) et d'une autre part des hypothèses de modélisation (Seidou et al., 2003). Par exemple, et lors des comparaisons réalisées entre essais aux laboratoires et modélisation numérique, on constate que deux essais jugés a priori identiques et répétitifs peuvent conduire à des comportements observés qui diffèrent alors que leur simulation produirait une prévision unique (Marche et al., 2006). C'est pourquoi la forme finale de la brèche de rupture semble partiellement chaotique, autrement dit si de légères variations des données d'entrée donnent des résultats radicalement différentes (Seidou et al., 2003).

Les auteurs souhaitent mettre en évidence, à travers un exemple de rupture d'un barrage par conduit traversant, l'importance de la prise en compte de l'aspect aléatoire dans un exercice d'ingénieur désirant quantifier et qualifier le risque.

La première partie de cet article développera une brève présentation des techniques probabilistes pour l'évaluation des incertitudes, avec une description des deux paramètres considérés comme variables aléatoires dans cet article.

La deuxième partie exposera le modèle de calcul adopté pour l'estimation du débit de rupture et de son temps d'atteinte d'une digue érodée par conduit traversant.

La troisième partie présentera une étude de cas qui traite de ces aspects et discutera des résultats.

2 Techniques probabilistes pour l'évaluation des incertitudes

La valeur de chaque paramètre impliqué dans le design ou dans les études de réhabilitation d'un barrage est une valeur incertaine qui varie dans le temps et dans l'espace. Traditionnellement, les valeurs nominales de ces paramètres sont désignées dans les calculs (diamètre nominal d_{50} , vitesse moyenne, etc.), en conséquence l'ampleur de leur variabilité rend la performance du barrage une valeur aussi incertaine.

Pour compenser dans le sens sécuritaire les incertitudes associées à l'exercice de modélisation, la pratique courante consiste à majorer ou minorer les résultats dans le sens de recommander une solution sécuritaire (Fahsi, 2009), on constatera par exemple qu'il est recommandé en France d'ajouter 1 m aux niveaux maximaux et de retrancher 15 minutes aux temps d'arrivée d'ondes fournis par les modèles hydrauliques (ICOLD, 1998), ou encore à Hydro-Québec où les résultats des modélisations unidimensionnelles sont majorés en multipliant la profondeur d'eau par 1.15 (Joannette et al., 2001).

Une autre possibilité pour évaluer l'influence des incertitudes des paramètres sur les résultats consiste à une extension du modèle déterministe traditionnel en un modèle stochastique-probabiliste où la prise en compte des éléments aléatoires permet de déterminer un intervalle duquel on a une certaine probabilité de se situer et donc prendre en compte la probabilité d'apparition d'un résultat.

Ceci exige un changement d'approches du modèle déterministe classique à une approche probabiliste moderne avec un processus intégré qui permet la reconnaissance explicite et le traitement des incertitudes. Cette perspective n'est utilisée que peu en pratique, parce qu'elle implique des modèles de calcul compliqués et souvent accompagnés de grandes ressources en termes de temps.

Il existe plusieurs approches pour tenir en compte l'estimation des incertitudes : les méthodes approchées, les méthodes par développement stochastique, les méthodes par surface de réponse et l'approche à base de simulations dont la méthode de Monte Carlo qui sera utilisée dans ce travail.

2.1 Prise en compte de la variabilité de la cote de la retenue du barrage

La variation du niveau de la retenue provient essentiellement d'événements à caractère aléatoire (fonte de la neige, pluies, etc.) ou bien des actions de l'exploitant si l'ouvrage est destiné à l'irrigation par exemple (prélèvement d'eau, etc.). Les événements causant la rupture (crue, érosion etc.) sont alors susceptibles de se produire lorsque la retenue n'est que partiellement remplie offrant ainsi un amortissement favorable, à contrario, ces événements peuvent se produire quand la cote de remplissage est à son niveau maximum. Par conséquent, la considération dans une étude de sécurité une unique cote ne rend pas compte des marnages importants.

L'analyse statistique directe des chroniques de remplissage de la retenue d'un barrage peut être une alternative, mais elle est peu pertinente car la population des cotes de remplissage au-dessus de la cote normale d'exploitation est souvent petite. Une des méthode efficace est d'adopter une loi de probabilité pour l'hydrogramme de crue et pour la distribution des cotes de remplissage, le tirage aléatoire par simulations de Monte Carlo d'un couple de ces deux paramètres en tenant compte des caractéristiques hydrauliques du dispositif d'évacuation des crues, permet de construire la fonction de répartition empirique des cotes maximales en crue et d'associer à chaque cote de la retenue une probabilité de dépassement (Peyras et al., 2009).

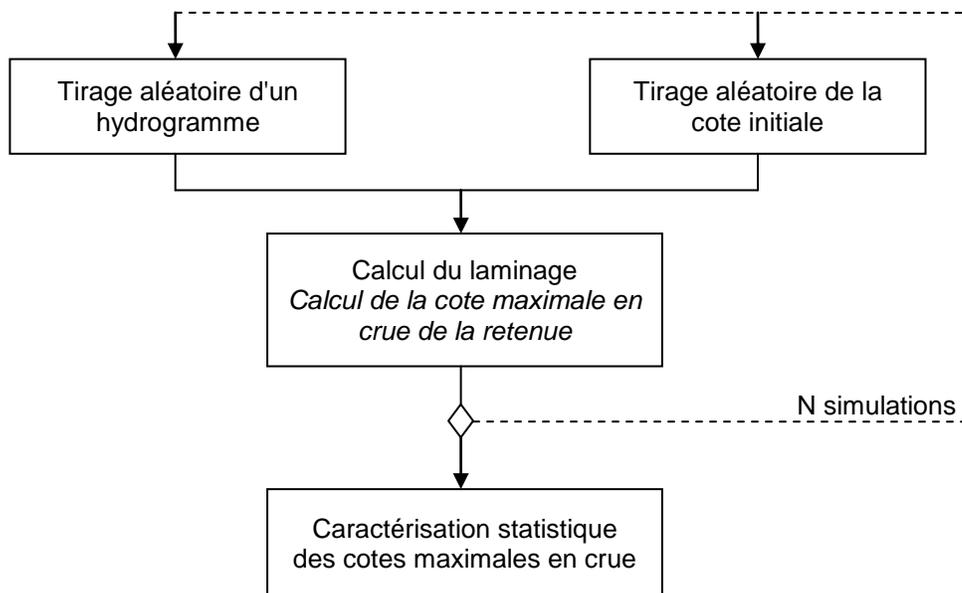


Figure 1 Démarche de simulation des cotes maximum en crue de retenue (Peyras et al., 2009)

Le tirage aléatoire d'hydrogrammes de rupture peut se faire par deux méthodes. La première nécessite la construction d'une base de données d'événements qui a pour point d'entrée plusieurs hydrogrammes de crue préalablement définis par les études hydrologiques classiques, chacun d'eux à une période de retour (10 ans, 100 ans, 1000 ans et 10 000 ans), ensuite on partitionne l'espace de Gumbel en plusieurs intervalles de probabilité auxquels sont associés ces hydrogrammes. Les limites des intervalles sont définies comme les mi-distances entre les périodes de retour dans l'espace de Gumbel, ensuite les probabilités associées à chaque intervalle sont obtenues en calculant les différences des probabilités de non-dépassement des limites des intervalles. La deuxième méthode se base sur l'hypothèse que l'hydrogramme de projet à un paramètre (le débit moyen Q_m) qui suit une loi de Gumbel, et que la forme de l'hydrogramme est conservée d'une fréquence à une autre ($Q_{ti}/Q_m = \text{cste}$), ce qui permet de construire l'hydrogramme de chaque débit moyen tirée aléatoirement. Cette méthode présente l'avantage de générer de multiples hydrogrammes de crue associés à une fréquence unique et ne nécessite pas de connaître plusieurs hydrogrammes de crue.

2.2 Prise en compte de la variabilité des paramètres du sol

Le sol est un matériau hétérogène et ses propriétés sont variables d'un point à un autre. Ainsi, les réponses d'un modèle utilisant ces propriétés comporteront des incertitudes qui sont complexes à quantifier et résultent de plusieurs sources (Baziz, 2011). La variabilité spatiale inhérente du sol provient des phénomènes sédimentologiques et géologiques qui modifient continuellement les couches du sol, les erreurs de mesure, y compris ceux provoqués par l'appareillage, les procédures opératoires et les effets des essais effectués hors norme, constituent la deuxième source d'erreur (Figure 2).

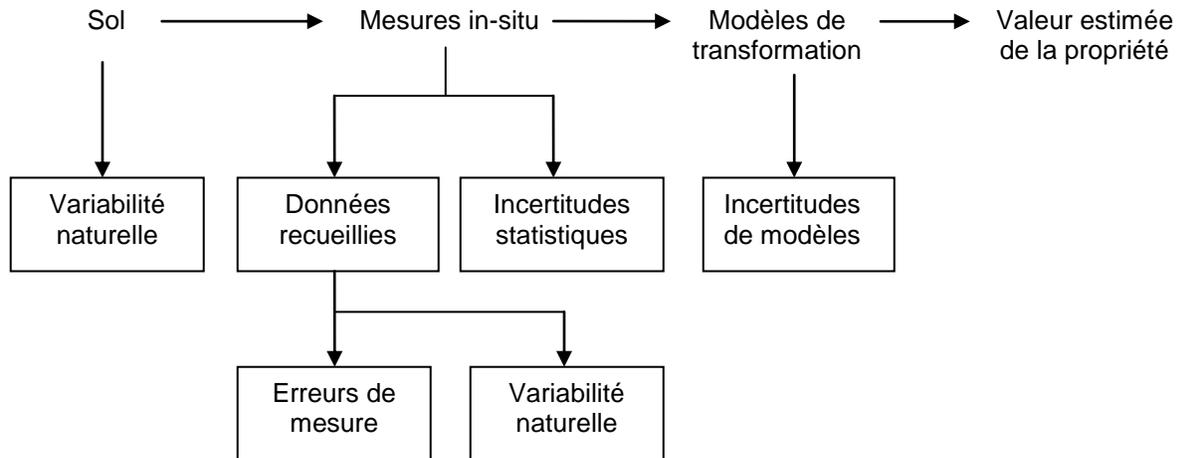


Figure 2 Types des incertitudes des propriétés du sol (Kulhawy, 1992)

3 Rupture d'une digue en remblai érodée par conduit traversant

Il est reconnu que les ouvrages en remblai présentent un risque de rupture plus élevés que les ouvrages en béton à cause des problèmes liés aux fondations et aux phénomènes de l'érosion. Il existe deux types d'érosion rencontrés sur les digues, la surverse et l'érosion interne. L'érosion par surverse a fait beaucoup de progrès en terme de modélisation, le couplage entre les connaissances hydrauliques et géotechniques a permis d'aboutir à des modèles physiques qui décrivent la formation de la brèche. Quant à l'érosion interne, l'érosion de conduit représente le mécanisme ultime, c'est celui qui provoque la destruction rapide. Ce mode de rupture est peu étudié et n'a pas encore été parfaitement modélisé (Bonelli et al., 2008). Il est à noter que l'érosion de conduit traversant (Piping Flow Erosion) est différente de l'érosion régressive introduite par Tersaghi 1927 qui est aussi appelée renard (Hydraulic Piping).

Les travaux de Bonelli et Brivois (2008) et Bonelli et al., (2008) ont conduit à une modélisation de ce type de rupture en se basant sur des essais HET (*Hole Erosion Test*) au laboratoire. Les relations mécaniques tirées de leurs travaux (et utilisées dans ce travail) relient le rayon du conduit et le débit de pointe, à des paramètres propres de l'ouvrage contrairement aux approches habituellement proposées dans la littérature, où la capacité du réservoir et la hauteur d'eau derrière le barrage gouvernent la détermination du débit de brèche.

Trois phases pour la rupture sont considérées :

- Une phase d'initiation où la création d'un canal traversant (qui peut être causé par une érosion régressive).
- Une phase d'agrandissement du rayon par érosion de conduit, qui se termine par l'effondrement du toit du conduit et la création d'une brèche.
- Une phase d'élargissement de la brèche et de propagation à l'aval de l'onde de submersion qui provoque l'inondation.

Le rayon minimum pour déclencher la rupture est donné par l'équation 1, où τ_c est la contrainte critique du sol (Pa), L est la longueur du conduit (m), ΔH_w est la différence de niveau d'eau entre amont et aval. L'ordre de grandeur de R_{\min} est très sensible à la contrainte critique τ_c , il est de 1 mm si $\tau_c = 1$ Pa et peut atteindre la borne de 30 cm si $\tau_c = 300$ Pa.

$$[1] \quad R_{\min} = \frac{2L\tau_c}{\rho_w g \Delta H_w}$$

La durée Δt_u qui présente l'intervalle de temps entre détection et rupture est donnée par l'équation 2 où R_u (m) est le rayon maximum du conduit avant effondrement et R_d (m) est le rayon du conduit au moment de la détection. La valeur de $R_u - R_{\min}$ est très sensible à la contrainte critique τ_c , il est de 1 mm si $\tau_c = 1$ Pa et peut atteindre la borne de 30 cm si $\tau_c = 300$ Pa.

$$[2] \quad \Delta t_u = t_{er} \ln \left[\frac{R_u - R_{\min}}{R_d - R_{\min}} \right]$$

Dans l'équation 2 intervient également le temps caractéristique t_{er} donnée par l'équation 3, et qui fait intervenir le coefficient de cinétique d'érosion K_{er} , ce paramètre qui pilote la vitesse de destruction par érosion et par conséquent influence le temps de rupture.

$$[3] \quad t_{er} = \frac{2\rho_{sol}L}{\rho_w g \Delta H_w K_{er}}$$

Le débit de brèche peut être calculé à partir de l'équation 4 où f_b est le coefficient de frottement qui est estimé à 0.005 pour un écoulement turbulent dans un conduit rugueux. H_{dam} est la hauteur de l'ouvrage en mètre.

$$[4] \quad Q_{brèche} = \pi R_u^{5/2} \sqrt{\frac{gH_{dam}}{2f_b L}} \sqrt{\frac{\Delta H_w - R_u}{H_{dam} - R_u}}$$

Il est aussi possible de connaître l'évolution du débit d'écoulement et du rayon du conduit à tout moment t entre la détection du conduit et l'effondrement à partir des équations 5, 6 et 7. L'indice "0" indique la valeur à l'instant t_0 .

$$[5] \quad Q_{(t)} = Q_0 \left(\frac{R(t)}{R_0} \right)^{5/2}$$

$$[6] \quad \begin{cases} R(t) = 1 \text{ si } \tau_c > P_0 \\ R(t) = R_0 \frac{\tau_c}{P_0} + R_0 \left(1 - \frac{\tau_c}{P_0} \right) \exp \left(\frac{t - t_0}{t_{er}} \right) \text{ si } \tau_c < P_0 \end{cases}$$

$$[7] \quad P_0 = \frac{\rho_w g \Delta H_w R_0}{2L}$$

4 Étude de cas

Le modèle décrit en haut a donc été mis en application pour simuler le calcul du débit de brèche en tenant compte de la variabilité de la cote de retenue et du diamètre nominal du sol d_{50} . Les données les plus importantes de cette simulation sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Géométrie et propriétés des matériaux de la digue

Géométrie	Hauteur de la digue	9.0 m
	Largeur en pied	22.0 m
	Pente des parements	1V : 2H
	Hauteur d'eau en amont	7.5 m
Composition	Sable	$d_{50}=3$ mm

Le diamètre des particules suit une loi de probabilité normale de moyenne 3 mm et d'écart-type 1 mm et la cote de remplissage dans le barrage suit une loi normal de moyenne 7.5 m et d'écart type 0.4 m.

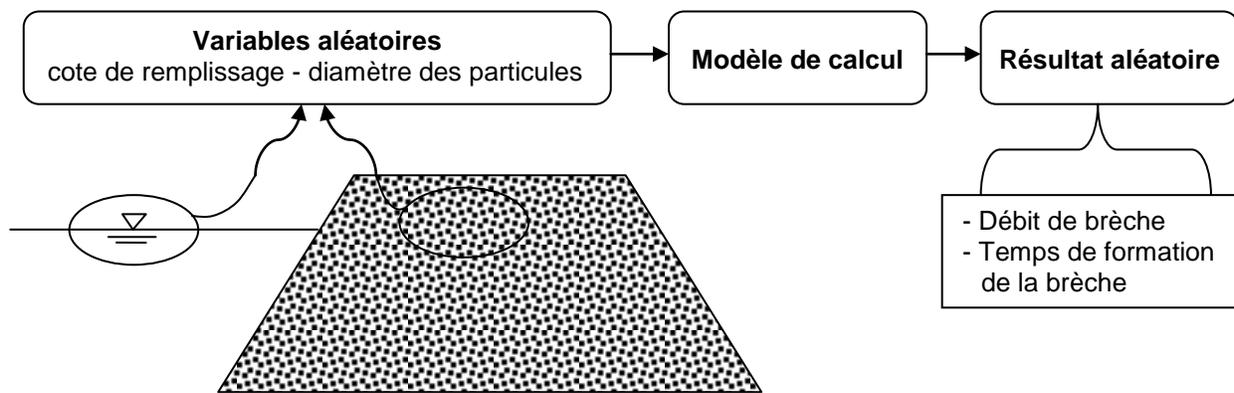


Figure 3 Schéma général de calcul par un modèle de type probabiliste

Dans ce modèle de calcul (figure 3), la contrainte critique τ_c est calculée à partir du critère de Shields-Yalin (Equation 8), où γ est le poids volumique de l'eau (9801 N/m^3) et γ_s est le poids volumique des grains (19602 N/m^3) qui ont une densité relative de 2.

$$[8] \quad \tau_c = \tau_{*c} (\gamma_s - \gamma) d_{50}$$

Il existe plusieurs formule empirique de la contrainte de cisaillement critique adimensionnelle du digramme de Shields-Yalin en fonction du diamètre adimensionnel, l'équation de Guo (Equation 9) sera utilisée dans les calculs.

$$[9] \quad \tau_{*c} = \frac{0.23}{d_*} + 0.054 \left[1 - \exp\left(-\frac{d_*^{0.85}}{23}\right) \right]$$

Avec d_* le diamètre adimensionnel du grains donnée par l'équation 10.

$$[10] \quad d_* = d_{50} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3}$$

Où ρ est la masse volumique de l'eau, ρ_s est la masse volumique des grains et ν est la viscosité cinématique de l'eau.

4.1 Tirage aléatoires des variables

La taille des échantillons est déterminée de telle sorte que l'on ait, avec un niveau de confiance de 95 % une incertitude de 5 % sur le rapport de l'écart type de l'échantillon $s(X_k)$ sur l'écart type de la population $\sigma(X_k)$.

$$[11] \quad 0.95 \leq \frac{s(X_k)}{\sigma(X_k)} \leq 1.05 \Leftrightarrow 0.90 \leq \frac{s(X_k)^2}{\sigma(X_k)^2} \leq 1.10$$

Dans ces conditions, pour que le rapport des variances soit compris dans l'intervalle d'amplitude $\Delta = (1.1 - 0.9) = 0.2$, il faut, pour un niveau de confiance 0.95, déterminer par itérations successives la taille de l'échantillon N telle que, avec le nombre de degrés de liberté $\nu = N - 1$, on ait des valeurs de la variable Khi-deux, notée, qui vérifient la relation exprimée par l'équation 12 (Krajewski et al., 1997).

$$[12] \quad \frac{\chi_{1-\alpha/2}^2(\nu)}{\nu} - \frac{\chi_{\alpha/2}^2(\nu)}{\nu} = \Delta$$

Ce qui peut également s'écrire :

$$[13] \quad N = 1 + \frac{\chi_{1-\alpha/2}^2(N-1) - \chi_{\alpha/2}^2(N-1)}{\Delta}$$

Par itérations successives sur les valeurs de χ^2 , on trouve $N=769$. La valeur de N arrondie légèrement est adoptée : $N=800$. Ensuite deux échantillons artificiels pour les variables $H(m)$ et d_{50} sont construits. Il faut noter ici que les valeurs des échantillons artificiels ont été limitées aux valeurs comprises dans les intervalles $[x_k - 3s(X_k) ; x_k + 3s(X_k)]$ pour éviter la valeurs aberrantes, cette largeur correspond à 99.8 % des valeurs possibles. Ces deux distributions sont représentées à la figure 4 et la figure 5. La figure 6 illustre l'absence de corrélation entre les échantillons.

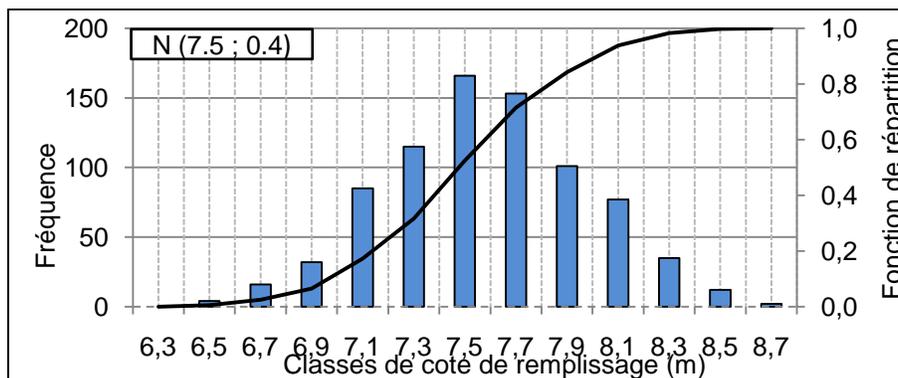


Figure 4 : échantillon artificiel pour la cote de remplissage suivant une loi normale (7.5 ; 4)

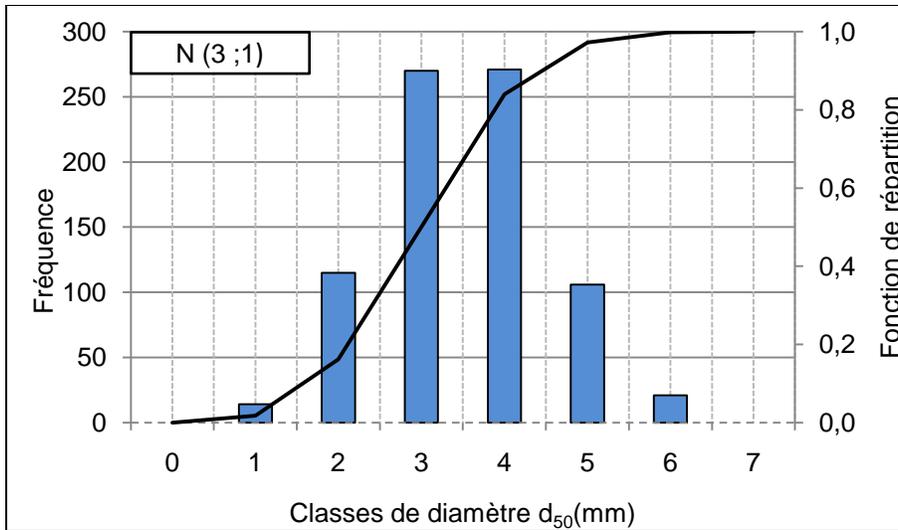


Figure 5 : échantillon artificiel pour le diamètre d_{50} suivant une loi normale (3 ;1)

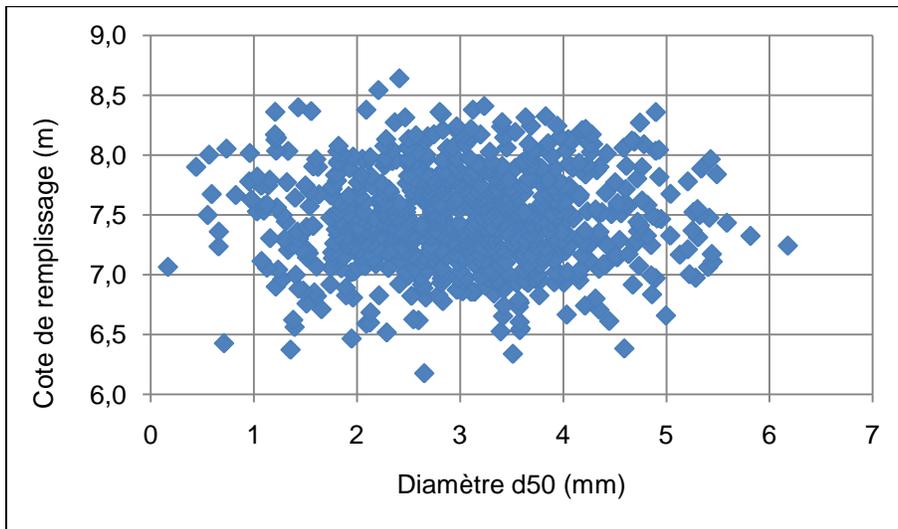


Figure 6 : Corrélation entre les échantillons artificiels d_{50} et ΔH_w

Les résultats des calculs avec les valeurs nominales (7.5 m ; 3 mm) révèlent un débit de rupture égale à 2207 m³/s en un temps de 41 minutes. Les figures 6 et 7 illustrent les résultats des 800 simulations, la probabilité que le débit de brèche puisse dépasser la valeur de 2400 m³/s est approximativement 2/10. Cette variation est due surtout à la cote de remplissage initiale. Dans le but de ne pas sous-estimer le débit de rupture et ainsi les zones inondables par une éventuelle rupture, l'intégration de l'aspect probabiliste de la cote de remplissage du réservoir est un atout.

Le temps de rupture est sensible à l'indice d'érosion moyen du sol I_{er} ($I_{er} = -\log(k_{er})$), qui a une valeur ici de 2.7, se trouvant de ce fait dans la catégorie des sols modérément érodables à très érodables ($I_{er}=3$). L'utilisation d'autres éléments inhérents à la nature des matériaux, à leur mise en œuvre et au vieillissement de l'ouvrage lui-même devrait être intégrée durant les actions de diagnostic et les procédures de calcul.

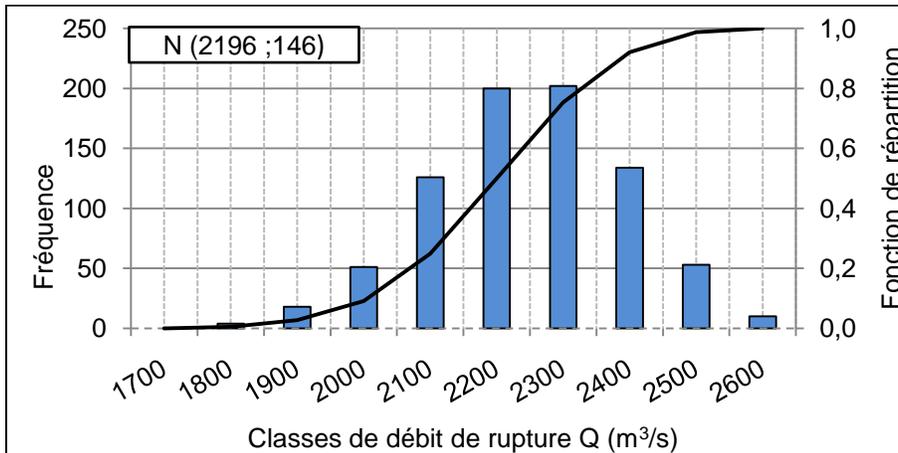


Figure 7 : Corrélation entre les échantillons artificiels d_{50} et ΔH_w

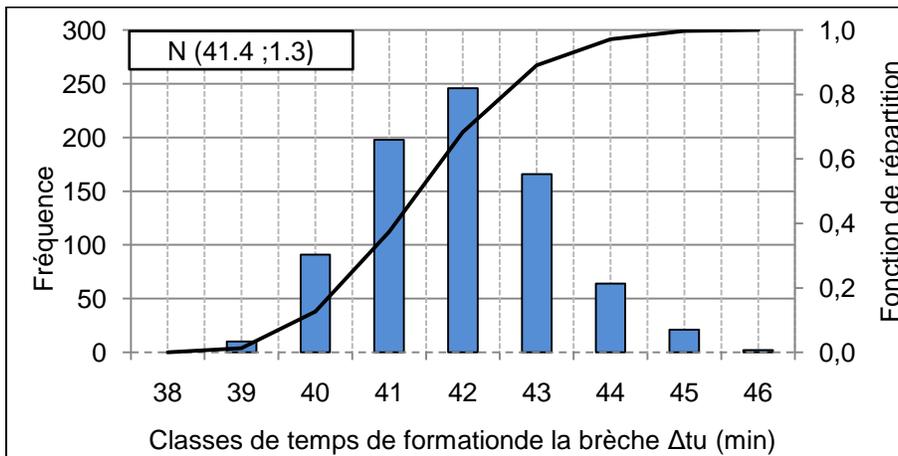


Figure 8 : Corrélation entre les échantillons artificiels d_{50} et ΔH_w

5 Conclusion

Cet article présente les premiers résultats d'un projet de recherche dans le cadre d'une thèse ayant comme application industrielle le domaine des barrages. L'article démontre à travers un cas d'étude simple que l'approche probabiliste qui tient en considération l'aspect aléatoire des paramètres est une alternative pour compenser les limitations de l'approche déterministe.

De tels résultats seront utilisés lors des études d'analyse de risque de rupture des barrages. Les voies de recherche se focalisent sur la caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des paramètres décrivant les propriétés du sol et les caractéristiques de l'écoulement.

6 Références

- Baziz, K. (2011). "Effet de la variabilité des paramètres de calcul sur la stabilité des murs de soutènement." Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Algérie. .
- Bonelli, S., N. Benhamed, et al. (2008). "Evaluer le temps de rupture d'une digue en remblai érodée par conduit traversant." Ingénieries, n° Spécial.
- Bonelli, S. and O. Brivois (2008). "The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop." International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 32: 1573-1595.
- Fahsi, A. (2009). "Application des techniques de fiabilité pour l'estimation des incertitudes des résultats de simulations numériques en hydrodynamique des rivières." Mémoire de maitrise, École de Technologie Supérieure, Montréal.
- Guo, J. (1999). "Hunter Rouse and Shields diagram." In Advances in hydraulics and water engineering, PROC. 13TH IAHR-APD CONGRESS VOL. 2(World scientific, Singapore).
- ICOLD (1998). "Étude d'onde de rupture de barrage. Synthèse et recommandations." En ligne. Bulletin n° 111.
- ICOLD (2007). "Assessment of the risk on Internal Erosion of Water Retaining Structures : Dams, Dykes and Levees." Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD, TUM Edt.
- Krajewski, W. F., A. Kruger, et al. (1998). "Experimental and numerical studies of small-scale rainfall measurements and variability." Water Science and Technology 37(11): 131-138.
- Kulhawy, F. H. (1992). "On the evaluation of soil properties." ASCE Geotech. Spec 31: 95-115.
- Marche, C., T. Mahdi, et al. (2006). "ERODE : Une méthode fiable pour établir l'hydrogramme de rupture potentielle par surverse de chaque digue en terre." 22ème Congrès de la commission internationale des grands barrages.
- Peyras, L., P. Arnaud, et al. (2009). "Modélisation probabiliste de la cote de remplissage d'un barrage." Colloque CFBR-SHF: «Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues» 20-21 janvier 2009, Lyon.
- Seidou, O., C. Marche, et al. (2004). "Aspects aléatoires de l'érosion d'une digue: simulations de la brèche par des algorithmes génétiques." Canadian Journal of Civil Engineering 31(6): 927-942.