

# APPLICATION DES METHODES D'ANALYSE DE FIABILITE POUR L'EVALUATION DE LA SURETE DES BARRAGES EXISTANTS

## *Application of reliability analysis methods for safety assessment of existing dams*

**Claudio CARVAJAL, Laurent PEYRAS, Anthony MOUYEAUX**

IRSTEA, UMR RECOVER, 3275 Route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France  
[claudio.carvajal@irstea.fr](mailto:claudio.carvajal@irstea.fr) ; [laurent.peyras@irstea.fr](mailto:laurent.peyras@irstea.fr) ; [anthony.mouyeaux@irstea.fr](mailto:anthony.mouyeaux@irstea.fr)

**Pierre BREUL**

Univ. Clermont Auvergne, Institut Pascal, CNRS, F-63000 Clermont-Ferrand, France  
[pierre.breul@uca.fr](mailto:pierre.breul@uca.fr)

**Xiangfeng GUO**

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, F-38000 Grenoble, France  
[xiangfeng.guo@3sr-grenoble.fr](mailto:xiangfeng.guo@3sr-grenoble.fr)

**Daniel DIAS**

Antea Group, Antony, France  
[daniel.dias@anteagroup.com](mailto:daniel.dias@anteagroup.com)

### MOTS CLEFS

Analyse de fiabilité, méthodes probabilistes, variabilité spatiale, Monte-Carlo, modélisation numérique

### KEY WORDS

Reliability analysis, probabilistic approach, spatial variability, Monte-Carlo, numerical modelling

### RÉSUMÉ

*L'évaluation d'une probabilité de défaillance vis-à-vis d'un mécanisme de rupture d'un barrage constitue une difficulté majeure dans la réalisation des études d'analyse de risque de ces ouvrages. Dans la quasi-totalité des études de dangers, l'évaluation d'une telle probabilité de défaillance est effectuée par des méthodes d'analyse des risques basées essentiellement sur le jugement expert. Dans ce cadre, les méthodes d'analyse de fiabilité des structures constituent une démarche intéressante pour l'évaluation probabiliste de la sûreté des barrages. Ces méthodes consistent à modéliser les incertitudes sur les chargements et les propriétés des matériaux d'un ouvrage par des variables aléatoires, lesquelles sont intégrées dans les calculs de stabilité permettant d'évaluer ensuite une probabilité de défaillance vis-à-vis du mécanisme de rupture analysé.*

*Cette communication présente des applications des méthodes d'analyse de fiabilité sur des cas de barrages existants, en valorisant les données disponibles sur ces ouvrages. Elle synthétise des travaux de recherche et développement à IRSTEA sur ce domaine depuis une dizaine d'années. Après une description des principes d'une analyse de fiabilité, cette communication présente trois exemples d'application de ces méthodes à des barrages existants : la modélisation probabiliste de l'état-limite de glissement avec ouverture de fissure d'un barrage-poids ; la modélisation probabiliste de fondations rocheuses d'un barrage-poids avec un modèle numérique comportant des familles de discontinuités ; et la modélisation probabiliste du mécanisme de glissement d'un barrage en remblai tenant compte de la variabilité spatiale des matériaux.*

### ABSTRACT

*Assessing the probability of dam failure is a major difficulty in conducting a dam risk analysis study. In almost all hazard studies, the assessment of such a probability of failure is carried out by risk analysis methods based mainly on expert judgement. In this context, structural reliability analysis methods are an interesting approach for the probabilistic assessment of dam safety. These methods consist of modelling uncertainties on loads and material properties by random variables, which are integrated into the stability calculations to then assess a failure probability with respect to the failure mechanism of the analyzed dam.*

*This paper presents applications of reliability analysis methods on cases of existing dams, highlighting the data available on these structures. This article summarizes IRSTEA's research and development work in this field over the past ten years. After a description of the principles of reliability analysis and associated methods, this paper presents three examples of how these methods can be applied to existing dams: probabilistic modelling of the sliding/shear limit-state with crack opening of a gravity dam; probabilistic modelling of rock foundations of a gravity dam with a numerical model including sets of discontinuities; and probabilistic modelling of the slope stability of an embankment dam taking into account the spatial variability of the soils properties.*

## 1. INTRODUCTION

L'évaluation de la sûreté des barrages est un enjeu majeur vis-à-vis des risques que ces ouvrages représentent pour les populations et les enjeux aval. Une des difficultés majeures des études d'analyse de risques de barrages (notamment dans le cadre des études de dangers en France) réside dans l'évaluation d'une probabilité de défaillance associée à une rupture du barrage.

Dans ce cadre, les méthodes d'analyse de fiabilité des structures constituent une démarche intéressante pour l'évaluation probabiliste de la sûreté des barrages, alternative et/ou complémentaire aux démarches semi-quantitatives basées en grande partie sur le jugement expert. Ces méthodes consistent à modéliser les incertitudes sur les chargements et les propriétés des matériaux d'un ouvrage par des variables aléatoires, lesquelles sont intégrées dans les calculs de stabilité permettant d'évaluer ensuite une probabilité de défaillance ou de dépassement de l'état-limite analysé [1].

L'utilisation des méthodes d'analyse de fiabilité dans le domaine des barrages a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, comme on peut le constater par exemple dans une revue bibliographique [2] d'application de méthodes probabilistes pour l'évaluation de la sûreté de barrages en béton. Dans un cadre plus opérationnel, les méthodes fiabilistes ont fait l'objet : de trois thèmes des benchmarks proposés par la CIGB [3, 4, 5], de guides ou documents techniques [6, 7], ainsi que d'applications dans des études d'analyse de risques [8, 9].

L'objectif de cette communication est de présenter des applications des méthodes d'analyse de fiabilité sur des cas de barrages existants, en valorisant les données disponibles sur ces ouvrages. Elle synthétise une dizaine d'années de travaux de recherche et développement à IRSTEA sur ce domaine, comprenant 5 thèses dont deux en cours. Cet article constitue ainsi une synthèse de ces travaux, en donnant un aperçu des questions traitées et des résultats obtenus par ces méthodes fiabilistes dans des cas de barrages existants (mais sans rentrer dans des détails méthodologiques déjà publiés par ailleurs). Le corps de l'article comporte une description des principes d'une analyse de fiabilité suivie de trois exemples d'application de ces méthodes à des barrages existants : la modélisation probabiliste de l'état-limite de glissement avec ouverture de fissure d'un barrage-poids ; la modélisation probabiliste des fondations rocheuses d'un barrage-poids avec un modèle numérique comportant des familles de discontinuités ; et la modélisation probabiliste du mécanisme de glissement d'un barrage en remblai en tenant compte de la variabilité spatiale des matériaux.

## 2. PRINCIPE D'UNE ANALYSE DE FIABILITE

La sûreté des ouvrages de génie civil se situe dans un contexte incertain. En effet, il n'est pas possible de connaître ou prédire avec certitude la valeur des paramètres de calcul entrant dans les méthodes de vérification des ouvrages. Ces paramètres peuvent correspondre à des paramètres géométriques, de résistance ou de sollicitation. Les méthodes d'analyse de fiabilité permettent de prendre en compte dans un contexte probabiliste les incertitudes associées aux données de calcul utilisées dans les justifications de la stabilité structurale des ouvrages. Les méthodes fiabilistes apportent ainsi une information supplémentaire par rapport à une approche déterministe classique [1, 10].

Les méthodes fiabilistes sont constituées classiquement des phases d'analyse suivantes (Figure 1) :

Étape A : Choix du modèle représentatif du système ou de l'ouvrage. Cette étape est analogue à une analyse déterministe classique. Elle consiste à sélectionner et modéliser le ou les états-limites dont on veut évaluer la probabilité de dépassement. Cette modélisation peut être réalisée par des méthodes de stabilité à l'équilibre limite ou par des méthodes numériques aux éléments finis ou différences finies. Une fonction de performance doit être choisie pour définir le critère de défaillance en fonction de la variable de sortie du modèle (par exemple : supposer la défaillance si le facteur de sécurité est inférieur à 1).

Étape B : Quantification des sources d'incertitudes. Cette étape consiste à identifier les variables d'entrée du modèle de l'étape A considérées comme incertaines et leur attacher un modèle probabiliste. Il s'agit d'analyser et caractériser, par des lois de probabilité, les variables aléatoires intervenant dans chacun de ces états-limites (classiquement : les variables de sollicitation et de résistance). Par exemple, pour l'état-limite de résistance à l'effort tranchant d'un barrage-poids, on peut considérer comme incertain et modéliser comme variable aléatoire : le niveau de la retenue en période de crue, le coefficient d'efficacité du dispositif de drainage, le poids volumique et les paramètres de résistance au cisaillement des matériaux.

Étape C : Propagation des incertitudes. Cette étape vise à évaluer l'aléa de la réponse (ou paramètres de sortie) du modèle vis-à-vis du critère de défaillance considéré. Elle consiste à prendre les variables aléatoires déterminées dans l'étape B (variables d'entrée) et les introduire dans le modèle d'évaluation d'état-limite de l'étape A de manière à obtenir une distribution probabiliste de la variable de sortie du modèle d'état-limite (par exemple : une distribution de probabilité du facteur de sécurité). Les méthodes généralement utilisées pour cette étape se basent sur des méthodes de simulations de Monte-Carlo ou sur des méthodes d'approximation de la surface d'état-limite, telles que FORM, SORM, ... [1]. La distribution de la variable de sortie du modèle d'état-limite permet ensuite d'évaluer la probabilité de dépassement de l'état-limite analysé (correspondant par exemple à la probabilité que le facteur de sécurité soit inférieur à 1). Cette étape de propagation des incertitudes peut faire l'objet éventuellement d'études de sensibilité, afin d'identifier par exemple quelles sont les variables aléatoires qui ont le plus de poids dans l'évaluation de la probabilité de défaillance.

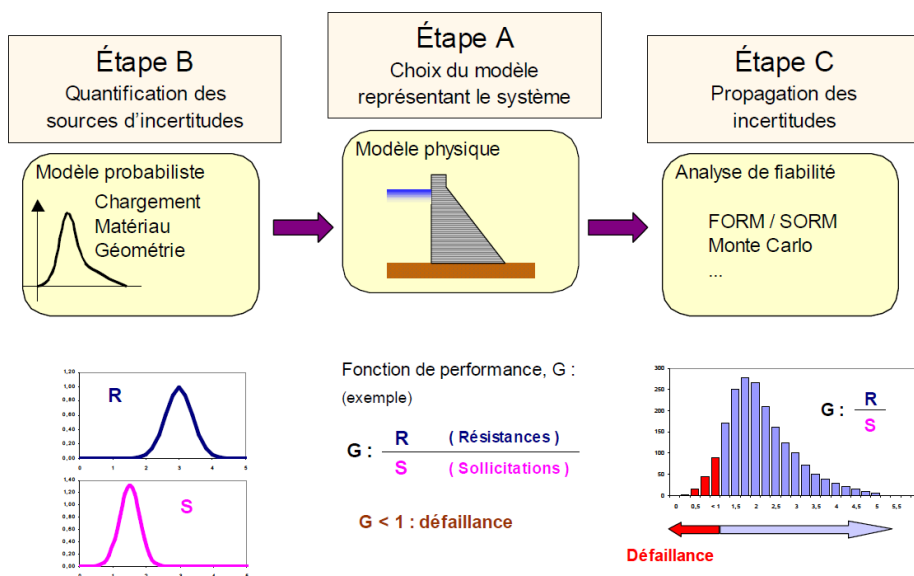


Figure 1 : Démarche générale d'une analyse de fiabilité

Il est enfin pertinent de rappeler que tous les modèles de calcul existants pour décrire le fonctionnement mécanique d'une structure sont fondés sur une idéalisation de celle-ci. Ainsi, lorsque l'on parle de l'étude de sûreté d'une structure, on parle en réalité de la sûreté du modèle idéalisé associé à cette structure.

### 3. APPLICATION SUR UN BARRAGE-POIDS

Ce cas d'application présente la mise en œuvre de méthodes d'analyse de fiabilité pour évaluer la probabilité d'occurrence du mécanisme de glissement d'un barrage-poids. Le lecteur pourra se référer aux articles [11] et [12] présentant plus de détails sur la démarche utilisée.

Les variables d'entrée (les propriétés des matériaux ainsi que les actions variables de l'eau) sont modélisées comme des variables aléatoires définies par une distribution de probabilité, pour tenir compte de la variabilité et des incertitudes associées aux variables d'entrée.

Le barrage étudié correspond à un barrage-poids en Béton Compacté au Rouleau (BCR) situé dans la zone centrale de la France. Il possède une hauteur maximale de 46 m, un parement aval de fruit 0,73 (H/V) et une épaisseur en crête de 4 m.

#### 3.1. Etat-limite et variables aléatoires d'entrée

L'état-limite analysé correspond au mécanisme de glissement ou de dépassement de l'effort tranchant dans une section du corps du barrage, sur une couche de BCR située au niveau du terrain naturel.

Le Tableau 1 présente les distributions de probabilité adoptées pour les variables d'entrée modélisées comme des variables aléatoires.

Tableau 1 : Distribution de probabilité marginale des variables aléatoires d'entrée [9]

Variable aléatoire	Distribution de probabilité	Moyenne	Ecart-type
Poids volumique, $\gamma_{bcr}$	Normale	23,2 kN/m <sup>3</sup>	0,02 kN/m <sup>3</sup>
R. Compression, $f_c$	Normale	15,5 MPa	1,6 MPa
R. Traction, $f_t$	Log-normale	0,83 MPa	0,8 MPa
Cohésion, $C$	Normale, tronquée à 0	1,7 MPa	0,23 MPa
Frottement, $\tan(\varphi)$	Normale	1,05	0,08
Hauteur d'eau en période de crue, $H_e$	Gumbel	41 m	1,22 m
Drainage, $\lambda$	Normale	0,33	0,15

Les distributions de probabilité du poids volumique et de la résistance à la compression ont été déterminées à partir d'une analyse statistique des essais disponibles en quantité abondante issus de la construction du barrage.

L'évaluation de la résistance à la traction est réalisée à partir d'une technique de fusion des données sur des ratios  $f_t/f_c$  disponibles dans la littérature [12].

Les paramètres de résistance au cisaillement ont été déterminés à l'aide d'une équation de la courbe intrinsèque [12]. Les corrélations entre la résistance à la traction  $f_t$  et les paramètres de résistance au cisaillement ( $C$  et  $\tan(\varphi)$ ) ont été évaluées également à partir de cette formulation de la courbe intrinsèque. Les valeurs de corrélation adoptées sont : 0,6 entre  $f_t$  et  $C$  ; (-)0,2 entre  $C$  et  $\tan(\varphi)$  ; et (-)0,1 entre  $f_t$  et  $\tan(\varphi)$ .

La distribution de probabilité de la hauteur d'eau en période de crue a été évaluée par ajustement d'une distribution de Gumbel sur des niveaux de la retenue obtenus pour des crues de différentes périodes de retour.

Les incertitudes sur l'efficacité du dispositif de drainage sont prises en compte par une distribution de probabilité associée au coefficient  $\lambda$  de rabattement des sous-pressions et caractérisée à partir des mesures d'auscultation.

### 3.2. Résultats de l'analyse de fiabilité

La probabilité de défaillance  $P_f$  pour l'état-limite de résistance à l'effort tranchant sur la couche en BCR inférieure du barrage, évaluée au moyen de la méthode FORM (First Order Reliability Method) et de simulations de Monte Carlo, est présentée dans le Tableau 2 suivant :

Tableau 2 : résultats des simulations de Monte Carlo et des analyses FORM

Etat limite	$P_f$ (Monte Carlo)	$P_f$ (FORM)	Indice de fiabilité $\beta$ (FORM)
Cisaillement couplé avec fissuration	$< 1,0 \times E-7$	$< 1,0 \times E-7$	6,45

Les résultats obtenus montrent une très faible probabilité de défaillance du barrage étudié vis-à-vis de l'état limite de résistance à l'effort tranchant. L'indice de fiabilité obtenu est conforme aux valeurs minimales préconisées dans l'Eurocode 0, ce qui montre une conception du barrage très sécuritaire vis-à-vis de l'état-limite analysé. L'Eurocode 0 définit la fiabilité structurale en fonction de classes de conséquences CC et de classes de fiabilité RC. Les grands barrages sont exclus des Eurocodes, mais on peut les comparer aux ouvrages de génie civil de classe de conséquences CC3 (conséquence, en cas de défaillance, élevée en termes de perte de vie humaine) et de classe de fiabilité RC3 (avec un indice de fiabilité  $\beta=5,2$  pour une durée de référence de 1 an soit une probabilité de défaillance annuelle  $P_f = 10^{-7}$ ).

La sensibilité des variables aléatoires sur la sûreté structurale est appréciée à partir de la méthode FORM. On recherche pour cela les cosinus directeurs du point de défaillance le plus probable dans un espace de probabilités standard, avec des variables indépendantes, centrées et réduites. Les carrés des cosinus directeurs sont présentés pour l'état-limite de résistance à l'effort tranchant (Figure 2).

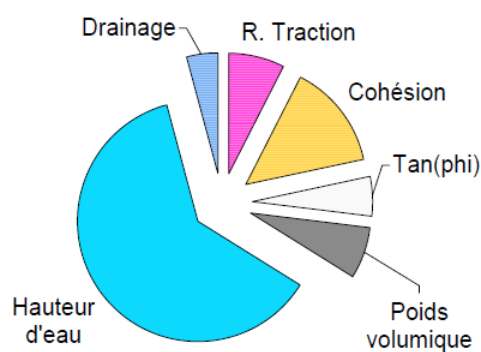


Figure 2 : Sensibilité de la probabilité de défaillance aux variables aléatoires

Cette figure permet d'identifier les variables aléatoires les plus influentes sur la probabilité de défaillance.

Parmi les variables de sollicitations - l'action hydrostatique amont représentée par la hauteur d'eau, l'action des sous-pressions représentée par le drainage, le poids propre représenté par le poids volumique -, c'est l'action hydrostatique amont qui est logiquement prépondérante sur la sûreté structurale, ce qui souligne l'intérêt de l'évaluation probabiliste de cette sollicitation.

Parmi les variables de résistance, ce sont les paramètres de cohésion et, à un moindre niveau, de la résistance à la traction qui sont prépondérants. On retrouve ainsi un résultat bien connu en ingénierie traditionnelle déterministe où les valeurs caractéristiques choisies pour  $C$  et  $f_t$  sont fondamentales dans la valeur du coefficient global de sécurité.

Ce cas d'application d'une analyse de fiabilité d'un barrage-poids vis-à-vis du mécanisme de glissement correspond à un scénario de défaillance en situation de crue considérant un fonctionnement nominal de l'évacuateur de crues. Ce type d'analyse de fiabilité peut être appliquée de manière analogue pour d'autres scénarios dans le cadre d'une étude d'analyse de risques ou une étude de dangers, comme illustré dans [9] pour évaluer la probabilité de défaillance du barrage en situation d'exploitation normale, en situation de défaillance de l'évacuateur de crues, en situation de séisme de base d'exploitation SBE et en situation de séisme d'évaluation de la sécurité SES.

## 4. APPLICATION SUR DES FONDATIONS ROCHEUSES D'UN BARRAGE

Ce cas d'application s'intéresse dans un premier temps à la variabilité spatiale de la résistance au cisaillement le long des discontinuités des fondations rocheuses de barrages, en intégrant : une description probabiliste des discontinuités du massif rocheux et une méthodologie expérimentale mobilisant des essais simples. Dans un second temps, les familles de discontinuités du massif rocheux sont intégrées de manière explicite dans un modèle numérique aux éléments finis pour une analyse de stabilité déterministe (comme dans l'exemple de la Figure 3) et pour une analyse de fiabilité des fondations rocheuses d'un barrage-poids vis-à-vis du mécanisme de glissement/cisaillement dans la fondation. Nous invitons le lecteur à consulter les articles [13] et [14] qui présentent plus de détails sur les démarches utilisées.

Le cas d'étude analysé est un barrage-poids existant situé au Québec. Cet ouvrage est constitué d'un barrage-poids en rive gauche ; d'une prise d'eau, d'une centrale et d'un évacuateur de crue en partie centrale ; et d'un barrage-poids en rive droite. La longueur totale du barrage est de 425 m et sa hauteur varie longitudinalement entre 13 et 30 m. Le rocher de fondation du site du barrage est une migmatite à biotite de l'unité supérieure M4 du Groupe de Mékinac dans la province géologique de Grenville. L'unité M4 est composée de gneiss et de migmatite. Les forages disponibles sont quatre forages verticaux d'environ 8 m de profondeur dans la fondation. Sur ces forages, nous avons prélevé des échantillons de roches ou de joints, repérés par leurs profondeurs, et nous avons réalisé un total de : 62 essais au marteau de Schmidt, 19 essais de cisaillement portatif sur joints lisses et 19 essais de numérisation de surface au profilomètre laser.

### 4.1. Modélisation des familles de discontinuités du massif rocheux

Le massif rocheux se présente généralement comme un milieu hétérogène discontinu, comprenant deux types d'éléments : les blocs rocheux et les discontinuités. Du fait de leur déformabilité, de leur faible résistance vis-à-vis de certaines sollicitations (cisaillement) et de leur conductivité hydraulique, les discontinuités jouent un rôle prépondérant dans le comportement du massif rocheux.

Les paramètres qui permettent de décrire la géométrie des discontinuités sont l'orientation, l'espacement et la persistance. L'orientation définit la position du plan de la discontinuité dans l'espace par rapport au Nord. L'espacement est la distance entre deux discontinuités d'une même famille directionnelle mesurée perpendiculairement à celles-ci. L'extension ou persistance des discontinuités correspond à la surface totale de la discontinuité dans l'espace.

Dans ce cas d'étude, nous utilisons la projection stéréographique comme méthode d'analyse pour l'étude de la répartition des discontinuités en familles directionnelles. Lorsque les différentes familles sont identifiées, nous procédons à l'analyse statistique de chaque famille à partir de la réalisation d'histogrammes de distribution des paramètres géométriques concernant l'orientation, l'espacement et la persistance. Cette description probabiliste des discontinuités du massif rocheux est classique et constitue une donnée d'entrée de géomodeleurs qui permettent de simuler la distribution spatiale des discontinuités. La Figure 3 montre un exemple de simulation de discontinuités intégrées dans un modèle numérique aux éléments finis.

### 4.2. Modélisation de la variabilité de la résistance au cisaillement des discontinuités des fondations rocheuses

#### 4.2.1. Critère de résistance au cisaillement des discontinuités

Nous utilisons le critère de Barton et Choubey [15] pour la caractérisation de la résistance au cisaillement des discontinuités. Ce critère (équation 1) introduit un paramètre qui tient compte de la rugosité appelé le JRC (Joint Roughness Coefficient), un paramètre de résistance mécanique JCS qui tient compte de l'altération des épontes (Joint Compressive Strength) et de l'angle de frottement résiduel, noté  $\varphi_r$ . Le terme  $\sigma_n$  représente la contrainte normale et  $\tau_{pic}$  la résistance au cisaillement au pic.

$$\tau_{pic} = \sigma_n \tan \left( \varphi_r + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad [Eq.1]$$

La méthodologie se base sur une démarche expérimentale [13] qui mobilise des moyens moins conséquents (par rapport à des essais de cisaillement classiques) pour la détermination des paramètres du critère de Barton et Choubey : un profilomètre laser pour la numérisation de surface qui permet d'évaluer le JRC, un appareil portatif d'essai de cisaillement pour déterminer  $\varphi_r$ , et un scléromètre à béton pour évaluer le paramètre JCS.

#### 4.2.2. Modélisation probabiliste de la résistance au cisaillement des discontinuités

La démarche adoptée commence par une analyse statistique des paramètres mesurés dans une campagne expérimentale à l'échelle des joints intersectés par un forage (échelle de l'échantillon) : la valeur au rebond de la matrice rocheuse  $R$  et des joints altérés  $r$  obtenu par marteau de Schmidt ; l'angle de frottement de base  $\varphi_b$  obtenu par essai de cisaillement sur des joints sciés ; et le paramètre statistique de rugosité  $Z_2$  évalué sur des surfaces de joints numérisées au profilomètre laser.

Les paramètres d'entrée du modèle de Barton et Choubey à l'échelle de l'échantillon sont déterminés à partir des paramètres mesurés en utilisant les équations empiriques suivantes :

$$\varphi_r = (\varphi_b - 20) + 20 \cdot \frac{r}{R} \quad [\text{Eq.2}]$$

$$\text{JCS} = 9,97 * e^{(0,02 * R * \rho)} ; \text{ avec } \rho : \text{ densité de la matrice rocheuse} \quad [\text{Eq.3}]$$

$$\text{JRC} = 32,2 + 32,47 \cdot \log(Z_2) \quad [\text{Eq.4}]$$

La modélisation probabiliste des paramètres étudiés à l'échelle de l'échantillon distingue une tendance déterministe en fonction de la localisation spatiale, une variable aléatoire d'erreur de mesure et une variable aléatoire d'erreur de modèle associée à la tendance déterministe. Finalement, la modélisation probabiliste à l'échelle de l'ouvrage des paramètres de résistance au cisaillement des discontinuités rocheuses est effectuée à partir d'une analyse de réduction de variance [13].

#### 4.3. Analyse de stabilité et de fiabilité

Nous disposons du géomodeleur *Phase<sup>2</sup>* pour la construction du modèle géomécanique en 2D. Cette limite, par rapport à un modèle 3D, pourrait être acceptable dans le cas des barrages-poids où la stabilité est analysée généralement en 2D. Ce géomodeleur, basé sur la méthode des éléments finis, utilise la méthode de réduction de la résistance au cisaillement (SSR : Shear Strength Reduction) pour l'analyse de la stabilité des massifs rocheux. La Figure 3 suivante présente le résultat d'une simulation des discontinuités du massif rocheux et les déplacements obtenus.

Dans cette application, nous avons considéré comme variable aléatoire uniquement les paramètres de résistance au cisaillement, évalués à partir des essais mentionnés précédemment. Les lois de probabilité de ces paramètres ont été déterminées selon deux cas [13] : (i) à partir d'une analyse statistique classique (moyenne, écart-type/variance, ...) et (ii) à partir d'une analyse tenant compte d'une réduction de variance (en considérant qu'une partie de la dispersion peut être expliqué par exemple avec une augmentation de la résistance avec la profondeur).

Pour l'analyse de fiabilité, nous avons utilisé le module probabiliste déjà intégré dans le logiciel *Phase<sup>2</sup>*. Il est défini en variable aléatoire et estime la probabilité de défaillance de manière approchée (à partir de la méthode Point Estimate Method, PEM). Il s'agit d'une estimation en première approche (compte tenu des non-linéarités de l'état-limite) qui vise simplement à illustrer l'impact que peut avoir la prise en compte de la réduction de variance sur l'estimation de la probabilité de défaillance (selon les cas i et ii mentionnés ci-dessus). Dans cette étude, la probabilité de défaillance évaluée pour le cas (i), qui ne tient pas compte d'une réduction de variance, est de  $2 \times 10^{-6}$ . Pour le cas (ii), la prise en compte de la réduction de variance conduit à réduire de plusieurs ordres de grandeur la probabilité de défaillance (toutefois, la valeur obtenue est à nuancer compte tenu des hypothèses et simplifications adoptées).

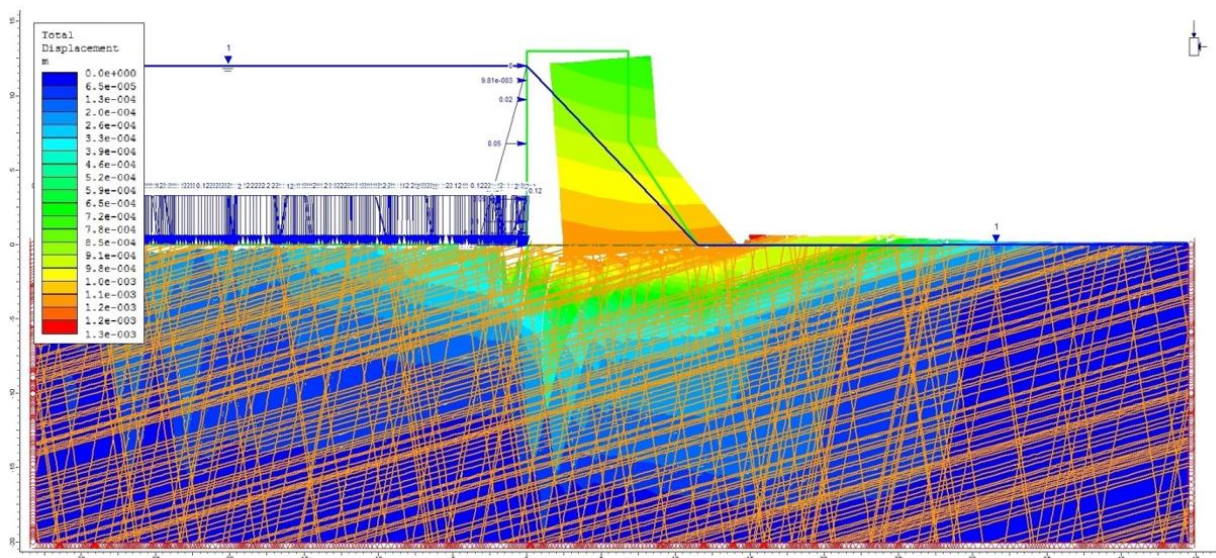


Figure 3 : Résultats d'une simulation des discontinuités d'un massif rocheux et le champ de déplacements associés [13]

## 5. APPLICATION SUR UN BARRAGE EN REMBLAI

Ce cas d'application présente une synthèse de résultats issus de plusieurs travaux de recherche [16 à 20] portant sur la modélisation probabiliste du mécanisme de glissement d'un barrage en remblai en tenant compte de la variabilité spatiale des propriétés des matériaux.

Ce cas d'étude illustre une démarche permettant de caractériser la variabilité spatiale des propriétés hydrauliques et mécaniques à travers des champs aléatoires évalués à partir des données disponibles, et de produire ensuite des couplages mécano-fiabilistes par la méthode des éléments finis stochastiques pour obtenir une distribution probabiliste du facteur de sécurité vis-à-vis du mécanisme de glissement.

Le barrage étudié correspond à un ouvrage en remblai zoné d'une hauteur maximale de 23 m, retenant un volume utile d'eau d'environ 5 millions de m<sup>3</sup> et situé dans l'ouest de la France. D'un volume total d'environ 140 000 m<sup>3</sup>, le corps du barrage est formé d'un noyau (NOY) constitué de limons sableux sur lequel s'appuient deux recharges amont (RAM) et aval (RAV) constituées d'un matériau sablo-graveleux issu de l'altération de schistes. Les caractéristiques des matériaux des recharges sont proches de celles du noyau. L'écart de perméabilité entre le noyau et les recharges est moins significatif par rapport à un barrage zoné classique. En fondation, un voile d'étanchéité a été réalisé au droit du noyau central. Ce voile descend jusqu'à des profondeurs de 15 à 25 m, et est prolongé par des voiles au large sur les rives. Une cheminée drainante ainsi que des bretelles drainantes horizontales sont placées dans la recharge aval afin de collecter les écoulements.

### 5.1. Modélisation de la variabilité spatiale des propriétés des matériaux

Différentes données sont disponibles sur le barrage étudié. Nous disposons premièrement d'informations provenant de la phase d'étude du projet. Une trentaine d'échantillons a été prélevée sur les zones d'emprunt des matériaux utilisés pour la constitution de l'ouvrage. Ceux-ci ont fait l'objet d'essais d'identification (analyses granulométriques, limites d'Atterberg), d'essais triaxiaux, d'essais de compactage (Proctor) et de quelques essais de perméabilité.

Durant la mise en œuvre de l'ouvrage, la densité sèche et la teneur en eau après compactage du remblai ont été contrôlées. La densité sèche a été mesurée in situ à l'aide d'un gammadensimètre Troxler. Au total, plus d'un millier de mesures ont été effectuées sur les trois zones (RAM : 376, NOY : 469, RAV : 333 respectivement). Un dispositif de géoréférencement a été mis en place lors de la construction du barrage afin de localiser les mesures de contrôle de compactage dans l'espace (suivant les trois axes). Nous disposons donc d'un nombre important de mesures de densité sèche et de leur localisation relativement précise dans l'espace.

Pour les mesures de densité sèche, disponibles en quantité importante et géoréférencées, une analyse géostatistique des mesures a été réalisée afin d'analyser la variabilité spatiale des matériaux. Cette analyse a été effectuée à partir des variogrammes expérimentaux qui ont été calculés sur les données de notre cas d'étude selon les directions horizontale et verticale. Un variogramme traduit la corrélation en fonction de la distance entre points de mesures (corrélation plus forte entre points qui sont plus proches). Un modèle théorique de type exponentiel est ensuite calé sur les six variogrammes obtenus. Ils permettent de déduire les longueurs de corrélation pour obtenir ensuite une représentation par champ aléatoire de la densité sèche.

Concernant la perméabilité et les paramètres de résistance au cisaillement, nécessaires pour l'analyse d'écoulements et l'analyse de stabilité d'un barrage, nous disposons de quelques essais permettant d'estimer une distribution de probabilité représentant une tendance centrale et une dispersion. Cependant, nous ne disposons pas des données géoréférencées pour caractériser la variabilité spatiale de ces paramètres. Nous nous sommes donc appuyés sur des relations empiriques définies en fonction de la densité et nous avons utilisé les résultats de l'analyse géostatistique pour intégrer la corrélation spatiale [17, 18]. La Figure 4 montre un exemple de réalisation d'un champ aléatoire illustrant la variabilité spatiale de l'angle de frottement interne (estimée en utilisant la relation de Caquot).

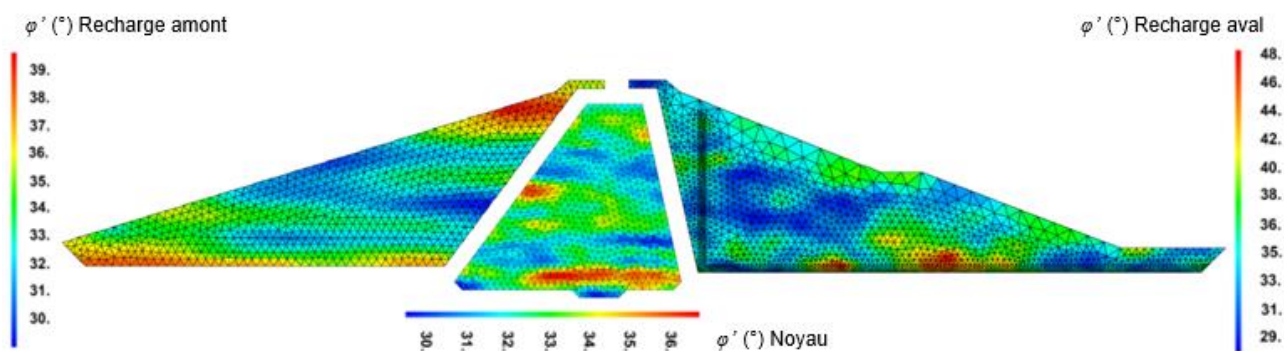


Figure 4 : exemple de réalisation d'un champ aléatoire de l'angle de frottement interne  $\phi'$  (°), [18]

## 5.2. Modélisation probabiliste des pressions interstitielles

La variabilité spatiale des pressions interstitielles est évaluée à partir de simulations de Monte-Carlo mobilisant la simulation de champs aléatoires de la perméabilité et le calcul d'écoulements dans le barrage.

Un champ aléatoire de perméabilité des matériaux est généré à partir des données disponibles (courbes granulométriques, limites de liquidité et densités sèches). Ces champs de perméabilité sont introduits ensuite comme donnée d'entrée au modèle par éléments finis qui résout l'équation d'écoulement. Un champ des pressions interstitielles est ainsi obtenu en tout point de la section étudiée.

Un nombre important de réalisations permet d'obtenir une distribution de lignes piézométriques et des pressions interstitielles sur l'ensemble de la section analysée. Les résultats obtenus ont été comparés avec les mesures d'auscultation et montrent une bonne adéquation avec celles-ci [17].

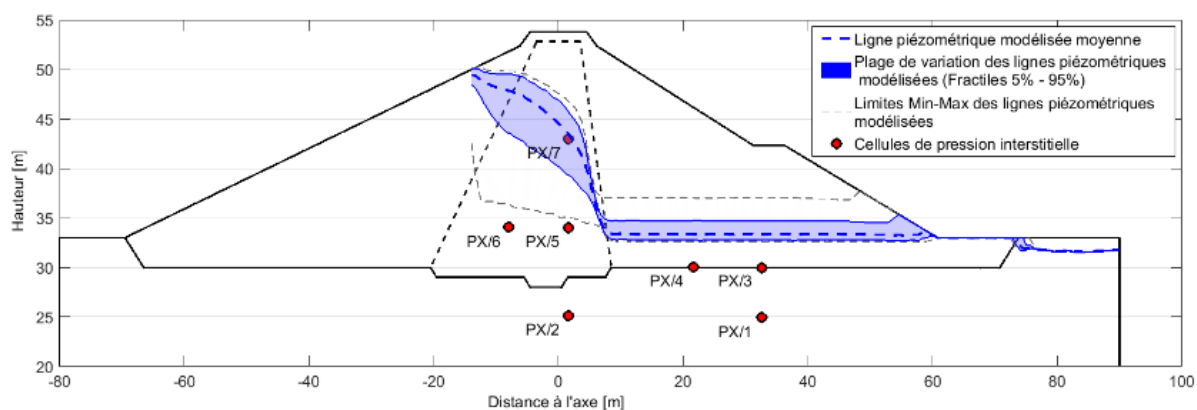


Figure 5 : Distribution des surfaces phréatiques obtenues [17]

## 5.3. Analyse mécano-fiabiliste du mécanisme de glissement

Dans cette étude, le couplage mécano-fiabiliste a été réalisé au travers de simulations de Monte-Carlo à partir des modèles par éléments finis (hydraulique et mécanique) construits avec le code Cast3M. Le principe de cette analyse de fiabilité par simulations de Monte-Carlo est le suivant : [18]

- un champ de pressions interstitielles est engendré selon la démarche exposée précédemment ;
- le champ de pressions interstitielles est intégré comme donnée d'entrée dans le modèle mécanique de calcul du facteur de sécurité ;
- des réalisations de champ aléatoire de  $c$  et de  $\varphi$  sont générées et sont également introduites dans le modèle mécanique. La corrélation entre ces paramètres a été évaluée comme très faible à partir des essais triaxiaux disponibles et elle n'a pas été prise en compte dans l'analyse de fiabilité ;
- le facteur de sécurité de l'ouvrage est calculé à partir d'une modélisation aux éléments finis par la méthode de réduction des paramètres ;
- l'opération est répétée  $N$  fois afin d'obtenir une distribution de facteurs de sécurité.

Dans ce cas d'étude, seulement 1 000 simulations ont été effectuées en raison du temps de calcul nécessaire. Ce nombre de simulations n'apparaît pas suffisant pour évaluer de manière précise la probabilité de défaillance associée à un barrage en remblai à partir de simulations de Monte-Carlo classiques, où il faut effectuer de  $10^{n+2}$  à  $10^{n+3}$  simulations pour évaluer correctement une probabilité de l'ordre de  $10^{-n}$ . Le nombre de simulations que nous avons effectué dans notre cas d'étude apparaît toutefois suffisant pour obtenir une convergence de la moyenne (2,45) et de l'écart-type (0,22) de l'échantillon de facteur de sécurité obtenu pour le barrage étudié. Avec ces moments statistiques, on peut estimer de manière approximative une valeur d'indice de fiabilité (6,5) et d'une probabilité de défaillance ( $\ll 1.E-7$ ).

Des méthodes d'analyse de fiabilité plus avancées ont été également mises en œuvre sur ce cas d'application. La méthode dite SPCE (Sparse Polynomial Chaos Expansion) a été effectuée sur deux modèles déterministes du barrage étudié [19] : un modèle numérique basé sur la méthode des différences finies (construit sur FLAC) et un modèle analytique à l'équilibre limite basé sur des algorithmes génétiques (GA). La méthode SPCE permet d'évaluer la probabilité de défaillance et la distribution de probabilité du facteur de sécurité. La Figure 6 (à gauche) montre la distribution de probabilité du facteur de sécurité obtenue par la méthode SPCE à partir du modèle numérique (FLAC) et du modèle analytique (GA). Basée sur la méthode SPCE, il est possible également d'effectuer une analyse de sensibilité globale (SPCE/GSA) permettant d'évaluer la sensibilité de la distribution du facteur de sécurité aux variables aléatoires d'entrée. La Figure 6 (à droite) montre les indices de sensibilité Sobol évalués par la méthode SPCE/GSA : les paramètres de résistance au cisaillement  $C$  et  $\Phi$  de la recharge aval sont logiquement ceux qui ont le plus de poids sur l'évaluation de la distribution de probabilité du facteur de sécurité.



Une étude comparative [20] de différentes méthodes de fiabilité a été effectuée par comparaison avec les résultats des simulations de Monte Carlo. Les méthodes de fiabilité considérées sont : Subset Simulation (SS), Moment Method (MM), Sparse Polynomial Chaos Expansion / Global Sensitivity Analysis (SPCE/GSA) et Sparse Polynomial Chaos Expansion / Sliced Inverse Regression (SPCE/SIR).

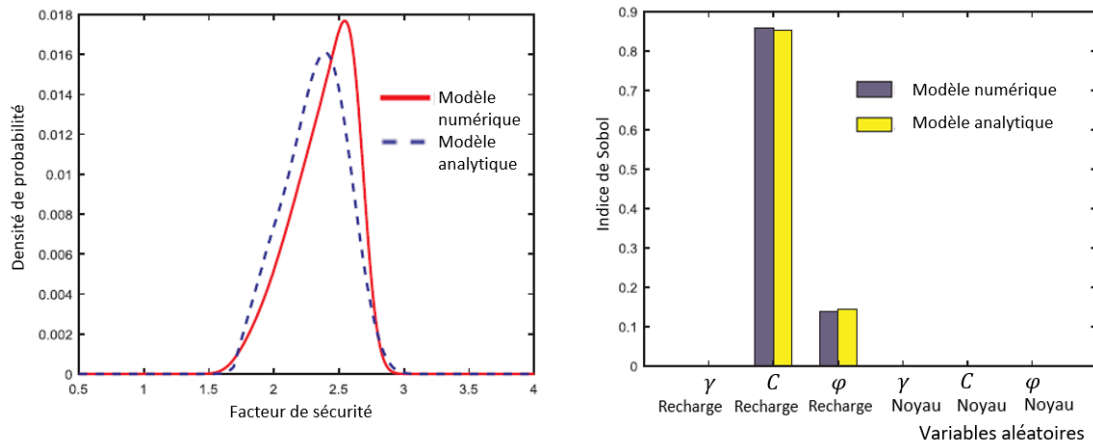


Figure 6 : Distribution de probabilité facteur de sécurité et indices de sensibilité obtenus par la méthode SPCE/GSA [20]

## 6. CONCLUSION

Cet article présente une synthèse de travaux de recherche d'Irstea sur l'application de méthodes d'analyse de fiabilité dans le domaine des barrages. Ces travaux sont illustrés sur trois exemples d'application de méthodes fiabilistes à des barrages existants : sur un barrage-poids, sur des fondations rocheuses et sur un barrage en remblai.

L'apport des méthodes d'analyse de fiabilité par rapport à une démarche déterministe est de pouvoir prendre en compte de manière explicite les incertitudes associées aux données d'entrée des modèles de calcul utilisés pour la justification de la stabilité structurale des ouvrages. Une analyse de fiabilité permet de modéliser les données d'entrée comme des variables aléatoires, de les intégrer dans un modèle déterministe de calcul de stabilité et d'évaluer l'impact sur les résultats de ce modèle de calcul. Les méthodes probabilistes fiabilistes permettent ainsi d'avoir une connaissance plus fine des marges de sécurité : en plus d'une valeur de facteur de sécurité obtenue par un calcul déterministe, les cas d'application présentés dans cet article montrent qu'on peut obtenir également une distribution du facteur de sécurité (moyenne, écart-type, ...), une probabilité de défaillance et une évaluation du poids des variables aléatoires dans le calcul de la probabilité de défaillance. D'un point de vue opérationnel, l'évaluation quantitative d'une probabilité de défaillance à partir d'une analyse de fiabilité peut être intégrée directement dans une étude d'analyse de risques ou une étude de dangers.

Pour la modélisation probabiliste des données d'entrée (solicitations, propriétés des matériaux, ...), la détermination de lois de probabilité peut s'effectuer à partir d'une analyse statistique classique à condition d'avoir un nombre suffisant de données. Pour le cas des propriétés mécaniques des matériaux où l'on a généralement très peu de données, on peut faire appel également à d'autres approches (mobilisant le jugement d'experts, relations physiques/empiriques, données bibliographiques, ...). Cet article présente différents niveaux de complexité pour la modélisation probabiliste des propriétés des matériaux, en se forçant à utiliser l'ensemble des données disponibles : variables aléatoires indépendantes, variables aléatoires avec prise en compte de corrélations entre différentes propriétés, champs aléatoires (variabilité spatiale). Dans un cadre opérationnel (comme une étude de dangers), il n'est pas nécessaire de déployer un tel niveau de complexité : une évaluation des lois de probabilité à dire d'expert ou à partir de données bibliographiques peut s'avérer suffisante lorsqu'on n'a pas assez de données pour une analyse statistique.

Les applications présentées dans cet article montrent finalement que la modélisation probabiliste des états-limites peut mobiliser les différentes méthodes de calculs déterministes utilisées en ingénierie de barrages : les méthodes à l'équilibre limite (stabilité de barrages-poids, stabilité de pentes) ainsi que les méthodes numériques aux éléments finis ou différences finies (modélisation de fondations rocheuses intégrant des familles de discontinuités, modélisation hydraulique-mécanique de barrages en remblai). Dans un cadre opérationnel : on peut utiliser les méthodes d'analyse de fiabilité basées sur des simulations de Monte-Carlo pour le cas de modélisations à l'équilibre limite ; et on peut privilégier des méthodes de fiabilité basées sur d'approximations (FORM, PEM, méta-modèles, ...) pour le cas de modélisations numériques plus complexes.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les personnes et organismes qui ont contribué à la réalisation des travaux présentés dans cette communication : Irstea, université Clermont-Auvergne, université de Sherbrooke, université de Grenoble, Safege (Suez). Des remerciements sont également adressés au China Scholarship Council, CSC, pour la participation au financement d'une des thèses en cours.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] M. Lemaire, A. Châteauneuf, & J.C. Mitteau, 2005. Fiabilité des structures – Couplage mécano-fiabiliste statique. Hermès Science Publications.
- [2] Hariri-Ardebili, M. A., 2018. Risk, Reliability, Resilience (R3) and beyond in dam engineering: A state-of-the-art review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 806-831.
- [3] ICOLD, 2011. Theme C: Estimation of the probability of failure of a gravity dam for the sliding failure mode. In: 11th ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams; 20-21 October 2011; Valencia.
- [4] ICOLD 2015. Theme B: Probability of failure of an embankment dam due to slope instability and overtopping. In: 13th ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams; 9-11 September 2015; Lausanne.
- [5] ICOLD, 2017. Theme D: Risk Analysis—assessment of reliability for concrete dams. In: 14th ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams; 6-8 September 2017; Stockholm.
- [6] M. Westberg-Wilde and F. Johansson, 2016. Probabilistic model code for concrete dams. *Energiforsk.* 2016:292.
- [7] USACE, 2000. Reliability and Stability Assessment of Concrete Gravity Structures (RCSLIDE): User's Guide. ERDC/ITL TR-00-2.
- [8] USACE, 2006. Reliability Analysis and Risk Assessment for Seepage and Slope Stability Failure Modes for Embankment Dams. ETL 1110-2-561.
- [9] C. Carvajal, L. Peyras, H. Félix, P. Royet, J. P. Bécue, G. Philip. Apport des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement et de la Fiabilité dans le cadre des études de dangers: Exemple d'application sur le barrage du Xoldocogaina. Colloque du Comité Français des Barrages et Réservoirs, CFBR, Lyon, 21-22 nov., 2011.
- [10] H. Kreuzer and P. Leger, 2013. The Adjustable Factor of Safety: A reliability-based approach to assess the factor of safety for concrete dams. *HydroPower & Dams Vol. 20 - Issue 1*, 2013.
- [11] C. Carvajal, J. P. Bécue, C. Varon, L. Peyras, P. Royet, D. Boissier, C. Bacconnet. Analyse fiabiliste de la sécurité structurale des barrages poids. Colloque du CFBR et de la SHF, Paris, 20-21 janvier, 2009.
- [12] C. Carvajal, L. Peyras, C. Bacconnet, J.-P. Bécue, 2009. Probability Modelling of Shear Strength Parameters of RCC Gravity Dams for Reliability Analysis of Structural Safety. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol.13, No.1, pp.91-119.
- [13] D. Sow, C. Carvajal, P. Breul, L. Peyras, P. Rivard, C. Bacconnet, G. Ballivy, 2017. Modeling the spatial variability of the shear strength of discontinuities of rock masses: Application to a dam rock mass. *Engineering Geology*, Vol.220, pp.133-143.
- [14] C. Carvajal, D. Sow, P. Breul, L. Peyras, P. Rivard, C. Bacconnet, G. Ballivy. Fiabilité des fondations rocheuses de barrages et Variabilité spatiale de la résistance au cisaillement des discontinuités. Colloque du CFBR 2016, Chambéry, 23-24 novembre, 2016.
- [15] Barton, N.R., Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 10, 1–54 n° 1–2, 1977.
- [16] A. Mouyeaux, C. Carvajal, L. Peyras, P. Bressolette, C. Bacconnet, P. Breul. Evaluation probabiliste de la sécurité des ouvrages hydrauliques en remblai vis-à-vis du mécanisme de glissement par la méthode des éléments finis stochastiques. Colloque du CFBR 2016, Chambéry, 23-24 novembre, 2016.
- [17] A. Mouyeaux; C. Carvajal; P. Bressolette; L. Peyras; P. Breul; C. Bacconnet. Probabilistic analysis of pore water pressures of an earth dam using a random finite element approach based on field data. *Engineering Geology*. Vol. 259, 105190.
- [18] A. Mouyeaux, C. Carvajal, P. Bressolette, L. Peyras, P. Breul, C. Bacconnet, 2018. Probabilistic stability analysis of an earth dam by Stochastic Finite Element Method based on field data. *Computers and Geotechnics*, 101, 34-47.
- [19] X. Guo, D. Dias, C. Carvajal, L. Peyras, P. Breul, 2018. Reliability analysis of embankment dam sliding stability using the sparse polynomial chaos expansion. *Engineering Structures*, Vol.174, pp.295-307.
- [20] X. Guo, D. Dias, C. Carvajal, L. Peyras, P. Breul, 2019. Comparative study of different reliability methods for high dimensional stochastic problems related to earth dam stability analysis. *Eng. Structures*, 188, 591-602.