



HAL
open science

Amélioration de la détermination des propriétés de résistance de l'interface béton-rocher et des discontinuités des fondations rocheuses des barrages poids

Grégory Coubard, Guilhem Deveze, Christophe Vergniault, Guillaume Zammout, Laurent Peyras, Claudio Carvajal, Marion Bost, Jean-Pierre Rajot, Patrice Rivard, Gérard Ballivy, et al.

► To cite this version:

Grégory Coubard, Guilhem Deveze, Christophe Vergniault, Guillaume Zammout, Laurent Peyras, et al.. Amélioration de la détermination des propriétés de résistance de l'interface béton-rocher et des discontinuités des fondations rocheuses des barrages poids. CIGB 2018, 26è Congrès des Grands Barrages, Jul 2018, Vienne, Autriche. 21p. hal-02440241

HAL Id: hal-02440241

<https://hal.science/hal-02440241>

Submitted on 15 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMMISSION INTERNATIONALE
DES GRANDS BARRAGES

VINGT-SIX CONGRES
DES GRANDS BARRAGES

Vienne, 2018

**AMELIORATION DE LA DETERMINATION DES PROPRIETES DE
RESISTANCE DE L'INTERFACE BETON-ROCHER ET DES DISCONTINUITES
DES FONDATIONS ROCHEUSES DES BARRAGES POIDS**

Grégory COUBARD, Guilhem DEVEZE, Christophe VERGNIAULT, Guillaume
ZAMMOUT
EDF, France

Laurent PEYRAS, Claudio CARVAJAL
IRSTEA, France

Marion BOST, Jean-Pierre RAJOT
IFSTTAR, France

Patrice RIVARD, Gérard BALLIVY, Djibril SOW, Adrien RULLIERE
Université de Sherbrooke, Canada

Pierre BREUL, Claude BACCONNET
Université Clermont Auvergne, France

Marco QUIRION
Hydro-Québec, Canada

1. INTRODUCTION

La réévaluation à la hausse des chargements appliqués aux barrages (nouvelles données hydrologiques et sismiques ou évolution de la réglementation) ainsi que l'évolution des critères de dimensionnement des ouvrages (nouvelles méthodes ou augmentation des coefficients de sécurité) conduisent à se réinterroger sur les méthodes utilisées pour justifier la stabilité des barrages existants. Pour les barrages-poids, la stabilité est directement liée aux caractéristiques mécaniques des différentes discontinuités composant le barrage et sa fondation rocheuse. Ces discontinuités correspondent aux reprises de bétonnage dans l'ouvrage, à l'interface barrage-fondation ou aux discontinuités présentes en fondation. Les caractéristiques mécaniques en jeu sont la résistance à la traction, liée à un mode de rupture par fissuration et

renversement, ainsi que la résistance au cisaillement, liés à un mode de rupture par glissement.

Dans le cas de barrages anciens et mal documentés, la détermination de ces caractéristiques mécaniques peut s'avérer complexe. Des reconnaissances par sondages carottés sont nécessaires mais la représentativité des échantillons et l'éventuel effet d'échelle entre les essais réalisés sur carottes et les valeurs caractéristiques à l'échelle de l'ouvrage demeurent incertains.

Fort de ce constat, IRSTEA et EDF ont lancé plusieurs actions de développement ces dernières années visant à l'amélioration de la caractérisation des discontinuités de fondations rocheuses ainsi que de l'interface béton-rocher. L'interface béton-rocher est définie au sens du CFBR [9] comme une zone incluant le contact béton-rocher mais aussi le béton et le rocher sur une épaisseur métrique. Cet article retrace les différents travaux de développement et plus particulièrement :

- La création d'une base de données de résistance à la traction directe du contact béton-rocher en laboratoire,
- La création d'une base de données de résistance au cisaillement du contact béton-rocher en laboratoire et à différentes échelles,
- Une proposition de méthodologie de caractérisation de la résistance à la traction de l'interface barrage-fondation basée sur l'exploitation de la base de données précédente,
- Une proposition de méthodologie pour la caractérisation de la variabilité spatiale des joints rocheux présents en fondation.

Il conclut par les réflexions en cours sur la caractérisation géométrique du contact béton-rocher par des méthodes non-destructives et sur la caractérisation de la cohésion apparente.

2. ACQUISITION DE DONNEES EXPERIMENTALES DES PROPRIETES DE RESISTANCES DES INTERFACES

2.1. BASE DE DONNEES DE RESISTANCE A LA TRACTION DU CONTACT BETON-ROCHER

L'élaboration d'une base de données sur la résistance à la traction directe en laboratoire répond à la difficulté de tester des échantillons de contact béton-rocher de barrages existants, d'une part parce que le contact peut être endommagé lors des opérations de carottages et d'autre part parce qu'un essai en cisaillement est souvent privilégié lors du prélèvement d'un contact intact [10]. De ce fait, il existe peu de littérature concernant la résistance à la traction directe du contact béton-rocher.

Une campagne expérimentale a été réalisée à partir d'un banc d'essai de traction initialement développé par le laboratoire EDF/CEMÉTÉ pour la mesure de la résistance à la traction de reprises de bétonnage. La description plus précise de cette campagne est décrite dans [12].

L'objectif du programme d'essais a été de créer une base de données dépendant :

- Du type de béton. Deux formulations représentatives des bétons rencontrés sur des barrages anciens ont été mises au point avec un béton classique (« concrete », $R_c = 29$ MPa, $R_t = 3,1$ MPa) et un microbéton aux caractéristiques dégradées (« degraded concrete », $R_c = 23$ MPa, $R_t = 2,6$ MPa).
- De l'état de propreté du contact béton-rocher. Deux états ont été mis en œuvre : un état parfaitement propre (« clean », nettoyage par jet haute pression) et un état sale (« dirty », badigeon avec les poussières de sciage).
- De la lithologie du rocher. Trois faciès représentant la majeure partie du parc hydraulique français ont été retenus : granite, gneiss et calcaire.

La mise en œuvre du protocole expérimental est illustrée par les figures Fig. 1 à 3.



Fig. 1

Préparation et découpe des blocs rocheux
Preparation and sawing of the rock blocks



Fig. 2

Préparation de l'état de surface (propre à gauche, sale à droite)
Preparation of the contact cleanliness (clean on the left, dirty on the right)

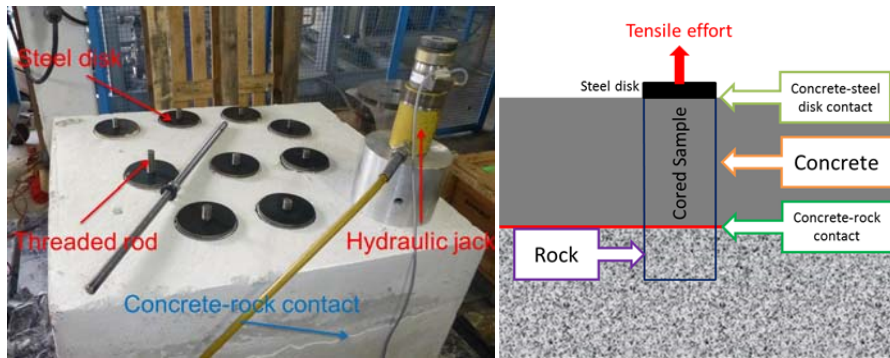


Fig. 3
Dispositif expérimental pour l'essai de traction
Experimental device for the tensile test

Au final, 140 essais ont pu être réalisés et analysés. Pour chaque lithologie, il a été possible de tracer la résistance à la traction en fonction de l'occurrence cumulée des essais. Ainsi la figure Fig. 4 met en évidence que 75% des essais réalisés sur le granite ont une résistance à la traction supérieure à 0,2 MPa.

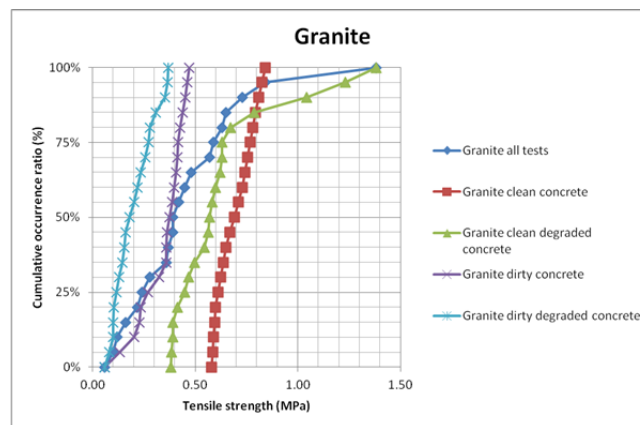


Fig. 4
Résultats des essais de tractions au contact béton-granite
Tensile test results at the concrete-to-granite contact

Les résultats obtenus sont conformes à ceux de la littérature et notamment ceux de l'EPRI [10]. A l'issue de cette campagne, des valeurs caractéristiques de résistance à la traction en fonction du faciès et de l'état de surface ont été définies. Ces valeurs correspondent aux fractiles à 25% (valeurs caractéristiques choisies telles que seuls 25% des essais donnent des résistances inférieures).

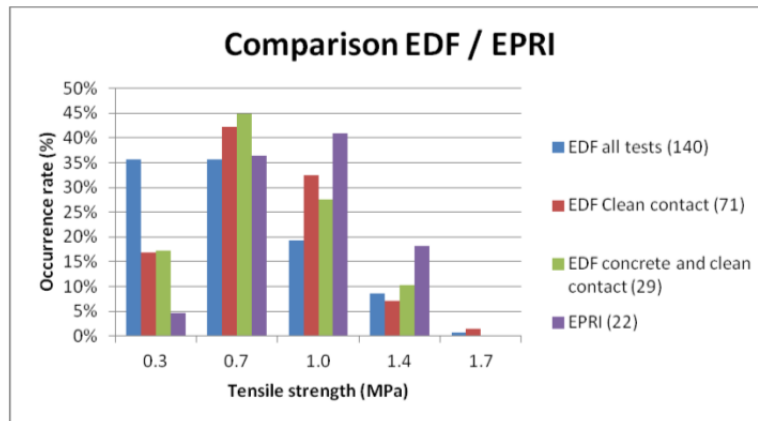


Fig. 5
 Comparaison des résultats EDF et EPRI
 Comparison between results of EDF and EPRI's programs

Tab. 1
 Valeurs caractéristiques retenues à l'issue de la campagne expérimentale
 Characteristic values obtained at the end of the experimental protocol

Contact state	Granite	Gneiss	Limestone
Clean	0.52 MPa	0.49 MPa	0.30 MPa
Dirty (thin film of dust)	0.15 MPa	0.23 MPa	0.22 MPa

2.2. BASE DE DONNEES DE RESISTANCE AU CISAILLEMENT DU CONTACT BETON-ROCHER

L'effet d'échelle sur la résistance au cisaillement de contacts béton-rocher cohésifs n'est pas véritablement documenté dans la littérature. Cet effet pourrait cependant avoir une certaine importance pour extrapoler les résultats obtenus à l'échelle d'un échantillon de carottage jusqu'à l'échelle d'un plot de barrage.

Dans cette perspective, EDF a lancé une thèse en partenariat avec l'IFSTTAR [11,13]. L'originalité de ces travaux a été d'acquérir des résistances au cisaillement direct sur des échantillons préparés en laboratoire de différentes dimensions entre $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ et $1,5 \text{ m}^2$, grâce à l'exceptionnelle machine de cisaillement présente au CEREMA à Bron. Etant données l'importance et la complexité du dispositif expérimental mis en œuvre, une seule combinaison a été testée : rocher granitique et béton de formulation proche des bétons anciens du parc hydraulique d'EDF.



Fig. 6

Machine de cisaillement à grande échelle du CEREMA : « la grande bleue »
 CEREMA's large shear box: "the big blue"

Au total, 22 essais de cisaillement ont été réalisés au cours de la thèse et plus particulièrement pour des surfaces naturelles de granite :

- 8 essais à petite échelle sur des sondages carottés de 80 mm de diamètre. Ces essais représentent la pratique usuelle de détermination de la résistance au cisaillement des barrages existants à l'aide de sondages carottés.
- 9 essais à l'échelle intermédiaire sur des surfaces carrées de 180 x 180 mm.
- 5 essais à grande échelle sur des surfaces rectangulaires de 1500 x 1000 mm. Ces essais représentent l'échelle métrique du contact béton-rocher sans la prise en compte d'une macro-dilatance liée à la mise en œuvre volontaire d'indentation (création de redans lors du terrassement en fond de fouilles).

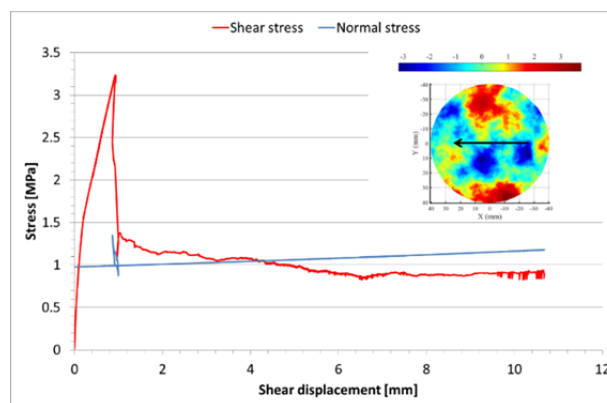


Fig. 7

Résultat d'un essai de cisaillement à petite échelle
 Result of a small scale shear test

L'ensemble des surfaces naturelles de granite ont fait l'objet d'une mesure haute résolution de leur morphologie avant coulage du béton de manière à caractériser avec précision les paramètres de rugosité.

Les cinq essais réalisés à grande échelle ont été lourdement instrumentés avec en plus des capteurs de force et de déplacement de la boîte de cisaillement, des jauges de déformation, des capteurs d'émission acoustique et une fibre optique installée dans le béton au contact béton-rocher. L'ensemble de cette instrumentation a permis d'acquérir des données expérimentales de très bonne qualité en vue de l'analyse détaillée des mécanismes de rupture durant l'essai de cisaillement.

Les résultats de résistance de cisaillement au pic de l'ensemble des essais (à différentes échelles) sont synthétisés dans la figure Fig. 8. Deux comportements principaux sont mis en évidence :

- Les essais à petite échelle et la moitié des essais à l'échelle intermédiaire (notés type A) donnent des caractéristiques de cisaillement élevées avec une cohésion d'environ 2,5 MPa pour un angle de frottement de 45° dans un critère Mohr-Coulomb.
- Les essais à grande échelle et la moitié des essais à l'échelle intermédiaire (notés type B) donnent des caractéristiques de cisaillement moins élevées avec une cohésion de plus de 1 MPa pour un angle de frottement moyen de 45°.

Il est par ailleurs intéressant de noter que l'ensemble des essais a donné un angle de frottement résiduel post-pic d'environ 45°.

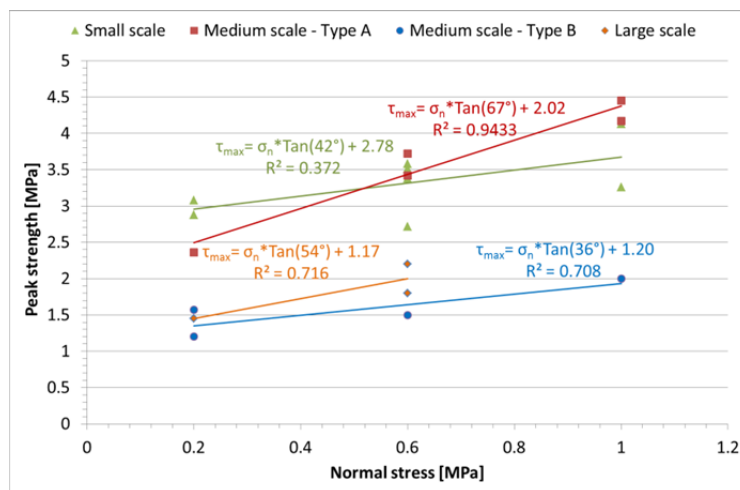


Fig. 8
Synthèse des résistances de cisaillement au pic
Synthesis of peak shear strengths

L'analyse effectuée dans le travail de thèse [11,13] met en évidence que le changement de comportement observé à l'échelle intermédiaire est directement lié à la morphologie du contact béton-rocher :

- Les échantillons de type A (plus résistants) ont une longueur d'onde dominante dont l'ordre de grandeur est la taille de l'échantillon.

- Les échantillons de type B (moins résistants) comportent une longueur d'onde dominante entre le tiers et le demi de la taille de l'échantillon.

Cette particularité a pu être expliquée par la modélisation numérique et est liée à une compétition dans le mécanisme de rupture entre la résistance à la traction du contact béton-rocher et sa résistance au cisaillement. En effet dans le cas des échantillons de type B, l'inclinaison plus importante de certaines zones de contact (liée à une longueur d'onde plus petite) conduit localement à une sollicitation plus importante en traction jusqu'à rupture. Ce phénomène réduit la surface de contact cohésive et donc la résistance au cisaillement de l'échantillon.

3. PROPOSITIONS DE METHODOLOGIES POUR LA CARACTERISATION DES PROPRIETES DE RESISTANCE

3.1. CARACTERISATION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION DE L'INTERFACE

La méthodologie proposée s'appuie sur la réalisation de sondages traversant l'interface barrage-fondation avec imagerie de paroi géoréférencée ainsi que sur la base de donnée présentée au §.2.1 et plus particulièrement sur les valeurs caractéristiques présentées dans le tableau Tab. 1.

L'approche proposée consiste dans un premier temps à analyser l'interface barrage-fondation à l'aide de l'imagerie de paroi géoréférencée :

- Analyse structurale de la partie rocheuse de l'interface¹ par un géologue. Cette analyse permet d'évaluer la résistance à la traction de cette zone. Si l'imagerie de paroi géoréférencée montre des fractures liées à la décompression, par exemple par effets arrière de tirs, ou si la stratification du massif rocheux est horizontale, la valeur de résistance à la traction de l'interface est alors considérée comme nulle.
- Analyse de la qualité du béton au-dessus du contact par un spécialiste génie civil. Cette analyse permet d'évaluer la résistance à la traction de cette zone.
- Analyse statistique de la qualité des contacts béton-rocher. Les contacts sont alors classés dans 3 catégories : « collé », « sale », « déstructuré », auxquelles sont associées des valeurs caractéristiques de résistance à la traction sur la base du tableau Tab. 1. Une valeur statistique à l'échelle d'un plot est alors estimée. Cette valeur d'ensemble est abattue d'un coefficient 2, couvrant les incertitudes liées à l'absence de forages (essentiellement pour des raisons technico-économiques) dans certains secteurs de l'interface. La valeur finale

1 L'interface béton-rocher comprend le contact béton-rocher mais également la base du barrage béton (sur un mètre environ) et la partie supérieure de la fondation rocheuse (également sur un mètre environ).

ainsi estimée englobe les éventuels décollements béton-rocher liés aux sollicitations passées connues par l'ouvrage, puisque la méthode se base sur la qualité actuelle du contact (imagerie de paroi).

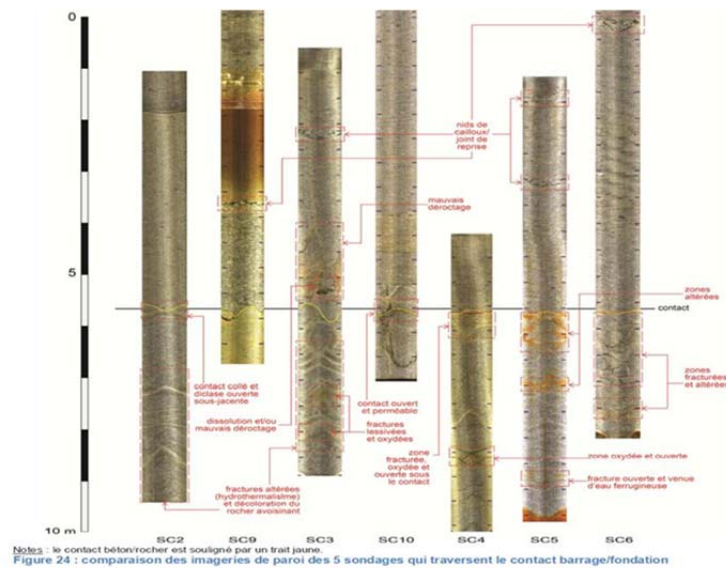


Fig. 9

Exemple d'imageries de paroi avec une fissuration dans la fondation superficielle
Example of borehole imaging with jointing in rocky mass

Pour illustrer cette méthodologie, prenons le cas d'un barrage-poids fondé sur un rocher granitique ne présentant pas de stratification ou de fractures horizontales et avec un béton de bonne qualité. Si l'analyse de l'imagerie de paroi permet d'identifier 40% de contacts propres et collés, 30% de contacts montrant une pellicule de boue et 30% de contacts déstructurés, alors la valeur de résistance à la traction peut être calculée à partir du tableau Tab. 1. Cette valeur est ensuite abaissée d'un coefficient 2.

$$\sigma_t = (0.4 \cdot 0.52 + 0.3 \cdot 0.15 + 0.3 \cdot 0) / 2 = 0.13 \text{ MPa}$$

3.2. CARACTERISATION DE LA VARIABILITE SPATIALE DE LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES JOINTS ROCHEUX

3.2.1. Cadre des travaux de R&D conduit par IRSTEA, l'université de Sherbrooke, Hydro-Québec et l'université Clermont Auvergne

Pour caractériser la résistance au cisaillement (τ_p) en un point donné d'une discontinuité, le modèle de Barton et Choubey (équation 1) - faisant intervenir l'angle de frottement résiduel ϕ_r , la résistance à la compression du joint JCS (*joint compressive strength*), la rugosité du joint JRC (*joint roughness coefficient*) et la

contrainte normale σ_n - est utilisé en ingénierie des fondations des barrages [1,3] :

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left(\phi_r + JRC * \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (1)$$

Nos travaux ont visé à caractériser la résistance au cisaillement pour une famille de discontinuités en intégrant la variabilité spatiale. Dans un premier temps, nous proposons une méthodologie expérimentale alternative pour la détermination des paramètres du modèle de Barton et Choubey, qui permet d'obtenir à faible coût, en appliquant le modèle de Barton et Choubey, la résistance au cisaillement d'une discontinuité en un point donné [6]. Ensuite, nous étudions la variabilité spatiale de la résistance au cisaillement d'une famille de discontinuités et nous l'intégrons dans une analyse de stabilité [7]. L'étude est réalisée dans le cadre de la caractérisation du comportement en cisaillement des fondations rocheuses d'un barrage poids en béton, haut de 40 m et situé au Québec.

3.2.2. Etude expérimentale de la résistance au cisaillement des discontinuités rocheuses des fondations

Pour la détermination du paramètre JCS , l'équipement utilisé est un scléromètre à béton de type N/D, avec une énergie d'impact de 2,2 Nm. La procédure expérimentale est décrite par les méthodes suggérées de l'ISRM [4]. Pour pouvoir utiliser l'équation 2, les valeurs au rebond issues du marteau de type N - R_N - sont converties en R_L à l'aide de la relation proposée par l'ISRM [4] :

$$R_{N/D} = 1.0646 R_{L/D} + 6.3673 \quad (2)$$

Les résultats sont donnés dans le tableau 2. La comparaison du JCS moyen des joints non altérés et de la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse ($UCS = 187$ MPa) montre que le marteau de Schmidt peut surestimer la résistance à la compression simple de 10%. L'altération a induit une chute moyenne de la résistance initiale des aspérités de 47% et entraîne une dispersion significative du JCS des joints altérés (CV égal à 37%). La dispersion du JCS des joints altérés traduit la présence de différents degrés d'altération des joints.

	Nombre d'échantillons	JCS _{moy}	JCS _{min}	JCS _{max}	CV (%)
Joints non altérés	15	205	174	216	6
Joints altérés	10	107	43	180	37

Tab. 2

Résultats des essais JCS obtenus au marteau de Schmidt
Results of JCS tests obtained with Schmidt hammer

Pour la détermination de l'angle de frottement résiduel - ϕ_r -, un bâti de cisaillement portatif a été utilisé pour réaliser les essais de cisaillement direct à contrainte normale constante sur des joints lisses afin de déterminer l'angle de frottement de base d'un joint lisse et non altéré ϕ_b . L'équipement peut être utilisé aussi bien en chantier qu'en laboratoire. Lors de l'essai, les charges normales et tangentielles sont contrôlées par l'opérateur (guide CANMET). L'angle de frottement résiduel ϕ_r est déduit de l'angle de frottement de base ϕ_b par la relation empirique suivante [1] faisant intervenir la valeur au rebond d'une surface non altérée R et d'une surface altérée r :

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 * \frac{r}{R} \quad (3)$$

A partir des essais de cisaillement sur joints lisses, nous déterminons une moyenne de ϕ_b de 33° et un coefficient de variation de 6%. Les joints altérés sont caractérisés par un paramètre ϕ_r de moyenne 28 et un coefficient de variation de 12%. Les propriétés de friction des aspérités de joints altérés ϕ_r sont en moyenne 18% moins élevées que celles des aspérités des joints non altérés ϕ_b .

	Nombre d'essais	Moyenne	Min	Max	Coefficient de variation (%)
ϕ_b	19	33	28	35	6
ϕ_r	10	28	22	31	12

Tab. 3

Résultat des essais ϕ_r et ϕ_b obtenus avec le bâti portatif
Result of the ϕ_r and ϕ_b tests obtained with the portable shear box

Pour la détermination du paramètre *JRC*, nous utilisons la numérisation de surface pour évaluer la rugosité à l'échelle des échantillons de laboratoire et à partir du paramètre Z_2 , qui est assimilable à la notion de pente moyenne des aspérités d'un profil [8]. L'équipement de numérisation est un profilomètre laser. La relation de corrélation entre *JRC* et Z_2 varie en fonction de la résolution utilisée pendant la numérisation de la surface. Celle présentée dans cet article est obtenue avec une résolution de 0,5 mm[8] :

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log(Z_2) \quad (4)$$

L'ensemble des joints, dont le profil de surface a été numérisés avant cisaillement peuvent être classés en trois groupes de rugosités différentes. Les valeurs du *JRC* sont consignées dans le Tableau 4.

	Nombre de joints	JRC	
		moyenne	Coefficient de variation %
- échantillons rugueux	13	11	12%
- échantillons de rugosité intermédiaire	12	8	18%
- échantillons de faible	10	4	29%

Résultat des JRC déduits par profilométrie laser
Result of JRC deduced by laser scan

Notre étude compare les résultats obtenus par le modèle de Barton et Choubey appliqué à partir de cette méthodologie expérimentale, aux résultats obtenus par des essais de cisaillement direct. Les essais ont été réalisés avec une machine de cisaillement, développée par l'université de Sherbrooke, asservie et montée sur un bâti rigide. Cet appareil de cisaillement est installé dans le cadre rigide d'une presse MTS d'une capacité de 2700 kN. Ces essais de cisaillement sont réalisés sur des échantillons de joints naturels issus d'une fondation rocheuse d'un barrage-poids. La gamme de contrainte normales appliquées lors des essais est comprise entre 0,15 MPa à 2 MPa, couvrant ainsi la gamme de contraintes régnant à l'interface barrage-fondation d'un barrage poids de hauteurs diverses.

Au total, 35 essais de cisaillement direct sur 21 échantillons de joints ont été réalisés. Sur les courbes expérimentales issues des essais de cisaillement, le paramètre extrait est la résistance au cisaillement maximale. Elle correspond à la résistance au pic pour les surfaces rugueuses et à la résistance asymptotique dans le cas des surfaces à faible rugosité dont les courbes de cisaillement ne présentent pas de pic de résistance. Les résistances de cisaillement maximales (τ_{\max}) en fonction des contraintes normales (σ_n) associées sont représentées dans le plan de Mohr à la figure suivante. Les valeurs d'angle de frottement $\phi_{\text{total}} = [\arctan(\tau_{\max} / \sigma_n)]$ varient entre 30 et 67° et ont une moyenne de 44° et un CV de 22%.

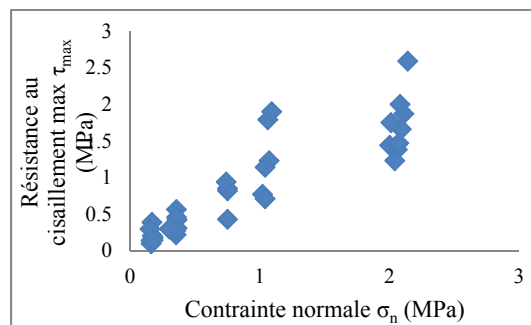


Fig. 10

Résistance de cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale
Maximum shear strength as a function of normal stress

L'analyse globale comparée d'un échantillon de 35 couples de valeurs, d'une part estimées par le modèle de Barton et Choubey et d'autre part mesurées directement par essai de cisaillement direct, incluant des joints de différentes rugosités, de différents degrés d'altération et cisailés à des contraintes normales différentes, est résumée sur la figure 11. Qualitativement,

les points ont tendance à s'aligner autour de la bissectrice et cela traduit une estimation satisfaisante de la résistance au cisaillement des joints. Quantitativement, l'analyse statistique montre un coefficient de corrélation de 0,93 indiquant une forte corrélation entre les mesures et les estimations.

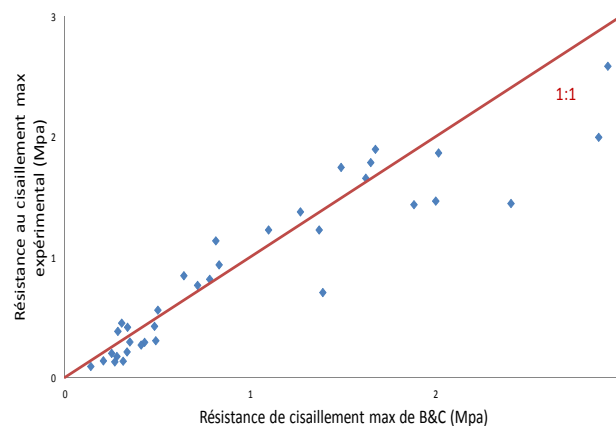


Fig. 11

Corrélation des résistances au cisaillement max entre Barton et Choubey VS résultats des essais de cisaillement direct
Maximum shear strengths between Barton and Choubey VS direct shear tests results

Nous pouvons conclure que le protocole expérimental proposé pour déterminer les paramètres d'entrée du modèle de Barton et Choubey permet d'estimer des valeurs moyennes satisfaisantes d'angle de frottement total. Le lecteur intéressé trouvera une analyse détaillée des facteurs d'influence dans la publication [6].

3.2.3. Analyse de la variabilité spatiale de la résistance au cisaillement des discontinuités des fondations rocheuses

La démarche adoptée pour l'analyse de la variabilité spatiale de la résistance au cisaillement d'une famille de discontinuités comporte la modélisation des paramètres selon trois étapes [7] :

- les paramètres mesurés (Z_2 , ϕ_b , R et r) à l'échelle des joints intersectés par les forages verticaux réalisés sur le barrage en étude ;
- les paramètres d'entrée du modèle de Barton et Choubey (JRC , ϕ_r et JCS), déterminés à l'aide d'un modèle empirique, à l'échelle des joints intersectés par les forages ;
- les paramètres d'entrée du modèle de Barton et Choubey intégrés à l'échelle concernée par l'état-limite (échelle de l'ouvrage).

En notant $Z_i(x)$ les paramètres mesurés à l'échelle des joints intersectés par un forage ($Z_2(x)$, $\phi_b(x)$, $R(x)$ et $r(x)$), où x correspond à la position verticale

dans le forage, nous formulons ces variables régionalisées $Z_i(x)$ comme la somme de variables indépendantes (équation 4) [5] : une tendance déterministe en fonction de la localisation spatiale $t_{z_i}(x)$, une variable régionalisée sans biais de fluctuation autour de la tendance $w_{z_i}(x)$ et d'une variable aléatoire d'erreur de mesure sans biais e_{z_i} [5]. Cela exprime que la variabilité des propriétés des matériaux dans un massif rocheux peut être expliquée par des phénomènes physiques connus, comme par exemple, une amélioration des propriétés mécaniques avec la profondeur. Pour déterminer les paramètres d'entrée du modèle de Barton et Choubey à l'échelle des joints intersectés par le forage ($JRC(x)$, $JCS(x)$ et $\phi_r(x)$), nous utilisons les modèles empiriques de la littérature [1, 2, 9] faisant intervenir les paramètres mesurés $Z_i(x)$ et sans considérer de biais liés au modèle.

$$Z_i(x) = t_{z_i}(x) + w_{z_i}(x) + e_{z_i} \quad (5)$$

La figure 12 présente les résultats des paramètres mesurés en fonction de la profondeur x sous l'interface barrage-fondation. Les données disponibles pour les valeurs au rebond des joints altérés $r(x)$ permettent de constater une tendance à l'augmentation en fonction de la profondeur jusqu'à une profondeur où la valeur au rebond des joints altérés se rapproche de la valeur moyenne constatée pour les joints non-altérés R . Pour les autres paramètres, nous n'identifions pas de tendance nette et il est donc raisonnable d'adopter une valeur constante égale à la moyenne pour la tendance déterministe $t_{z_i}(x)$.

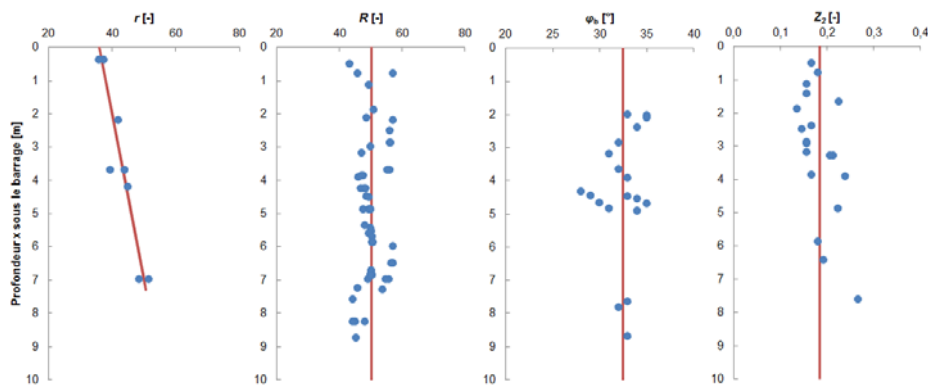


Fig. 12

Paramètres mesurés en fonction de la profondeur sous l'interface
Parameters measured as a function of the depth under the interface

Dans un mécanisme de rupture qui concerne des volumes, des surfaces ou des longueurs, le paramètre géotechnique réellement mobilisé est celui qui est intégré respectivement sur tout le volume, la surface ou la longueur relative à l'état-limite de rupture. Nous notons $Z_L(L)$ les paramètres d'entrée du modèle de Barton et Choubey intégrés à l'échelle concernée par l'état-limite (échelle de l'ouvrage) sur une longueur L du forage : $\{JRC_L(L); JCS_L(L); \phi_{r_L}(L)\}$. Nous proposons de conduire une analyse géostatistique pour obtenir le coefficient de

réduction de variance des différents paramètres d'entrée du modèle de Barton et Choubey à l'échelle concernée par l'état-limite.

$$Z_L(L) = \frac{1}{L} \int_0^L Z_{di}(x) \cdot dx \quad (6)$$

La figure 13 présente les variogrammes obtenus pour les paramètres mesurés. En abscisse, h représente la distance entre deux mesures. En ordonnée, $\gamma(h)$ représente la demi-moyenne du carré des écarts entre les couples des mesures séparées d'une distance h .

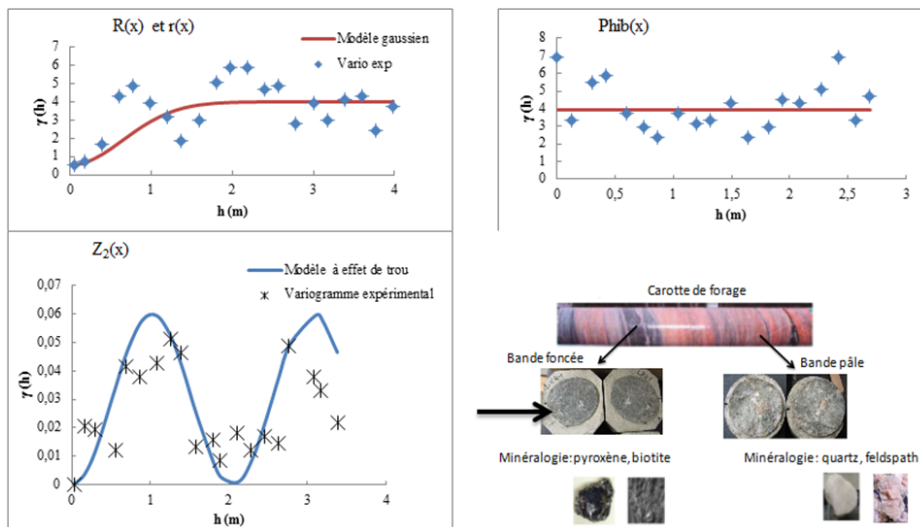


Fig. 13
Variogrammes obtenus pour les paramètres mesurés
Variograms obtained for the measured parameters

Nous présentons à la figure 14 les résultats obtenus pour l'analyse de réduction de variance, exprimée sous la forme d'écart-type de manière à conserver la même unité de la variable d'intérêt [7] :

- le premier terme correspond à la dispersion des valeurs sans prise en compte de la variabilité spatiale ;
- le deuxième terme correspond à la dispersion de la fluctuation des valeurs autour de la tendance déterministe en fonction de la profondeur (x) ;
- le troisième terme est obtenu en affectant le deuxième terme par le coefficient de réduction de variance évalué sur toute la profondeur L .

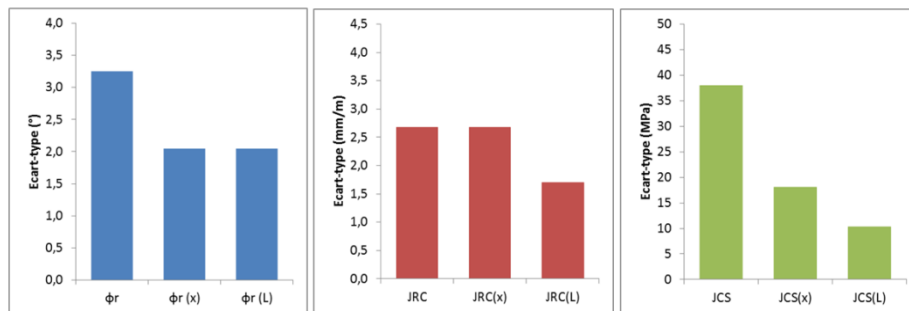


Fig. 14

Réduction de l'écart-type des paramètres de Barton et Choubey
Reduction of the standard deviation of Barton and Choubey parameters

Pour l'analyse de la stabilité, nous utilisons le géomodeleur Phase2© basé sur la méthode des éléments finis [7]. Il estime une probabilité de défaillance à partir d'une évaluation de la moyenne et de l'écart type du coefficient de sécurité obtenu par la méthode de réduction des paramètres. Cela permet d'illustrer l'impact de la prise en compte de la réduction de variance sur l'estimation de la probabilité de défaillance. Le barrage est considéré avec une retenue à son niveau normal d'exploitation et un diagramme triangulaire de sous-pressions. Dans cette application, nous avons considéré comme variable aléatoire les paramètres de résistance au cisaillement selon deux cas : avec et sans prise en compte de la réduction de variance. La figure 15 illustre le résultat d'une simulation des discontinuités du massif rocheux et les déplacements obtenus sur la section barrage-poids de l'ouvrage. La probabilité de défaillance évaluée sans réduction de variance est de 2×10^{-6} [7]. Pour cette étude, la prise en compte de la réduction de variance conduit à réduire de plusieurs ordres de grandeur la probabilité de défaillance obtenue ($< 10^{-8}$), valeur qui est toutefois à nuancer compte tenu des hypothèses et simplifications adoptées.

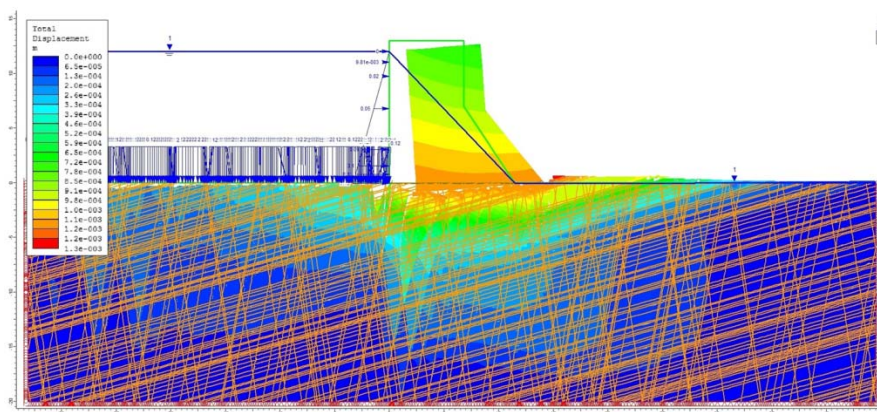


Fig. 15

Exemple d'une simulation des discontinuités du massif rocheux et du champ de déplacements obtenus du modèle aux éléments finis
Example of a simulation of the discontinuities of the rock mass and the field of displacements obtained from the model to the finite elements

4. PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT

4.1. EFFET D'ECHELLE DE LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DU CONTACT BETON-ROCHER

Par analogie avec un joint rocheux, la résistance au cisaillement au contact béton-rocher est fonction de la résistance à petite échelle et de la géométrie du contact.

Lorsque ce contact est très fortement cohésif (correspondant à un nettoyage très soigné du fond de fouille avant le coulage du béton), les données expérimentales présentées au § 2.2 fournissent la matière à une modélisation de la rupture et à l'établissement de lois de comportement. Ces lois sont nécessairement différentes de celles des joints rocheux qui, par définition, ne sont pas collés.

Les constructeurs de barrages cherchent intuitivement à générer un contact irrégulier. Selon la nature géologique de la fondation et le contexte du chantier, l'enveloppe dominante et l'amplitude de ces irrégularités peuvent être très variables et en aucun cas analogue aux rugosités d'un joint rocheux. Imager fidèlement les irrégularités avec une résolution demi-métrique de ce contact à l'échelle d'un plot semble possible à partir de méthodes sismiques. EDF a mené des expérimentations sur deux barrages français, afin de tester différentes méthodes et différent matériel (sources impulsionnelles et vibratoires, en ondes de compression et en ondes de cisaillement, capteurs de type géophone ou hydrophone. L'approche la plus prometteuse semble de faire une analogie entre le parement du barrage et l'axe d'un forage dévié afin de mettre en œuvre la méthode sismique du domaine pétrolier dite : Profil Sismique Vertical (PSV), en ondes de cisaillement.



Fig. 16

Mesures réalisées : à gauche géophones sur parement aval, au centre hydrophones sur parement amont et à droite sources sismiques
Experimentations on site: geophones (left), hydrophones (center), seismic energetic sources in the crest of the dam (right)

La figure 17 présente les résultats pour le barrage de Vassivière, obtenus avec l'appui de l'IFP-Energies Nouvelles (Jean-Luc Mari). L'image sismique du pseudo-PSV en onde S fait sur le barrage de Vassivière montre dans l'intervalle 32-35 m que l'on peut observer un réflecteur net, plutôt plan, ce qui est cohérent avec un des profils du fond de fouille. L'image en onde S semble donc intéressante, bien que le rapport signal sur bruit implique de rester prudent dans l'interprétation des résultats. A ce stade, fort des connaissances acquises, les perspectives sont de confirmer par simulation numérique qu'un pseudo-PSV en ondes S permet bien d'atteindre l'objectif, voire si nécessaire de faire évoluer la géométrie d'acquisition vers un « Walkaway » qui est un ensemble de PSV déportés dont le résultat est une section sismique en couverture multiple, ce qui de fait améliore le rapport signal sur bruit.

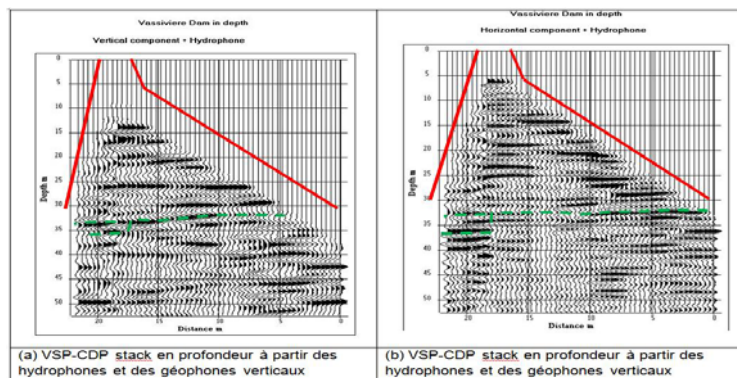


Fig. 17

Synthèse des PSV, analyse en ondes S sur les deux composantes
Seismic Vertical Profiles results, after processing: vertical component (left),
horizontal component (right)

4.2. CARACTERISATION DE LA COHESION APPARENTE

La stabilité des barrages poids fondés sur rocher est fortement influencée par la présence joints dans le massif rocheux. Ces joints, sensibles au cisaillement sont l'objet d'études et de soins particuliers lors de la mise en œuvre de l'ouvrage (études construction, suivi). La cohésion joue un rôle important dans la résistance au cisaillement des joints et les pratiques internationales considèrent cette cohésion de manière différente. Il est ainsi défini deux types de cohésion : la cohésion réelle lorsque les épontes sont cimentées et la cohésion apparente qui s'applique à une interface ouverte et qui est issue de la linéarisation de la courbe contraintes normale-tangentielle par une droite ne passant pas par l'origine.

La cohésion apparente dépend fortement des facteurs influant la résistance au cisaillement de l'interface. Irstea, l'université de Sherbrooke, Hydro-Québec et

l'université de Clermont-Auvergne ont lancé un programme de recherche visant à caractériser le rôle de la rugosité des épontes de l'interface dans la caractérisation de la résistance au cisaillement pour des ouvrages types barrages poids. Il s'agira d'évaluer les paramètres explicatifs de la cohésion apparente : la rugosité, la résistance mécanique de la roche, la contrainte normale de confinement, l'imbrication des épontes, l'angle de frottement de la roche, l'effet de l'eau. Un programme expérimental comportant plusieurs essais de cisaillement direct sera mis en place et permettra d'apprécier quantitativement le rôle des différents paramètres explicatifs de la cohésion apparente. Cette recherche comporte également l'étude de l'effet d'échelle sur le concept de cohésion apparente, et s'appuiera sur des expérimentations à différentes échelles pour vérifier l'approche théorique. Enfin, l'étude expérimentale permettra de définir la loi de frottement calée sur les résultats expérimentaux et de caler le modèle élasto-plastique, avec critère de rupture de type Mohr-Coulomb incluant la cohésion apparente. Sur ces bases, la thèse développera d'un modèle mécanique numérique par la méthode des éléments finis.

REFERENCES

- [1] Barton N.R., & Choubey V. (1977) *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mech Rock Eng., 10 (1-2), 1-54.
- [2] Deere, D. U. and R. P. Miller (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. Report AFWL-TR-65-116. Air Force Weapons Laboratory (WLDC). Kirtland Air Force Base. New Mexico 87117.
- [3] ICOLD (1993). *Rock Foundations For Dams -Fondations rocheuses de barrages*, 88, 241pp.
- [4] ISRM (1978). *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int J Mech Min Sci & Geomech Abstr,15, 319-368.
- [5] Phoon, K. K. and F. H. Kulhawy (1999). *Characterization of geotechnical variability*. Canadian Geotechnical Journal, vol.36, n°4, p.612-624, 1999.
- [6] Sow D., Rivard P., Peyras L., Breul P., Moradian Z.A., Bacconnet C., Ballivy G. (2015), *Comparison of Joint Shearing Resistance Obtained with the Barton and Choubey Criterion and with Direct Shear Tests*. Rock Mechanics Rock Engineering. DOI: 10.1007/s00603-015-0898-4
- [7] Sow, D., Carvajal, C., Breul, P., Peyras, L., Rivard, P., Bacconnet, C. & Ballivy, G. (2017). *Modeling the spatial variability of the shear strength of discontinuities of rock masses: application to a dam rock mass*. Engineering Geology. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.01.023
- [8] Tse R., Cruden D.M. (1979). *Estimating joint roughness coefficients*. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts., Vol.16, n°5 (1979), pp. 303-307.
- [9] CFBR (2012). *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids*.
- [10] EPRI (1992). *Uplift Pressures, Shear Strengths, and Tensile Strengths for*

Stability Analysis of Concrete Gravity Dams.

- [11] Mouzannar H. (2016). *Caractérisation de la résistance au cisaillement et comportement des interfaces entre béton et fondation rocheuse des structures hydrauliques*. Thèse de doctorat de l'université de Lyon.
- [12] Coubard G., Devèze G. (2016). *Stability of concrete and masonry gravity dams. Determination of mechanical properties: Creation of a database on The tensile strength of the concrete-to-rock interface*. HYDRO 2016, Achievements, Opportunities and challenges, Montreux, Switzerland.
- [13] Mouzannar H., Bost M., Leroux M., Virely D. *Experimental study of the shear strength of bonded concrete-rock interfaces: surface morphology and scale effect*. Rock mechanics and rock engineering. DOI 10.1007/s00603-017-1259-2

RESUME

La détermination des caractéristiques mécaniques régissant la stabilité d'un barrage existant peut s'avérer complexe notamment en ce qui concerne les discontinuités présentes en fondation et à l'interface barrage-fondation. Ces caractéristiques sont la résistance à la traction, la cohésion et l'angle de frottement. Fort de ce constat, IRSTEA et EDF ont lancé des travaux de recherche ces dernières années de manière d'une part à créer des données utiles à la compréhension des mécanismes de rupture et d'autre part à proposer des méthodologies d'estimation des caractéristiques mécaniques utilisables directement par l'ingénierie.

Le présent article donne les principaux résultats des essais de traction et de cisaillement sur des interfaces béton-rocher. Ces résultats pourraient faire l'objet d'échange et de partage avec les ingénieries intéressées par le sujet. L'article présente également des méthodologies de détermination des caractéristiques de discontinuités rocheuses en cisaillement ainsi que des caractéristiques de résistance à la traction de l'interface béton-rocher. Des perspectives sont proposées quant à de futures actions de recherche prometteuses telles que la caractérisation de la cohésion apparente des discontinuités rocheuses et l'estimation de la géométrie du contact barrage-fondation par des méthodes non-destructives.

SUMMARY

The determination of the mechanical properties governing the stability of an existing dam is complex, in particular because of the discontinuities present in the foundation and the interface between the dam and the foundation. These properties are the tensile strength, the cohesion and the angle of friction. IRSTEA and EDF have initiated research in order to produce data useful for

understanding the failure mechanisms and to propose methodologies to assess mechanical properties in engineering context.

This article gives the main results of the tensile and shear tests on concrete-rock interfaces. These results could be exchanged and shared with the engineers interested in the subject. The article also presents methodologies for determining the characteristics of rock discontinuities in shear and thus the tensile strength characteristics of the concrete-rock interface. Perspectives are proposed such as the characterization of the apparent cohesion of rock discontinuities and the estimation of the geometry of the dam-foundation contact by non-destructive methods

MOTS-CLÉS / KEYWORDS

barrage, fondation rocheuse, discontinuités, résistance au cisaillement, résistance à la traction, base de données, variabilité spatiale
Dam, rock foundation, discontinuities, shear strength, tensile strength, database, spatial variability