
Etude expérimentale pour l'évaluation de la résistance au cisaillement de joints cohésifs rugueux de granite-béton

Bassel El Merabi¹, Matthieu Briffaut², Frédéric Dufour³

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, 3SR, F-38000 Grenoble, France, bassel.elmerabi@3sr-grenoble.fr

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, 3SR, F-38000 Grenoble, France, matthieu.briffaut@3sr-grenoble.fr

³ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, 3SR, F-38000 Grenoble, France,
Titulaire de la chaire PERENITI (EDF SEPTEN/DTG/CIH)-Institut polytechnique de Grenoble (Grenoble INP)-
France, frederic.dufour@3sr-grenoble.fr

RÉSUMÉ. Le comportement en cisaillement des joints cohésifs de béton-roche est un facteur clé dans la détermination de la résistance au cisaillement des fondations de barrages poids en béton. Bien que plusieurs études aient été réalisées sur des contacts frottants de béton-roche, il subsiste encore une incertitude quant à la résistance au cisaillement des interfaces liées ou adhésives. L'influence de différentes échelles de rugosité est alors étudiée par la réalisation de plusieurs campagnes expérimentales sur des contacts naturels et artificiels à plusieurs niveaux de contrainte normale. Dans le but de lier la résistance au cisaillement à la géométrie des joints par le biais des paramètres statistiques de la rugosité, la surface des joints était scannée par un profilomètre laser. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de corrélation directe entre les paramètres statistiques proposés dans la littérature et la résistance au cisaillement des joints cohésifs. Une analyse supplémentaire est alors envisagée pour la proposition d'un nouveau paramètre de rugosité.

ABSTRACT. The shear strength of the rock-concrete interface has a major influence on the sliding stability of concrete gravity dams founded on rock. While several studies have been carried out on frictional concrete-rock contacts, there remains an uncertainty regarding the shear behavior of adhesive interfaces. The influence of different scales of roughness is investigated by carrying out a series of experimental campaigns on natural and artificial contacts at different levels of normal stresses. In order to link the joint's shear resistance to its morphological parameters, the joint's surface was scanned by a laser profilometer prior to the shear tests. The results show that there is no direct correlation between the statistical parameters proposed in the literature and the shear strength of the cohesive joints. A further analysis is to be carried out for the proposal of a new roughness parameter.

MOTS-CLÉS : Barrage poids, Interface béton-roche, Rugosité, Stabilité, Joints adhésifs, Contrainte normale

KEYWORDS: Gravity dams, Concrete-rock interface, Roughness, Sliding stability, Adhesive bonds, Normal stress

*Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

1. Introduction

La résistance au cisaillement de l'interface béton-roche est un facteur clé dans l'évaluation de la stabilité contre le glissement des barrages poids en béton fondés sur un massif rocheux. En effet, plusieurs études ont montré que la rugosité de l'interface [YAN 00, GU 03] ainsi que la cohésion [OOI 87, MOR 10] contribuent à la résistance au cisaillement. Cependant, la plupart des recommandations pour la conception des barrages [NVE 02, EPR 92] proposent des valeurs conventionnelles pour les paramètres mécaniques de l'interface selon le type de la fondation rocheuse ce qui conduit à une construction conservatrice liée à la non prise en compte de l'effet de la géométrie de l'interface et de l'adhérence initiale entre les surfaces du joint. Les facteurs principaux qui influencent la résistance au cisaillement des joints comprennent la rugosité, l'adhérence initiale, la contrainte normale, la vitesse de cisaillement et la différence de résistance entre la roche et le béton. La contribution de la rugosité (académique et naturelle) à la résistance au cisaillement des joints rocheux a été largement étudiée dans la littérature principalement sur des répliques en mortier. Pourtant, la cohésion s'avère comme un des paramètres déterminants dans cette résistance au cisaillement et reste peu étudiée à cause de la grande variabilité des résultats des essais expérimentaux [SAI 05]. Dans ce travail, on étudie les caractéristiques de cisaillement des interfaces cohésives de béton-roche dans le but de lier la résistance au cisaillement à la rugosité des joints. Une série d'essais de cisaillement sont réalisés à contrainte normale constante (CNC) et la charge normale appliquée dans les essais est comprise dans la gamme habituelle de contraintes normales agissant sur les fondations de barrages poids en béton à moyenne hauteur (10 à 60m). La surface des joints est scannée par un profilomètre laser dans le but de quantifier la géométrie des joints par le calcul des paramètres statistiques de la rugosité.

Les essais en laboratoire sur des joints naturels, y compris la préparation des échantillons, les conditions expérimentales et la quantification de la rugosité de surface, sont présentés.

2. Essais de cisaillement en laboratoire des joints béton-roche

2.1. Préparation des échantillons et programme d'essais

La roche choisie est le granite comme étant représentatif des fondations des barrages poids en France. La formulation du béton a été adoptée sur la base d'une étude réalisée sur les bétons des barrages existants (Tableau 1). Les blocs de granite sont découpés aux dimensions de $9 \times 9 \text{ cm}^2$ et la surface du granite est nettoyée à l'eau avant le coulage du béton pour permettre une adhérence initiale entre les surfaces du joint. L'hydratation du béton se poursuit pendant une durée de 28 jours avant la réalisation des essais. Dans le but de reproduire les conditions in-situ d'une fondation de barrage, des essais à contrainte normale constante (CNC) sont réalisés. Le niveau de chargement normal est choisi en se basant sur les valeurs habituelles à laquelle une fondation de barrage est soumise ($\sigma_n = 0.5, 1$ et 1.5 MPa).

Tableau 1 – Formulation du béton.

Constituant	Quantité (Kg/m3)
Ciment CEM I 52.5R	280
Sable 0/4 mm	650
Sable lavé 0/2 mm	150
Granulat 11.2/22.4 mm	780
Granulat 4/11 mm	330
Adjuvant OPT-203	2.8
Eau	157

La préparation des essais de cisaillement sur joints naturels comprend plusieurs étapes. La surface des blocs naturels de granite est tout d'abord nettoyée à l'eau pour l'élimination de tout matériau de remplissage. Ensuite, un scan est réalisé par un profilomètre laser pour la détermination des caractéristiques de rugosité, et les blocs sont orientés tel que leurs plans moyens soient horizontaux et confondus avec le plan de cisaillement imposé par la boîte de cisaillement direct. A partir d'un ensemble de N profils de rugosité extraits de la surface des joints naturels, des valeurs moyennes des paramètres de rugosité sont calculées pour la quantification de leur morphologie (Eq.1). Un total de 14 blocs naturels ont été cisailés.

$$\begin{aligned}
 \text{Amplitude} : R_t &= \max(Z_i) - \min(Z_i), \\
 \text{Longueur d'onde} : \lambda &= \text{Analyse par transformation de Fourier}, \\
 \text{Inclinaison moyenne} : \theta_{2D}^+ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Arctan}((Z_{i+1} - Z_i)/\Delta x).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

où $i = 1, \dots, N$ et $N = \text{Nombre de profils parallèles}$.

2.2. Résultats

Pour les essais réalisés à $\sigma_n=0.5$ MPa on remarque que, le bloc de plus faible résistance (bloc 1) a des valeurs faibles pour deux des trois paramètres de rugosité (l'amplitude R_t et l'inclinaison moyenne θ_{2D}^+ , Tableau 2). Le bloc avec la résistance la plus élevée (bloc 4) possède des valeurs importantes pour les trois paramètres de rugosité. Pour les essais réalisés à la contrainte normale $\sigma_n=1$ MPa on remarque que, les blocs de plus faibles résistances au cisaillement (blocs 5 et 6) ont deux de leurs paramètres de faibles valeurs. Le bloc 9 de plus grande résistance au cisaillement, a une forte rugosité selon les trois paramètres statistiques. Cependant, en comparant les blocs 7 et 8, on observe que le bloc 7 est plus rugueux selon les paramètres de rugosité, alors que sa résistance au cisaillement est inférieure à celle du bloc 8. Les distributions des paramètres d'amplitude R_t et d'inclinaison moyenne θ_{2D}^+ pour ces deux blocs (Figure 2) montrent qu'une valeur moyenne de ces paramètres n'est pas toujours suffisante pour la quantification de la rugosité (Paramètre R_t du bloc 7). Les résultats des essais à la contrainte normale de 1.5 MPa montrent que quatre blocs ont des valeurs au pic voisines (de l'ordre de 3.1 MPa) et seul le bloc 14 présente une résistance plus importante de l'ordre de 3.4 MPa. Cela peut être dû à une longueur d'onde plus importante calculée sur ce bloc ($\lambda=85\text{mm}$) par rapport à celles calculées sur les quatre premiers ($\lambda=66\text{mm}$).

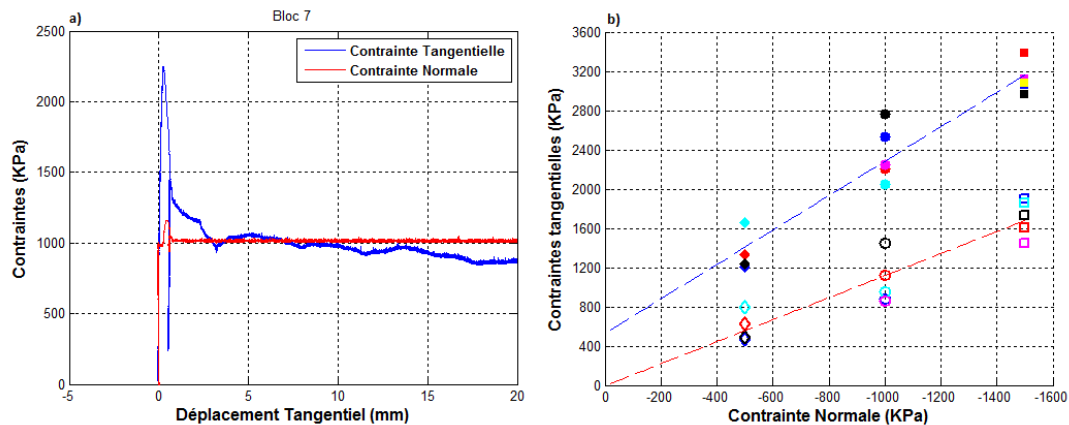


Figure 1 – a) Courbe $(\tau-\delta_t)$ type pour un essai de cisaillement sur joint naturel, b) Diagramme Mohr-Coulomb pour l'ensemble des essais réalisés (Courbe bleue : valeurs au pic, Courbe rouge : valeurs résiduelles).

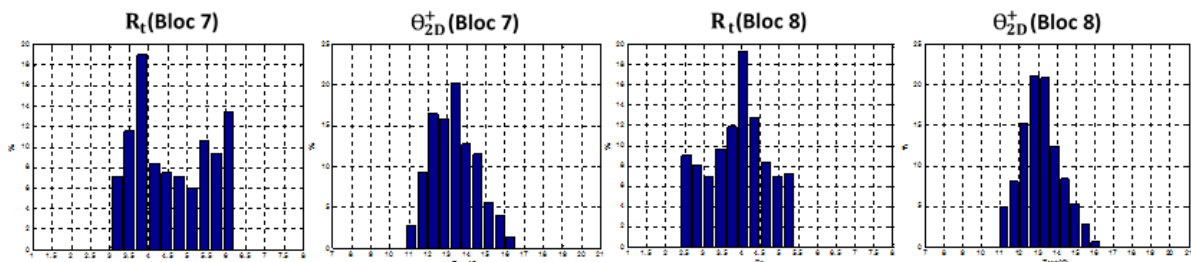


Figure 2 – Distributions des paramètres d'amplitude R_t et d'inclinaison moyenne θ_{2D}^+ pour les blocs 7 et 8 calculées à partir d'un ensemble de profils linéaires extraits de la surface des joints.

Tableau 2 – Valeurs des résistances au cisaillement τ_{pic} et des paramètres de rugosité (calculés dans la direction du cisaillement) pour les blocs naturels cisailés à différentes contraintes normales.

Bloc	τ_{pic} (MPa)	σ_n (MPa)	λ (mm)	θ_{2D}^+	R_t (mm)
1	1.18	0.5	69.6	10.57	3.71
2	1.24	0.5	33.4	14.82	5.07
3	1.33	0.5	69.9	14.96	3.93
4	1.66	0.5	61.0	14.11	4.69
5	2.05	1	55.3	12.9	3.48
6	2.20	1	72.2	10.0	3.49
7	2.25	1	66.7	13.3	4.62
8	2.54	1	60.0	13.2	3.90
9	2.77	1	70.2	13.3	4.44
10	2.96	1.5	67.8	14.66	5.24
11	3.06	1.5	65.6	14.85	4.97
12	3.08	1.5	65.7	13.37	3.69
13	3.13	1.5	65.3	15.87	4.99
14	3.38	1.5	85.4	11.12	3.35

3. Conclusions

Dans ce travail, des essais de cisaillement direct ont été effectués à contrainte normale constante sur des joints béton-roche avec géométries naturelles afin de lier la rugosité des interfaces à la résistance au cisaillement. Les résultats des essais montrent un pic prononcé de contrainte tangentielle pour les trois niveaux de contrainte normale appliquée. Les paramètres d'amplitude, d'inclinaison moyenne et de longueur d'onde sont des paramètres corrélés à la résistance au cisaillement. Cependant, un seul paramètre n'est pas suffisant pour la prédiction de la résistance au pic. En outre, la variabilité des paramètres selon les profils de rugosité est un facteur important à considérer. Ainsi une valeur moyenne n'est pas toujours suffisante pour la représentation de la rugosité 2D des joints. Une étude statistique plus poussée est alors nécessaire pour la proposition d'un paramètre de rugosité capable de prédire la résistance au pic des joints naturels.

4. Bibliographie

- [EPR 92] EPRI, (*Electric Power Research Institute*), *Uplift pressures, shear strengths and tensile strengths for stability analysis of concrete gravity dams*, vol. 1, 1992.
- [GU 03] GU F., SEIDEL J., HABERFIELD C., « Direct Shear Test of Sandstone-Concrete Joints », *International journal of geomechanics*, vol. 3, p. 21-33, 2003.
- [MOR 10] MORADIAN Z., BALLIVY G., RIVARD P., GRAVEL C., ROUSSEAU B., « Evaluating damage during shear tests of rock joints using acoustic emission », *International journal of rock mechanics and mining sciences*, vol. 47, p. 590-598, 2010.
- [NVE 02] NVE, (*Norwegian Water Resources and Energy Directorate*), *Retningslinje for betongdammer*, 2002.
- [OOI 87] OOI L., CARTER J., « Direct shear behaviour of concrete-sandstone interfaces », *Proceeding of the 6th international conference on rock mechanics*, vol. 3, p. 467-470, 1987.
- [SAI 05] SAIANG D., MALMGREN L., NORDLUND E., « Laboratory Tests on Shotcrete-Rock Joints in Direct Shear, Tension and Compression », *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 38, p. 275-297, 2005.
- [YAN 00] YANG Z., CHIANG D., « An experimental study on the progressive shear behavior of rock joints with tooth-shaped asperities », *International journal of rock mechanics and mining sciences*, vol. 37, p. 1247-1259, 2000.