

---

# Evaluation de la cohésion apparente d'une discontinuité rocheuse non liée soumise au cisaillement

RULLIERE<sup>1,2,\*</sup>, NICOLAS<sup>3</sup>, PEYRAS<sup>2</sup>, RIVARD<sup>1</sup>, BREUL<sup>3</sup>, BALLIVY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Sherbrooke, faculté de génie, Sherbrooke, Québec, Canada

<sup>2</sup> IRSTEA Aix, unité RECOVER, Aix-en-Provence, France

<sup>3</sup> Polytech' Clermont-Ferrand, département de génie civil, Clermont-Ferrand, France

\* Auteur correspondant : [adrien.rulliere@Usherbrooke.ca](mailto:adrien.rulliere@Usherbrooke.ca)

---

*RÉSUMÉ. Les barrages-poids en béton sont soumis à plusieurs sollicitations telles que la poussée des eaux, la poussée des glaces et les séismes. Ces forces horizontales peuvent entraîner du cisaillement dans l'ouvrage, le long des trois principaux types de discontinuités qui s'y trouvent ; roc-roc, roc-béton, béton-béton. La résistance au cisaillement de ces interfaces est principalement gouvernée par la rugosité et peut prendre en compte une cohésion apparente. Peu de recherches ont été effectuées sur la cohésion apparente des discontinuités. La plupart des recommandations internationales sur les barrages-poids considèrent de manière prudente toute valeur de cohésion dans la justification des ouvrages. Afin de mettre en évidence l'existence de la cohésion apparente due à la rugosité et l'imbrication des joints, des essais de cisaillement directs seront réalisés lors de cette étude à de faibles contraintes normales. Il apparaît par linéarisation de l'enveloppe de résistance une valeur de cohésion apparente. Cette cohésion apparente, retenue dans un simple modèle de calcul de glissement apporte une nette augmentation du coefficient de sécurité au glissement prouvant ainsi son intérêt pour les gestionnaires de barrages.*

*ABSTRACT. Concrete gravity dams are submitted to several stresses like water pressure, ice pushing or earthquakes. These horizontal forces can lead to shear in the structure along three types of joints: rock-rock, rock-concrete, concrete-concrete. Shear strength of these joints is governed by roughness, capital factor of apparent cohesion. Few researches were conducted on apparent cohesion for rock joints. Most of international standards consider with care a value of cohesion in stability analysis, despite the great influence of this one on sliding stability factor. To prove that apparent cohesion is due to roughness and interlocking of rock joints, shear tests were performed at few levels of normal stress. Results show that by the linearization of shear-normal stress a value of apparent cohesion can be considered. This value, in a stability analysis shows a net increase of sliding safety factor. This explains the high interest of dam's owners.*

*MOTS-CLÉS: Barrage – Cohésion apparente – Discontinuité – Résistance au cisaillement – Roche – Rugosité*

*KEY WORDS: Apparent cohesion – Dam – Joint – Rock – Roughness – Shear strength*

---

## 1. Introduction

Les barrages-poids en béton sont soumis à plusieurs sollicitations telles que la poussée des eaux, la poussée des glaces et les séismes. Ces forces horizontales peuvent entraîner du cisaillement dans l'ouvrage, le long des trois principaux types de discontinuités qui s'y trouvent ; roc-roc, roc-béton, béton-béton. La résistance au cisaillement de ces interfaces est principalement gouvernée par la rugosité et peut prendre en compte une cohésion apparente. De nombreux modèles de comportement au cisaillement des discontinuités rocheuses existent. Parmi les plus classiques, on pourra citer le critère de Mohr-Coulomb, de Patton [1], ou de Barton [2], [3]. Ces modèles théoriques considèrent ou non des valeurs de cohésion dans leur formulation. On distingue deux types de cohésion, la cohésion réelle et la cohésion apparente. La cohésion réelle d'une discontinuité résulte d'un lien physique entre les deux interfaces (par exemple une cimentation) et correspond à la résistance au cisaillement d'une discontinuité sous contrainte normale nulle. La cohésion apparente s'applique à une interface ouverte puisqu'aucune liaison physique ne vient « coller » les deux épontes entre elles. Cette cohésion apparente est obtenue par une extrapolation linéaire de la courbe intrinsèque du matériau selon le modèle de Mohr-Coulomb pour une gamme de contraintes normales données. Physiquement, la cohésion apparente peut s'expliquer par l'imbrication des interfaces rugueuses sous l'application d'une contrainte normale.

En mécanique des roches, la cohésion apparente ( $C_A$ ) dépend des mêmes paramètres influençant le comportement au cisaillement des discontinuités rocheuses. Ouverture de la discontinuité [4], [5], contrainte normale [6], [7], [8], rugosité de l'interface [9], imbrication [10], [11], matériel de remplissage [12], [13], présence d'eau [9] ou encore l'échelle d'étude [14]–[16].

Dans la justification de la résistance au cisaillement des interfaces des ouvrages type barrages, les recommandations internationales [17]–[20] n'encouragent pas à la prise en compte d'un paramètre de cohésion apparente à l'interface roc-béton. Soit par l'application d'importants coefficients de sécurité sur la cohésion apparente, soit par l'interdiction de cette dernière. Ces positions conduisent à un dimensionnement conservateur des ouvrages par la non prise en compte d'un élément de résistance. La raison principale de ces pratiques est liée à la difficulté de caractériser la cohésion apparente d'une interface.

Ce travail conduit à travers une thèse en cotutelle internationale entre l'université de Sherbrooke (Canada), l'université Centre Auvergne et IRSTEA tente de mettre en évidence la présence d'une cohésion apparente dans les joints rocheux à partir d'essais expérimentaux réalisés à faible contrainte normale.

## 2. Protocole expérimental

### ESSAIS

Des essais de cisaillement sous changement normal constant (CNL) ont été réalisés sur la même discontinuité rocheuse. La roche mère est un granite présentant une discontinuité qui nous a permis de réaliser une série de 9 répliques. Le tableau 1 résume les essais ainsi que leur dénomination.

**Tableau 1.** Dénomination des échantillons soumis au cisaillement et contrainte normale associée.

Nom de l'échantillon	E1-1	E1-2	E2-1	E2-2	E3	E4	E5	E6	E7
$\sigma_N$ (MPa)	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7

Lors du test, la contrainte normale est appliquée durant 2 minutes sur l'échantillon afin d'imbriquer les épontes. Le déplacement est alors démarré jusqu'à 10mm à une vitesse de 0.1mm/min.

Les valeurs de contraintes normales sélectionnées correspondent aux valeurs classiques auxquelles sont soumises les fondations d'ouvrages type barrages-poids.

### REPLIQUES

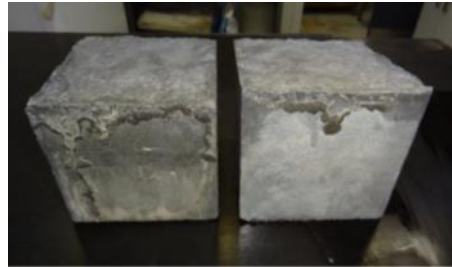
Les échantillons sont réalisés en mortier Sika 212, dont la résistance à la compression à 28 jours est de 56MPa (figure 1). L'ensemble des échantillons a eu un temps de cure d'un mois dans de l'eau. La surface des échantillons est de 140x140mm et possède un JRC de 8, ce qui correspond à une surface moyennement rugueuse.

L'estimation du JRC a pu être réalisée avec l'étude de Tse et Cruden [21] et via un scan de la surface à l'aide d'un profilomètre laser Kréon Zephyr KZ25. L'acquisition des points se fait en classe C5 et le maillage est réalisé avec un pas de 0,5mm.

### APPAREILLAGE

Les essais de cisaillements sont effectués à l'aide d'une presse hydraulique MTS qui permet un cisaillement direct de l'échantillon. La presse, d'une capacité de 3000kN est montée de sorte à être utilisée à charge normale constante (CNL). L'échantillon à cisailier est placé dans deux demi-boîtes, une fixe et l'autre mobile.

Lors des essais, les paramètres enregistrés sont les suivants : temps, déplacement vertical ou normal (ouverture-fermeture du joint), déplacement horizontal (tangential), charge normale et résistance tangentielle.

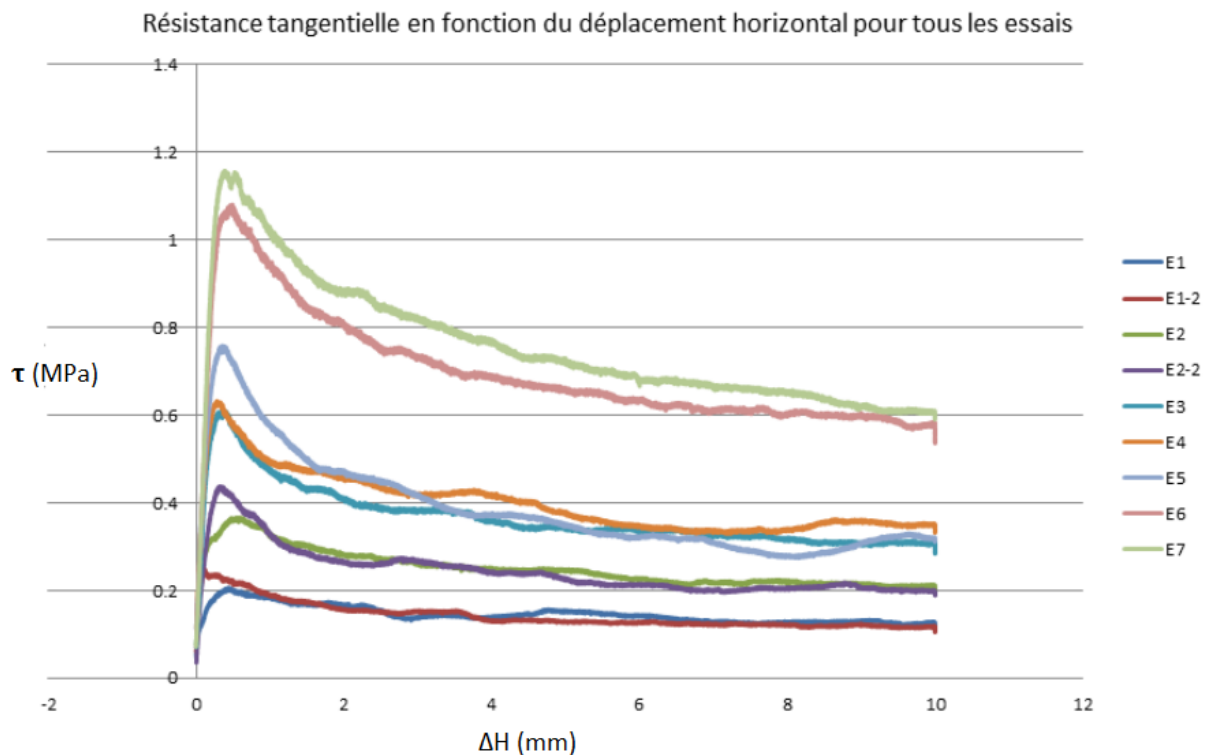


**Figure 1.** Vue des deux épontes constituant un échantillon

## 3. Résultats

### ESSAIS DE CISAILLEMENT

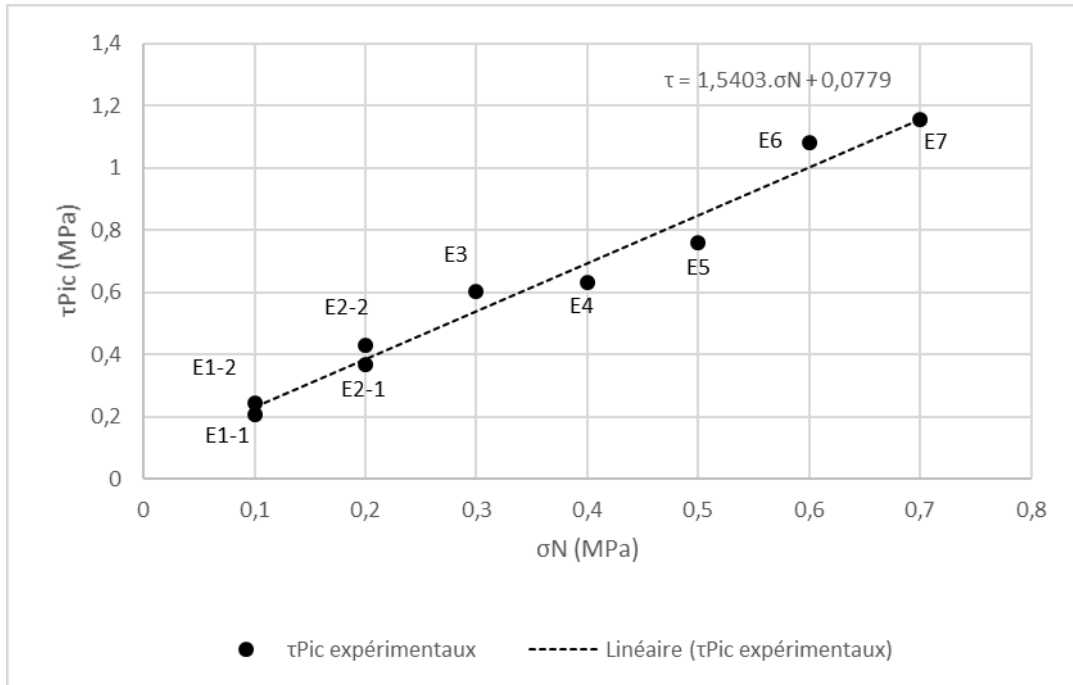
La figure 2 présente les résultats des essais de cisaillement réalisés pour différentes contraintes normales. On remarque l'influence de la contrainte normale sur la résistance au cisaillement de pic. Plus  $\sigma_N$  est important, plus  $\tau_{Pic}$  l'est.



**Figure 2.** Graphique représentant la résistance au cisaillement en fonction du déplacement pour chaque gamme de contraintes normales testée.

## DETERMINATION DE LA COHESION APPARENTE DE LA DISCONTINUITÉ

A l'aide des résultats précédents, il est possible de tracer la droite de résistance au cisaillement des répliques de la discontinuité rocheuse en fonction de la contrainte normale. La figure 3 présente ces résultats.



**Figure 3.** Graphique représentant la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte normale. La linéarisation sur la gamme de contraintes étudiée nous donne les valeurs caractéristiques du joint (cohésion apparente, angle de frottement de pic).

La linéarisation de Mohr-Coulomb associée à ces résultats nous donne un  $\phi_{Pic}$  de  $57^\circ$  et une cohésion apparente de 77,9 kPa. Dans le cas où on force la linéarisation à passer par l'origine, on obtient un angle de frottement de pic de  $60^\circ$ .

### PERTINENCE DE LA COHESION APPARENTE – MODELISATION CADAM

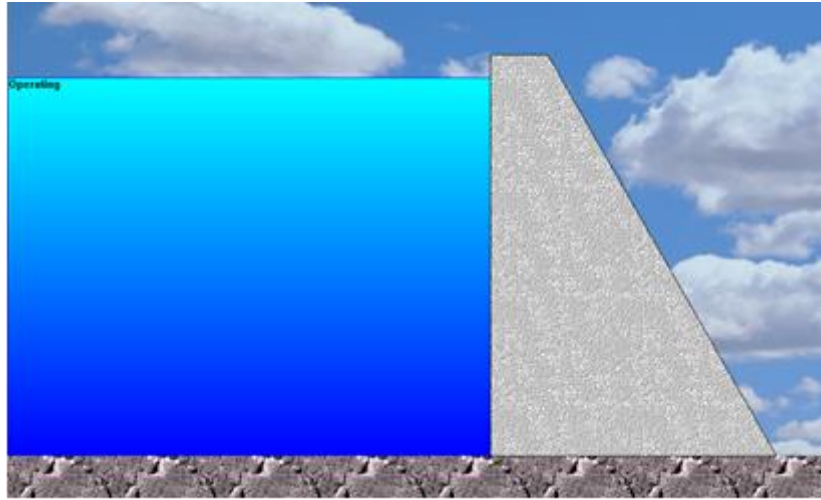
Afin de vérifier l'apport de la cohésion apparente sur le calcul de stabilité d'un barrage-poids, nous avons modélisé un barrage fictif à l'aide du logiciel CADAM. CADAM est un logiciel en accès libre développé par l'École Polytechnique de Montréal. Ce logiciel permet la modélisation de barrages-poids en béton. Au travers des différentes géométries, combinaisons de forces ou méthode d'analyse, le logiciel va calculer les coefficients de sécurité associés, décrivant un des modes de rupture du barrage (ici seul le glissement nous intéresse). La modélisation est simple et s'effectue selon le principe du solide indéformable.

Voici les caractéristiques du barrage modélisé, qui pourra être vu sur la figure 4 :

- Largeur en pied : 55m ;
- largeur en crête : 5m ;
- hauteur de l'ouvrage : 35m ;
- hauteur d'eau : 33m ;
- résistance en compression de la roche de fondation : 300 MPa ;
- résistance en traction du rocher de fondation (massif fracturé) : 0 MPa ;
- $\phi_{Pic}$  : varie selon la prise en compte de la cohésion apparente entre  $57^\circ$  et  $60^\circ$  ;
- $\phi_{Résiduel}$  :  $37,6^\circ$  (obtenue via essais de cisaillement).

Pour le cas où aucune cohésion apparente n'est retenue, l'angle de frottement de la surface est de  $60^\circ$ , ce qui amène un coefficient de sécurité au glissement de 2,7. Dans le cas où on admet une valeur de cohésion apparente de 77,9 kPa et un angle de frottement de  $57^\circ$ , le coefficient est de 3 soit une augmentation de 11%.

Le cas présenté ici est simple et aucun coefficient de correction n'a été apporté aux valeurs expérimentales, cette simulation voulant démontrer le rôle de la cohésion apparente dans la justification d'un ouvrage.



**Figure 4.** Modélisation CADAM d'un barrage fictif.

## DISCUSSION DES RESULTATS

1) Le comportement au cisaillement d'un joint rocheux non lié a été étudié, et on a observé une augmentation de la résistance de cisaillement au pic avec l'augmentation du chargement normal. Selon une relation linéaire de type Mohr-Coulomb mettant en relation la résistance au pic avec la contrainte normale pour un bloc de granite sur des gammes de contraintes normales faibles (100 – 700 kPa une cohésion apparente de 77,9 kPa a été déterminée.

2) Il a été conclu que cette valeur de cohésion apparente appliquée à la modélisation d'un barrage type à l'aide du logiciel CADAM, conduisait à une augmentation du coefficient de sécurité au glissement de 11%.

3) Les tests réalisés dans cette étude ont également mis en évidence les différents paramètres influençant la cohésion apparente. Ces paramètres sont : ouverture du joint, contrainte normale, rugosité, imbrication du joint, présence d'un matériel de remplissage, présence d'eau, échelle. Ces facteurs constituent une perspective d'étude intéressante et font actuellement l'objet d'un travail de recherche.

## 4. Conclusion

L'étude réalisée montre que l'hypothèse de prendre en compte la cohésion apparente dans le dimensionnement d'ouvrages type barrage est fondée. Celle-ci rend compte de l'imbrication du joint et n'est donc pas une pratique imprudente vis-à-vis de la sécurité : elle correspond à une cohésion minimale à laquelle on peut s'attendre dans les conditions les plus défavorables (par exemple lors la cimentation à l'interface roc-béton a été lessivée) dans une gamme de contraintes normales données en fonction d'un ouvrage.

Pour l'application aux barrages, le gain sur notre simulation de près de 11% est considérable à l'heure de la réévaluation des grands barrages.

Une étude approfondie sur l'ensemble des paramètres définissant la cohésion apparente est actuellement menée conjointement entre l'université de Sherbrooke et IRSTEA Aix-en-Provence. L'étude porte sur l'influence de la rugosité, de la résistance ne compression de la roche ainsi que de l'échelle de la discontinuité.

---

## 5. Références

- [1] F. D. Patton, "Multiple Modes of Shear Failure In Rock," in *1st ISRM Congress*, 1966.
- [2] N. Barton, "Review of a new shear-strength criterion for rock joints," *Engineering Geology*, vol. 7, no. 4. pp. 287–332, 1973.
- [3] N. Barton, "Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 249–261, 2013.
- [4] N. Barton and E. F. De Quadros, "Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses," *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, vol. 34, no. 3–4, p. 700, 1997.
- [5] E. Eberhardt, D. Stead, and J. S. Coggan, "Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41, no. 1, pp. 69–87, 2004.
- [6] J. T. Engelder and C. H. Scholz, "The role of asperity indentation and ploughing in rock friction—II: Influence of relative hardness and normal load," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 13, no. 5, pp. 155–163, 1976.
- [7] D. Amitrano and J. Schmittbuhl, "Fracture roughness and gouge distribution of a granite shear band," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 107, no. B12, p. ESE 19-1-ESE 19-16, Dec. 2002.
- [8] A. Nicolas, "Approche préliminaire expérimentale sur la cohésion des joints rocheux et des interfaces béton-rocher", Polytech/Clermont-Ferrand, 2014.
- [9] A. J. Geertsema, "The shear strength of rock joints with special reference to dam foundations," University of Pretoria, 2003.
- [10] J. Zhao, "Joint surface matching and shear strength part A: joint matching coefficient (JMC)," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 34, no. 2, pp. 173–178, Feb. 1997.
- [11] J. Zhao, "Joint surface matching and shear strength part B: JRC-JMC shear strength criterion," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 34, no. 2, pp. 179–185, Feb. 1997.
- [12] B. Indraratna, W. Premadasa, E. T. Brown, A. Gens, and A. Heitor, "Shear strength of rock joints influenced by compacted infill," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 70, pp. 296–307, 2014.
- [13] H. Jahanian and M. H. Sadaghiani, "Experimental Study on the Shear Strength of Sandy Clay Infilled Regular Rough Rock Joints," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 48, no. 3, pp. 907–922, May 2015.
- [14] S. Bandis, A. C. Lumsden, and N. R. Barton, "Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 18, no. 1, pp. 1–21, Feb. 1981.
- [15] T. T.-S. Ueng, Y.-J. Y. Jou, and I.-H. Peng, "Scale Effect on Shear Strength of Computer-Aided-Manufactured Joints," *Journal of GeoEngineering*, vol. 5, no. 2, pp. 29–37, 2010.
- [16] B. S. A. Tatone and G. Grasselli, "An investigation of discontinuity roughness scale dependency using high-resolution surface measurements," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 46, no. 4, pp. 657–681, 2013.
- [17] Indian Standards, "Criteria for design of solid gravity dams," 1985.
- [18] United States department of interior - bureau of reclamation, "Design of small dams," 1987.
- [19] P. H. Nguyen and J. Morin, "Évaluation de la stabilité des barrages-poids en béton," 2003.
- [20] CFBR - Groupe de Travail «Justification and des barrages-poids», "Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids," 2012.
- [21] R. Tse and D. M. Cruden, "Estimating joint roughness coefficients," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 16, no. 5, pp. 303–307, Oct. 1979.