## ETUDE EXPERIMENTALE DES PARAMETRES D'INFLUENCE DE LA COHESION APPARENTE DES DISCONTINUITES DES BARRAGES POIDS

# Experimental study of the apparent cohesion influence parameters in gravity dam foundations joints

## Adrien RULLIERE, Jérôme DURIEZ, Claudio CARVAJAL, Laurent PEYRAS

Irstea, Aix Marseille Univ, RECOVER, 3275 Route de Cézanne 13182 Aix-en-Provence, France adrien.rulliere@usherbrooke.ca ; jerome.duriez@irstea.fr ; claudio.carvajal@irstea.fr ; laurent.peyras@irstea.fr

#### Patrice RIVARD

Université de Sherbrooke, 2500 boulevard de l'université, J1K 2R1, Sherbrooke, QC Canada patrice.rivard@usherbrooke.ca

#### **Pierre BREUL**

Université Clermont-Auvergne, Campus des Cézeaux, 2 avenue Blaise Pascal, 63170 Aubière, France pierre.breul@uca.fr

## **MOTS CLEFS**

Cisaillement direct, cohésion apparente, discontinuité rocheuse, imbrication, rugosité.

## **KEY WORDS**

Apparent cohesion, interlocking, rock joint, roughness, shear test.

## RÉSUMÉ

Pour le dimensionnement de la fondation des barrages-poids face au cisaillement, les guides internationaux suggèrent de considérer le contact roc-béton de fondation comme non lié et d'utiliser le critère de Mohr-Coulomb pour évaluer le facteur de sécurité au glissement de la structure. Les concepteurs peuvent alors utiliser la cohésion apparente dans leur calcul. Cependant, des précautions s'imposent puisqu'aucun consensus n'existe quant aux paramètres d'influence ou la méthode à utiliser pour évaluer la cohésion apparente. Dans cette étude, un protocole expérimental comprenant 116 essais de cisaillement direct sur des répliques de discontinuités rocheuses a été développé afin d'évaluer les effets de la rugosité, de l'endommagement, de l'imbrication, du matériau ou de la contrainte normale sur la cohésion apparente. Les essais furent conduits en conditions CNL (Constant Normal Load) sous des valeurs de contraintes normales analogues à celles observables au contact roc-béton d'un barrage-poids (100-1000 kPa). Les résultats ont montré que plus la discontinuité était rugueuse, plus la cohésion apparente augmentait. L'endommagement d'une discontinuité semble réduire la valeur de cohésion apparente qui lui est associée. L'imbrication joue également un rôle important : pour une discontinuité présentant la même rugosité, un fort écart de cohésion apparente a été obtenu entre une discontinuité parfaitement et correctement imbriquée. Aussi, il semblerait que le matériau constituant les épontes de la discontinuité n'influence que peu la cohésion apparente si l'imbrication n'est pas parfaite. Enfin, une augmentation de l'intervalle de contrainte normale utilisé pour effectuer la régression linéaire de Mohr-Coulomb entraine une augmentation de la cohésion apparente. L'ensemble de ces observations sur la cohésion apparente et ses paramètres d'influence suggèrent que l'usage de la cohésion apparente dans le cadre d'un modèle numérique ou de la justification de la fondation d'un barrage-poids est réaliste.

## ABSTRACT

International guidelines for gravity dam foundation design are suggesting to consider the rock-concrete foundation interface as unbonded and to use the Mohr-Coulomb criterion to assess the structure sliding safety factor. Engineers are invited to use the apparent cohesion with care but no consensus on the determination or on its influence parameters exists. Thus, an experimental study was developed and new insights on the apparent cohesion influence parameters (roughness, damages, interlocking, material mechanical properties, contact type and normal load) were found. 116 direct shear tests were performed under CNL conditions (Constant Normal Load) at normal stresses similar to those found inside a large gravity dam foundation (from 100 to 1000 kPa). Results showed that the higher the roughness, the higher the apparent cohesion values. Also, the previous damage of a joint reduces the apparent cohesion. The degree of interlocking also plays a role on the apparent cohesion. Indeed, for the same roughness, a significant drop of the apparent cohesion was observed between the perfect and well interlocked joints. For the same roughness and interlocking conditions, it appeared that the apparent cohesion is also affected by the joint material mechanical properties. However, the influence of the material on the apparent cohesion is lower than that of the roughness or interlocking. An increase of the normal load also led to an increase of the apparent cohesion. These observations on the apparent cohesion influence parameters suggest that using the apparent cohesion in calculations or in numerical modeling for assessing the shear strength of rock joints may be realistic.

## 1. INTRODUCTION

Le cisaillement est l'un des modes de rupture principaux des barrage-poids. Trois familles de discontinuités, où le cisaillement peut se produire, sont étudiées : les joints de levées liés à la construction du barrage, l'interface roc-béton de fondation et les discontinuités du massif rocheux sur lequel l'ouvrage prend place [1]. Lors de la construction du barrage, les joints de levées, liés à la construction du barrage ainsi que l'interface roc-béton de fondation peuvent présenter une cohésion réelle (adhésion chimique). Avec le vieillissement de l'ouvrage, l'état de cette cohésion réelle est inconnu et les ingénieurs se questionnent sur la pertinence d'utiliser cette valeur pour justifier l'ouvrage [2], [3].

De nombreux modèles théoriques ont ainsi été développés pour déterminer la résistance au cisaillement des discontinuités non liées et les paramètres d'influence. Les critères historiques [4]–[6] illustrent les effets de la rugosité et de la contrainte normale à laquelle la discontinuité est exposée. Cependant, les nombreux travaux en mécanique des roches démontrent que d'autres paramètres influencent également la résistance au cisaillement des discontinuités rocheuses. En lien avec la morphologie de la discontinuité, il s'avère que le degré d'imbrication des épontes joue un rôle important sur le comportement au cisaillement : plus l'imbrication est importante et plus le pic de résistance au cisaillement est élevé [7]–[9]. Egalement, la résistance au cisaillement diminue si la discontinuité inclut un matériau avec de faibles propriétés mécaniques, érodé ou endommagé [5], [10], [11]. Dans le cas d'ouvrages de retenue d'eau tels que les barrages-poids, l'eau et des matériaux argileux peuvent remplir les discontinuités. Or il à été montré que, dans le cas des joints rocheux, la présence d'eau, par un effet lubrifiant [12] ou de sous-pressions [13] et de matériaux dits de remplissage comme les argiles [14] peuvent réduire significativement le pic de résistance au cisaillement. Citons également l'échelle d'observation comme paramètre d'influence mais dont les effets ne font pas consensus au sein de la communauté scientifique [15]–[19].

Cependant, la majorité des paramètres évoqués plus haut restent complexes à évaluer. Ainsi, les principaux guides professionnels de l'industrie des barrages ou de la mécanique des roches préconisent d'utiliser le critère de Mohr-Coulomb sans cohésion pour estimer la résistance au cisaillement d'une discontinuité non liée :  $\tau = \sigma_N \tan(\varphi)$ . L'estimation de l'angle de frottement  $\varphi$  se fait alors à l'aide d'une régression linéaire des résistances au cisaillement expérimentales, pour une gamme de contraintes normales données [1], [20]–[24]. Or, comme l'enveloppe de rupture des discontinuités non liées dans le plan de Mohr ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) est curviligne [4]–[6], réaliser une régression linéaire des données de cisaillement expérimentales fait aussi apparaître la notion de cohésion apparente, l'ordonnée à l'origine de la linéarisation [25]. La cohésion apparente ne décrit pas un lien physique entre les épontes de la discontinuité, mais l'imbrication des épontes autour de la rugosité à fortes contraintes normales [26]. Les différents guides professionnels ou règlements internationaux ouvrent la possibilité à l'utilisation de la cohésion apparente dans le critère de Mohr-Coulomb pour l'estimation de la résistance au cisaillement d'une discontinuité non liée [1], [20], [24], [27]–[29]. Cependant, peu de travaux ont été conduits pour évaluer ce paramètre.

Dans notre étude, un protocole expérimental comprenant 116 essais de cisaillement direct, réalisés sous des contraintes normales analogues à celles observables à l'interface roc-béton de fondation d'un barrage-poids (100-1000 kPa), a été mis en œuvre sur des répliques de discontinuités. L'utilisation de répliques permettant de contrôler et de maintenir constant les paramètres non étudiés d'un essai sur l'autre [30], [31]. Ainsi, 4 rugosités, 2 états d'imbrication, 2 états d'endommagement et 3 matériaux ont été utilisés pour déterminer les rôles de la rugosité, de l'imbrication, de l'endommagement et des propriétés mécaniques des matériaux sur la cohésion apparente. Les discontinuités roc-roc, béton-béton ou roc-béton ont pu être reproduites à l'échelle du laboratoire et les résultats obtenus sont présentés dans cet article. Ces travaux complètent nos recherches sur la caractérisation de la résistance au cisaillement des discontinuités rocheuses [32], [33]

## 2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

## 2.1. Paramètres d'influence étudiés

Dans le cadre de cet article, les effets de différents paramètres sur la valeur de cohésion apparente d'une réplique de discontinuité rocheuse ont été étudiés. Les paramètres sont : la rugosité, l'endommagement, l'imbrication, les propriétés mécaniques du matériau constitutif des épontes de la discontinuité et la contrainte normale.

Le paramètre rugosité a été étudié à l'aide de 5 morphologies de discontinuités différentes. 1 discontinuité parfaitement lisse, nommée *Lisse* et 4 discontinuités rugueuses, nommées J1, J2, J3 et J4. L'endommagement a été étudié à travers deux états d'endommagement : lorsque les répliques de discontinuités étaient intactes (0\_endo) et précédemment endommagées (1\_endo). Deux protocoles pour fabriquer les répliques furent utilisés, conduisant à deux états d'imbrication : l'imbrication était alors soit *parfaite* (+) soit *correcte* (-). De plus, 3 recettes de mortiers ont été utilisées pour la création des répliques de discontinuités. Ces trois mortiers ont permis de modéliser le comportement des discontinuités roc-roc, roc-béton et bétonbéton qui peuvent être présentes dans un barrage-poids. Les trois mortiers sont dénommés par la suite comme M1, M2 et M3. Enfin, l'intervalle de contrainte normale sur lequel est évaluée la cohésion apparente a aussi été étudié. Trois intervalles différents, nommés respectivement L1, L2 et L3 ont été utilisés.

La caractérisation de l'ensemble des paramètres (*Lisse*, J1, J2, J3, J4, 0\_endo, 1\_endo, +, -, M1, M2, M3, L1, L2 et L3) est présentée dans la partie 2.4. « Caractérisation des paramètres ».

#### 2.2. Appareillage et traitement des données

Les essais de cisaillement ont été réalisés en conditions CNL (*Constant Normal Load* : Charge Normale Constante) sous 8 valeurs de contraintes normales, analogues aux contraintes normales à laquelle peut être soumise la fondation d'un barragepoids : 100, 200, 350, 600, 800 et 1000 kPa. Les essais sous 100 et 600 kPa ayant été répétés. Les essais sont menés à un taux de cisaillement de 0,1mm/min durant 30 minutes, jusqu'à atteindre un déplacement tangentiel final de 3 mm. Les paramètres suivants sont enregistrés : temps, déplacements relatifs normal et tangentiel, contraintes normale et de cisaillement.

Les valeurs maximales de résistance au cisaillement (tpic) sont déterminées à l'aide des courbes de résistance au cisaillement en fonction du déplacement tangentiel issues des essais. Une fois que les valeurs de tpic sont déterminées pour chaque essai, les courbes de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte normale sont tracées selon le paramètre étudié. Ces dernières courbes serviront alors à évaluer les valeurs de cohésion apparente via des régressions linéaires sur les intervalles de contraintes normales étudiés.

#### 2.3. Fabrication des répliques

Les répliques rugueuses (J1, J2, J3 ou J4) ont pu être fabriquées à l'aide de moulages en silicone. Cette technique per met de fabriquer une série de discontinuités présentant les mêmes caractéristiques mécaniques (matériau constitutif) et morphologiques (rugosité, imbrication).

Ainsi, pour cette étude, quatre affleurements de granite présentant des morphologies différentes et issus de la province géologique des Appalaches canadiennes ont servi de surfaces initiales (dimensions : 90 x 100 mm = 9000 mm<sup>2</sup>). Un gel silicone a été disposé à même les 4 affleurements afin d'obtenir les moules. Une fois les moules en silicone obtenus, 2 méthodes pour fabriquer les répliques ont été mises en œuvre (I et II), conduisant à deux imbrications différentes (Figure 1). Un des protocoles (I) a permis la fabrication de répliques de discontinuités variant une légère ouverture et donc une imbrication correcte (-).

Les répliques lisses ont été obtenues à l'aide d'un bloc de mêmes dimensions que les répliques rugueuses (90 x 100 mm = 9000 mm<sup>2</sup>) mais qui fut coupé avec une scie circulaire puis poli afin d'obtenir une discontinuité parfaitement lisse.

#### 2.4. Caractérisation des paramètres

#### 2.4.1. Rugosité

La rugosité des discontinuités doit être estimée de la manière la plus précise possible. Les surfaces de chacun des affleurements initiaux ont donc été numérisées à l'aide d'un profilomètre sans-contact Kreon Zéphyr© 25. Cet outil est composé d'un bras articulé sur lequel un laser est fixé. Le bras permet la localisation du laser dans le plan x-y quand ce dernier mesure l'élévation z de la surface en cours de numérisation (Figure 2). La résolution (72 µm pour les axes x et y et 16 µm pour les z) permet l'enregistrement de près de 6 millions de points pour chaque surface.

Les fichiers de données sont alors importés dans Matlab afin de procéder à un maillage (d'intervalle 0,5mm sur les x et y). La Figure 3 donne une illustration des affleurements numérisés puis maillés avec Matlab. Un algorithme traite ensuite les données afin de caractériser la rugosité. L'algorithme génère 160 profils, parallèles à la future direction de cisaillement, et estime leur JRC (*Joint Roughness Coefficient*). Enfin, l'algorithme estime le JRC moyen des profils pour obtenir une note globale à l'affleurement, que l'on considèrera décrivant sa rugosité. Le JRC est une note de 0 à 20 développée par Barton & Choubey [5]. Une surface lisse a ainsi un JRC de 0 et une surface très rugueuse un JRC de 20. Nommés J1, J2, J3 et J4, les affleurements présentent des JRC respectifs de 9, 12, 15 et 19 (Figure 3). Du fait du protocole utilisé pour leur fabrication, les répliques de discontinuités présentent donc les mêmes rugosités que les affleurements.



Figure 1 : Protocoles expérimentaux mis en œuvre pour la fabrication des répliques de discontinuités, menant à deux imbrications différentes, nommées « parfait » (+) et « correct » (-).



Figure 2 : Profilomètre laser utilisé pour cette étude.

## 2.4.2. Endommagement

Deux états d'endommagement ont été également étudiés : les échantillons étant soit intacts (0\_endo) soit déjà endommagés (1\_endo). Pour obtenir ces deux états d'endommagement, les répliques ont été soumises à deux essais de cisaillement directs consécutifs sous la même valeur de contrainte normale. Les répliques fraîches venant d'être fabriquées et subissant leur premier essai de cisaillement étaient ainsi classées comme *intactes* (0\_endo).

Après le premier essai de cisaillement, les répliques deviennent alors endommagées (1\_endo). L'installation de cisaillement est démontée, les répliques nettoyées afin de retirer d'éventuels débris liés au premier essai et photographiées. Le second essai de cisaillement a ensuite lieu en ayant pris soin de remettre les répliques dans la même position que l'essai intact, ceci afin d'étudier l'effet de l'endommagement sur la cohésion apparente. La Figure 4 montre deux surfaces de répliques, l'une intacte et l'autre endommagée.

#### 2.4.3. Imbrication

Puisque les deux imbrications (parfaite et correcte) ont été évaluées de manière visuelle et donc subjective, quelques explications sont nécessaires. La discontinuité parfaitement imbriquée (+) propose une fissure tout juste perceptible à l'œil et est considérée dès lors comme fermée (aucune valeur d'ouverture). Au contraire la discontinuité correctement emboitée (-) n'est pas complètement fermée. En effet, comme illustré sur la Figure 5, la discontinuité propose une certaine imbrication mais également une valeur d'ouverture. Pour la discontinuité correctement emboitée (-), le contact entre les deux épontes n'est possible qu'en quelques points seulement. La valeur d'ouverture mesurée est d'environ 0,5 mm.

#### 2.4.4. Matériel constitutif de l'éponte

Les propriétés mécaniques (la résistance à la compression f<sub>c</sub>, le module de Young E, la résistance à la traction f<sub>t</sub> et l'angle de frottement de base  $\varphi_b$ ) des trois mortiers utilisés dans l'étude (M1, M2 et M3) sont répertoriées dans le Tableau 1. M1 est un matériau analogue à un béton conventionnel utilisé dans la construction des barrages-poids tandis que M3 propose des propriétés mécaniques proches de celles d'un massif granitique de fondation de barrage. Les mortiers M1 et M3 ont ainsi permis de simuler les contacts roc-roc et béton-béton (discontinuités *homogènes*, avec le même matériau de part et d'autre de la discontinuité) mais aussi le contact roc-béton de fondation (discontinuité *hétérogène*, avec des matériaux différents de part et d'autre de la discontinuité). M2, le matériau intermédiaire a servi à mesurer les effets de la rugosité et de l'imbrication sur la cohésion appaente. M2 fut uniquement mis en œuvre avec le protocole (I), conduisant à des discontinuités « parfaitement » emboitées tandis que M1 et M3 ont été utilisés avec le protocole (II), pour les discontinuités « correctement » emboitées.

Matériau	f <sub>c</sub> (MPa)	E (GPa)	f <sub>t</sub> (MPa)	φ <sub>b</sub> (°)
M1	27	19	2	29
M2	58	26	4	26
M3	165	40	6	24

Tableau 1 : Propriétés mécaniques des matériaux utilisés.

#### 2.4.5. Contrainte normale

Enfin, le dernier paramètre d'étude est l'intervalle de contrainte normale servant à la linéarisation pour déterminer la cohésion apparente. Trois intervalles d'étude ont été utilisés : L1 [100-600 kPa], L2 [600-1000 kPa] et L3 = L1+L2, soit [100-1000 kPa].

Le Tableau 2 résume l'ensemble du plan expérimental mis en place afin d'évaluer les effets de la rugosité, de l'imbrication, de l'endommagement et du matériau sur la cohésion apparente. 116 essais de cisaillement direct furent ainsi réalisés.

Paramètre d'étude	Mortier utilisé pour fabriquer les répliques	Rugosités	Imbrication	Nombre d'essais
Rugosité	M2	J1, J2, J3 et J4	+	32
Endommagement	M2	J1, J2, J3 et J4	+	32
Imbrication	M2	J3	-	8
Matériau	M1 et M3	J3	-	24
Contrainte normale	M2	J4	+	8

Tableau 2	: Résumé	du plan	expérimental
-----------	----------	---------	--------------



Figure 3 : Visualisation de la morphologie des affleurements utilisés pour fabriquer les moulages en silicone.



Figure 4 : Illustration de l'état d'endommagement pour une même réplique. Avant le premier essai, la réplique est intacte comme sur la photo de gauche (0\_endo). Après l'essai, la réplique est dite endommagée (1\_endo), comme sur la photo de droite.



Figure 5 : Illustration sur le profil central de J3 de la différence entre une discontinuité « parfaitement » emboitée (+) et une discontinuité « correctement » emboitée (-) présentant une ouverture de 0,5 mm.

## 3. RESULTATS

#### 3.1. Effet de la rugosité sur la cohésion apparente

La Figure 6.a. montre les enveloppes de rupture de Mohr-Coulomb au pic, issues des essais de cisaillement directs pour les 4 rugosités étudiées ainsi que pour une surface parfaitement lisse. Ici, les répliques de discontinuités étaient intactes (0\_endo), parfaitement emboîtées (+) et les deux épontes réalisées avec le mortier M2. Les résultats montrent que la cohésion apparente ainsi que l'angle de frottement augmentent avec le JRC (et donc avec la rugosité). Ainsi pour J1, J2, J3 et J4, les valeurs de cohésion apparente obtenues étaient de 92, 129, 252 et 421 kPa et les angles de frottement de 56°, 61°, 60° et 69°. Pour la surface lisse, l'angle de frottement est le  $\phi_B$  (29°) et aucune cohésion apparente n'a pu être observée. Ces résultats indiquent que la cohésion apparente est bien influencée par la rugosité de la discontinuité.

#### 3.2. Endommagement et cohésion apparente

La Figure 6.b. montre quant à elle les enveloppes de ruptures pour les mêmes conditions que précédemment en ce qui concerne la rugosité (Lisse, J1, J2, J3 et J4), l'imbrication (+) et le matériau constitutif des épontes (M2). Seul l'état d'endommagement est différent (1\_endo). Les valeurs de cohésion apparente et d'angle de frottement sont fortement diminuées vis-à-vis du cas intact. En effet, pour J4 par exemple, la cohésion apparente obtenue est de 161 kPa et l'angle de frottement de 60° après endommagement, contre 421 kPa et 69° avant endommagement. On observe la même tendance pour l'ensemble des rugosités étudiées (chute de la cohésion apparente et de l'angle de frottement lorsque les épontes sont endommagées). L'état d'endommagement d'une éponte est donc un des paramètres d'influence de la cohésion apparente.



Figure 6 : Comparaison des enveloppes de rupture de Mohr-Coulomb obtenues pour les 5 rugosités étudiées (lisse, J1, J2, J3 et J4). a. les répliques sont intactes (0\_endo) et b. les répliques sont endommagées (1\_endo).

#### 3.3. Rôle de l'imbrication sur la cohésion apparente

La Figure 7 illustre l'effet de l'imbrication sur la cohésion apparente. Ici, les essais de cisaillement directs ont été réalisés pour les deux imbrications étudiées : parfait (+) et correct (-), dans le cas d'un matériau M2 et d'une rugosité J3. Les résultats montrent un effet important de l'imbrication sur la cohésion apparente. En effet, pour la discontinuité parfaitement emboitée (+), la cohésion apparente obtenue était de 252 kPa contre 133 kPa pour la discontinuité correctement emboitée (-). Pour résumer, meilleure est l'imbrication des épontes de la discontinuité, plus la cohésion apparente augmente.

#### 3.4. Effets du matériau constitutif des répliques et du type de contact sur la cohésion apparente

La Figure 8 montre les enveloppes de rupture pour les répliques de discontinuité avec la même rugosité (J3) la même imbrication (-) mais fabriquées avec des matériaux différents. Les propriétés mécaniques ainsi que le type de contact varient : M1 vs M1, M2 vs M2, M3 vs M3 et M1 vs M3 qui imitent respectivement les contacts béton-béton, roc-roc et roc-béton observables dans un barrage-poids. La cohésion apparente varie de 71 kPa (M1 vs M1) à 133 kPa (M2 vs M2) et l'angle de frottement de 52° (M1 vs M1) à 54° (M2 vs M2).

Quel que soit le type de contact ou le matériau utilisé pour fabriquer les répliques, la variation de cohésion apparente reste limitée vis-à-vis de la large variation des propriétés mécaniques des matériaux. Surtout, les valeurs de cohésion apparentes obtenues sont relativement basses en comparaison des parties précédentes (rugosité et imbrication. Une des explications quant à cette observation pourrait être liée à l'état d'imbrication. Comme observé précédemment, l'imbrication a un effet important sur la valeur de cohésion apparente obtenue. Dans ce cas-ci, l'imbrication utilisée était simplement correcte (-), ce qui a conduit à de faibles valeurs de cohésion apparente. Ainsi, il est possible qu'une éventuelle variation de cohésion apparente liée aux matériaux constituant les répliques ait eu lieu, mais sans pouvoir être observée.



Figure 7 : Enveloppes de rupture de Mohr-Coulomb obtenues pour les répliques parfaitement (+) et correctement (-) imbriquées.



Figure 8 : Enveloppes de rupture de Mohr-Coulomb obtenues selon le type de contact et les matériaux utilisés pour fabriquer les répliques.

#### 3.5. Effet de la contrainte normale sur la cohésion apparente

La Figure 9 montre l'effet de l'intervalle de contrainte normale utilisé pour tracer l'enveloppe de rupture. Seul le cas de J4 avec une imbrication parfaite (+) et un contact homogène (M2 vs M2) est illustré ici. La cohésion apparente et l'angle de frottement obtenus sont de 329 kPa et 71°, 992 kPa et 61° et 421 kPa et 68° pour L1, L2 et L3 respectivement.

La cohésion apparente augmente donc lorsque l'intervalle de contrainte normale considéré pour tracer l'enveloppe de rupture présente de fortes valeurs de contraintes normales. Une hypothèse à ce phénomène pourrait être que, à de fortes contraintes normales, le contact entre les deux épontes de la discontinuité est plus important (il y a plus d'aspérités qui s'opposent au cisaillement). L'imbrication est donc meilleure à de fortes valeurs de contrainte normales, ce qui conduit alors à une augmentation de la cohésion apparente.



Figure 9 : Rôle de l'intervalle de contrainte normale utilisé pour obtenir une valeur de cohésion apparente.

## 4. CONCLUSIONS

Notre étude a proposé un protocole expérimental afin d'évaluer l'effet des différents paramètres d'influence de la cohésion apparente. Dans ce cadre, 116 essais de cisaillement directs furent réalisés sur des répliques de discontinuités rocheuses non liées. A l'issue de ces essais, les effets de la rugosité, de l'endommagement, de l'imbrication, du matériau constitutif des répliques de discontinuités et de la contrainte normale sur la cohésion apparente ont été analysés et les conclusions suivantes sont apparues :

- La rugosité de la discontinuité influence la cohésion apparente. Plus la discontinuité est rugueuse et plus la cohésion apparente augmente ;
- l'endommagement d'une discontinuité a tendance à réduire la valeur de cohésion apparente. Un endommagement pouvant être analysé comme une perte d'imbrication, cela rejoint la conclusion suivante ;
- L'imbrication est un paramètre d'influence important de la cohésion apparente. Lorsque la discontinuité présente une valeur d'ouverture, la cohésion apparente est fortement réduite ;
- Ni le matériau constituant la discontinuité ni le type de contact n'ont semblé avoir d'effets sur la cohésion apparente si l'imbrication est imparfaite ;
- De fortes valeurs de contraintes normales entrainent de fortes valeurs de cohésion apparente. Il semblerait que plus la contrainte normale augmente et plus l'imbrication de la discontinuité soit de qualité.

Cette étude a montré que l'imbrication et la rugosité sont les deux paramètres majeurs influençant la cohésion apparente. Dans le domaine des barrages, ces conclusions sont d'un grand intérêt : la prise en compte d'une valeur de cohésion apparente pour l'estimation de la résistance au cisaillement d'une discontinuité telle l'interface roc-béton d'un barrage-poids pourrait ainsi permettre un dimensionnement plus précis et optimisé de l'ouvrage.

Dans la suite de cette étude, les résultats en découlant seront intégrés dans une modélisation numérique pour évaluer le comportement au cisaillement de l'interface roc-béton d'un cas de barrage existant.

L'étude montre l'intérêt d'effectuer des essais de cisaillement pour évaluer la cohésion apparente des discontinuités des barrages-poids. Les valeurs de cohésion apparente obtenues dans cette étude expérimentale correspondent à des répliques des discontinuités, reconstituées en laboratoire (elles ne peuvent donc pas être réutilisées directement à l'échelle de l'ouvrage sans une analyse critique).

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), Hydro-Québec et IRSTEA Aix-en-Provence pour le financement du projet. Danick Charbonneau et Ghislaine Luc sont également remerciés pour leur aide lors de la partie expérimentale, ainsi que Marco Quirion d'Hydro-Québec pour son implication dans le projet.

### **RÉFÉRENCES ET CITATIONS**

- [1] CFBR, "Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids," 2012.
- [2] A. Krounis, "Sliding stability re- assessment of concrete dams with bonded concrete-rock interfaces," 2016.
- [3] H. Mouzannar, M. Bost, M. Leroux, and D. Virely, "Experimental Study of the Shear Strength of Bonded Concrete Rock Interfaces : Surface Morphology and Scale Effect," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 50, no. 10, pp. 2601–2625, 2017.
- [4] F. D. Patton, "Multiple Modes of Shear Failure In Rock," in *1st ISRM Congress*, 1966.
- [5] N. Barton and V. Choubey, "The shear strength of rock joints in theory and practice," *Rock Mech.*, vol. 10, no. 1–2, pp. 1–54, Dec. 1977.
- [6] G. Grasselli and P. Egger, "Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 40, no. 1, pp. 25–40, Jan. 2003.
- [7] J. Zhao, "Joint surface matching and shear strength part A: joint matching coefficient (JMC)," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 34, no. 2, pp. 173–178, Feb. 1997.
- [8] J. Zhao, "Joint surface matching and shear strength part B: JRC-JMC shear strength criterion," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 34, no. 2, pp. 179–185, Feb. 1997.
- [9] H. K. Singh and A. Basu, "Shear behaviors of 'real' natural un-matching joints of granite with equivalent joint roughness coefficients," *Eng. Geol.*, vol. 211, pp. 120–134, Aug. 2016.
- [10] K. Amiri Hossaini, N. Babanouri, and S. Karimi Nasab, "The influence of asperity deformability on the mechanical behavior of rock joints," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 70, pp. 154–161, Sep. 2014.
- [11] A. Özvan, I. Dinçer, A. Acar, and B. Özvan, "The effects of discontinuity surface roughness on the shear strength of weathered granite joints," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 73, no. 3, pp. 801–813, Aug. 2014.
- [12] M. T. Zandarin, E. Alonso, and S. Olivella, "A constitutive law for rock joints considering the effects of suction and roughness on strength parameters," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 60, pp. 333–344, Jun. 2013.
- [13] E. Hoek, *Practical Rock Engineering: RocScience*. Rocscience http://www.rocscience.com/hoek/ PracticalRockEngineering.asp, 2007.
- [14] R. Lama, "Influence of clay fillings in shear behaviour of joints," in *Int. Conf. Int. Association of Engineering Geology*, 1978, pp. 27–34.
- [15] S. Bandis, A. C. Lumsden, and N. R. Barton, "Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., vol. 18, no. 1, pp. 1–21, Feb. 1981.
- [16] B. S. A. Tatone and G. Grasselli, "An Investigation of Discontinuity Roughness Scale Dependency Using High-Resolution Surface Measurements," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 46, no. 4, pp. 657–681, Jul. 2013.
- [17] F. Johansson, "Influence of scale and matedness on the peak shear strength of fresh, unweathered rock joints," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 82, pp. 36–47, 2016.
- [18] O. Buzzi and D. Casagrande, "A step towards the end of the scale effect conundrum when predicting the shear strength of large in situ discontinuities," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018.
- [19] T. T.-S. Ueng, Y.-J. Y. Jou, and I.-H. Peng, "Scale Effect on Shear Strength of Computer-Aided-Manufactured Joints," J. Geoengin., vol. 5, no. 2, pp. 29–37, 2010.
- [20] Hydro-Québec, "Évaluation de la stabilité des barrages-poids en béton," 2003.
- [21] US Army Corps of Engineers, *Gravity Dam Design*, 1st ed., no. June. Washington: DEPARTMENT OF THE ARMY U.S. Army Corps of Engineers, 1995.
- [22] USBR, Design of small dams, 3rd ed. 1987.
- [23] Federal Energy Regulatory Commission, "Gravity Dams," in Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects, 2016, p. 3.1–3.39.

- [24] ISRM, *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, 2007th–2014th ed. Springer International Publishing, 2014.
- [25] S. R. Hencher and L. R. Richards, "Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 48, no. 3, pp. 883–905, 2015.
- [26] D. Amitrano and J. Schmittbuhl, "Fracture roughness and gouge distribution of a granite shear band," J. Geophys. Res. Solid Earth, vol. 107, no. B12, p. ESE 19-1-ESE 19-16, Dec. 2002.
- [27] EPRI, "Uplift pressures, shear strengths, and tensile strengths for stability analysis of concrete gravity dams," 1992.
- [28] CEA, "Sliding stability of concrete dams," Montreal, 1996.
- [29] G. Ruggeri, "Sliding safety of existing gravity dams Final Report," 2004.
- [30] C.-C. Xia, Z.-C. Tang, W.-M. Xiao, and Y.-L. Song, "New Peak Shear Strength Criterion of Rock Joints Based on Quantified Surface Description," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 47, no. 2, pp. 387–400, Mar. 2014.
- [31] R. Kumar and A. K. Verma, "Anisotropic shear behavior of rock joint replicas," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 90, pp. 62–73, Dec. 2016.
- [32] D. Sow *et al.*, "Modeling the spatial variability of the shear strength of discontinuities of rock masses: Application to a dam rock mass," *Eng. Geol.*, vol. 220, pp. 133–143, 2017.
- [33] D. Sow *et al.*, "Comparison of Joint Shearing Resistance Obtained with the Barton and Choubey Criterion and with Direct Shear Tests," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 49, no. 8, pp. 3357–3361, Aug. 2016.