

REPLIQUES VIRTUELLES DE JOINTS ROCHEUX : SIMULATION PAR ELEMENTS DISCRETS DU COMPORTEMENT EN CISAILLEMENT

VIRTUAL REPLICAS OF ROCK JOINTS: SHEAR BEHAVIOUR USING PARTICLE FLOW CODE

Antoine MARACHE¹, Alberto VARELA VALDEZ¹, Stéphane MOREL¹, Joëlle RISS¹

¹ Université de Bordeaux - UMR 5295 - I2M - Département GCE, Pessac, France

RÉSUMÉ – Le comportement mécanique de joints rocheux dépend de la géométrie des épontes. On propose une méthode d'obtention de surfaces auto affines tenant compte de trois paramètres de rugosité (exposant de rugosité, longueur de corrélation autoaffine et variance des élévations). Ces surfaces sont ensuite adaptées au code par éléments discrets pour simuler des tests de compression, fermeture et cisaillement.

ABSTRACT – The mechanical behavior of jointed rock masses is strongly dependent on the geometric properties of discontinuities. We propose a methodology to generate self-affine surfaces corresponding to different roughness through three parameters (exponent, self-affine correlation length and height variance); next, these surfaces are implemented in discrete element code (DEM), to simulate compression/closure test and shear test.

1. Introduction

La compréhension du comportement mécanique en cisaillement des joints rocheux sous contrainte normale ou rigidité constante a une histoire datant des débuts de la mécanique des roches. L'aptitude à la prédiction des modèles dépend de la possibilité de bien prévoir le déplacement normal (dilatation ou compression) et latéral pour un état de contrainte donné tout en tenant compte de la géométrie des aspérités des épontes, de leur endommagement et de l'évolution de l'aire des surfaces en contact au cours des essais. A cette fin, de nombreuses études ont eu pour objectif de décrire et analyser le rôle joué par la morphologie des épontes sur le comportement des joints. Un problème majeur tenait à ce que, une fois cisailé dans des conditions données, un joint, endommagé, ne pouvait plus être utilisé pour de nouveaux essais ; il ne pouvait y avoir de comparaison d'essais à morphologie des épontes constante. Afin de pallier cette difficulté, de nombreux essais ont été réalisés sur des modèles de joints artificiels 1) à morphologie géométriquement maîtrisée, en dents de scie sur des modèles en plâtre (Ladanyi et Archambault, 1969 ou, plus récemment, Budi *et al.*, 2014) ou sur des modèles toujours en dents de scie taillés dans des grès (grès de Hawkesbury dans Thirukumaran et Indraratna, 2015), 2) sur des répliques en mortier (Flamand, 2000 ; Gentier *et al.* 2000) ou 3) sur des épontes naturelles issues d'une même famille de fracture (Hoang, 2010 ; Gasc *et al.*, 2012). Il est malaisé de citer l'entièreté des essais qui ont été réalisés tant ils sont nombreux et constituent en quelque sorte, chaque fois, des cas particuliers rendant l'écriture de modèles de comportement difficile.

Le travail présenté ici, fait partie d'un tout développé par Varela-Valdez (2015) dans le but de cerner les influences respectives de la rugosité des surfaces des joints, de l'élasticité des épontes, de la rupture des aspérités de surface et du niveau de contrainte de compression sur les comportements en fermeture et en cisaillement des joints rocheux. Dans cette optique, Varela-Valdez (2015) a développé une méthode de réalisation de répliques « virtuelles » d'un même joint rocheux ; ils servent ensuite de moules pour créer les surfaces composées d'éléments discrets qui sont un préalable à l'utilisation d'un code

numérique par éléments discrets DEM (Discrete Element Model, en l'occurrence PFC3D, Itasca C. G. Inc.®).

2. Réalisation des moules

La rugosité des joints est considérée comme auto-affine ; elle est décrite par l'intermédiaire de trois paramètres : exposant de rugosité auto-affine, longueur de corrélation et variance des hauteurs. Sur la base d'un algorithme fondé sur une méthode spectrale, des moules de surfaces auto-affines correspondant à différentes rugosités sont créés.

2.1. Principe de création des surfaces autoaffines

Une surface de fracture est une surface gauche dont les élévations au-dessus d'un plan de référence varient d'un point à l'autre tout en dépendant de la distance entre ces points. L'analyse variographique est une méthode classiquement utilisée pour décrire et synthétiser de telles variations (Gentier *et al.*, 1991, Marache *et al.*, 2002) ; l'outil de base de cette analyse est le variogramme ou la fonction d'autocovariance. Considérant qu'une surface de fracture est assimilable à un processus stochastique stationnaire d'ordre 2 de moyenne nulle et de variance finie, elle peut être analysée, selon que l'on se place dans l'espace réel ou dans l'espace des fréquences, par sa fonction d'autocovariance (ACV) ou par sa transformée de Fourier. L'information contenue dans chacune de ces fonctions est la même.

Le principe repose sur le fait que la suite finie des élévations $z(x, y)$ d'une surface de fracture peut être écrite comme une série de Fourier complexe dont les coefficients s'écrivent à partir de la densité spectrale de puissance (DSP) de l'ACV de $z(x, y)$ et d'une phase aléatoire. Les coefficients de la série de Fourier complexe sont donc conditionnés par la covariance de $z(x, y)$. Par conséquent, une simulation de surface de fracture s'obtient par transformée de Fourier inverse de la série de Fourier conditionnées par les caractéristiques structurales recherchées.

La réalisation des surfaces autoaffines demande donc de se donner 1) une loi pour la DSP, 2) les conditions sur la longueur de corrélation et 3) sur la variance des élévations de la surface.

1) En suivant Makse (1996), on part du principe que la DSP $P(\vec{w})$ d'une surface auto-affine suit une loi de puissance selon l'équation 1 où H est un exposant de rugosité (exposant de Hurst) dépendant de la direction θ dans l'espace de Fourier.

$$P(\vec{w}) \propto \frac{1}{|\vec{w}|^{\beta(\theta)}} \text{ avec } |\vec{w}| = \sqrt{u^2 + v^2},$$

$$\beta(\theta) = 2H(\theta) + 2 \text{ et } \theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{u}{v}\right) \quad (1)$$

$$H(\theta) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\theta}{H_x}\right)^2 + \left(\frac{\sin\theta}{H_y}\right)^2}} \quad (2)$$

$$\chi(\theta) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\theta}{\chi_x}\right)^2 + \left(\frac{\sin\theta}{\chi_y}\right)^2}} \text{ sachant que } \chi = \frac{1}{\delta_c} \quad (3)$$

La DSP prend ses valeurs en chaque point de coordonnées u et v (qui sont des fréquences). $H(\theta)$ est l'exposant de rugosité dans la direction θ et H_x et H_y sont les exposants de rugosité dans deux directions perpendiculaires entre elles dans l'espace réel; si θ est constant la surface créée est isotrope sinon, elle est anisotrope. L'exposant de rugosité est calculé selon l'équation (2). Les valeurs de ces exposants H_x et H_y font partie des conditions imposées pour la simulation des surfaces.

2) L'équation (3) donne l'expression de $\chi(\theta)$ qui est l'équivalent, dans l'espace des fréquences, de la distance de corrélation δ_c dans l'espace réel (δ_c : distance entre deux points à partir de laquelle la corrélation des élévations est nulle, il s'agit de la portée sur un variogramme). La DSP prendra une valeur constante ou celle de l'équation 1 selon que \bar{w} est inférieur ou supérieur à $\chi(\theta)$.

3) La variance, à l'instar de la distance de corrélation et de l'exposant de Hurst, peut être différente d'une direction à l'autre (cas de surfaces anisotropes); elle est prise en compte par l'intermédiaire de son spectre de puissance.

En conclusion, une fois ces contraintes prises en compte, les coefficients complexes peuvent être calculés en considérant le spectre de phase comme aléatoire et distribué sur $[0, 2\pi]$. Puis, leur appliquant la transformée inverse, on obtient les valeurs simulées de $z(x,y)$.

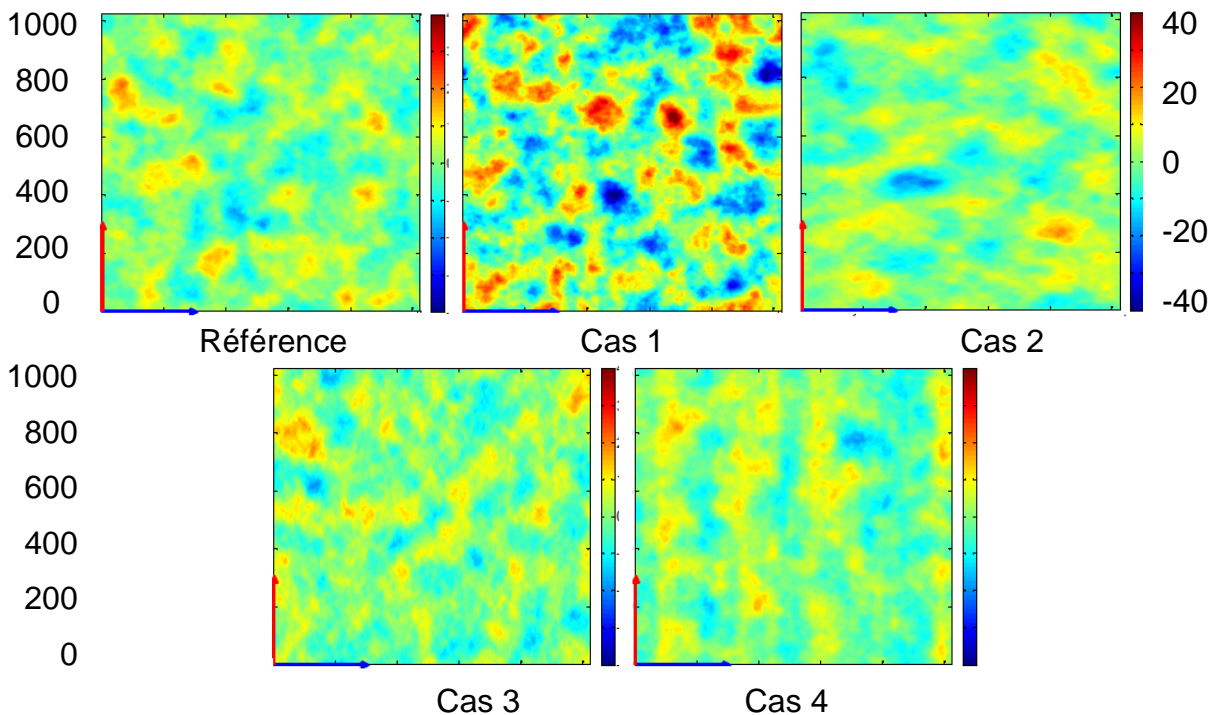


Figure 1. Exemples de surfaces autoaffines (direction x horizontale, y verticale, même échelle). Les paramètres, pour chaque surface sont donnés tableau 1.

2.2. Exemples de surfaces autoaffines

On présente successivement pour comparaison à une surface de référence isotrope plusieurs cas (Tableau 1), la méthode permettant une grande diversité de cas.

Les surfaces ainsi créées peuvent servir de moules pour des essais numériques à l'instar des répliques en mortier utilisée par Flamand (2000) pour des essais en laboratoire. Chacun des paramètres peut être modifié à volonté pour correspondre à un cas réel et permettre ainsi de comparer les comportements mécaniques; de plus, si d'un moule à l'autre, on conserve le spectre de phase, les aspérités restent toujours localisées

aux mêmes endroits (figure 2). Ces moules servent à générer les surfaces (les modèles virtuels) composées d'éléments discrets.

Tableau 1. Paramètres de rugosité de diverses surfaces simulées

	Surface de référence	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
H_x	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
H_y	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
δ_{cx}	10%*	10%	20%	10%	10%
δ_{cy}	10%	10%	10%	10%	10%
σ_x^2	30	120	30	30	20
σ_y^2	30	120	30	30	30
	isotrope	isotrope	anisotrope	anisotrope	anisotrope

*les distances de corrélation sont données en pourcentage de la taille des surfaces

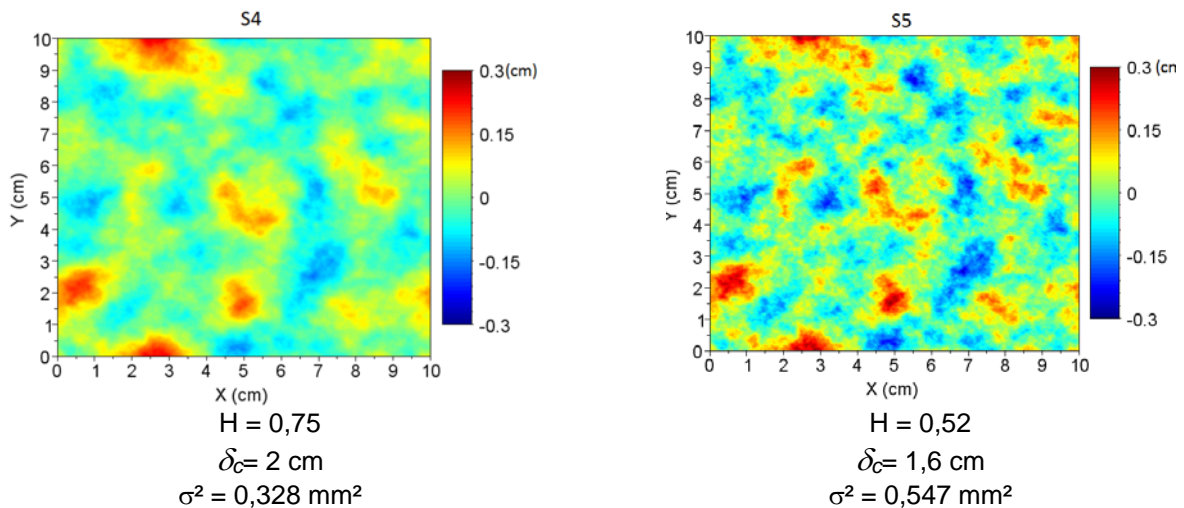


Figure 2. Moules de deux surfaces isotropes pour lesquels les aspérités ont les mêmes positions et dont la rugosité est différente (plus rugueux à droite).

3. Du moule à la surface utilisable dans PFC3D

Un moule représente une surface réelle continue sous une forme discrète, c'est à dire un ensemble d'élévations (z) aux nœuds d'une grille (x, y). Considérant que les simulations d'essais mécaniques sont réalisées sur des échantillons virtuels ayant la forme d'une boîte parallélépipédique, les épontes de la fracture y sont représentées par deux moules parallèles à sa grande face, l'un représentant l'éponte inférieure et l'autre l'éponte supérieure. Le code PFC3D® étant un code à éléments discrets, l'étape préalable aux simulations des essais consiste à remplir chaque demi-boîte de particules sphériques (figure 3) et de s'assurer que l'échantillon ainsi préparé est à l'équilibre. Sans rentrer dans les détails que l'on trouve dans Varela-Valdez (2015), cette opération a pour conséquence que la « rugosité » des surfaces virtuelles n'est plus nécessairement identique à celles du ou des moules dont elles sont issues.

La question qui se pose alors, est de savoir si la rugosité des épontes virtuelles est significativement différente ou non de la rugosité des moules. Varela-Valdez (2015) a établi une méthode pour comparer la rugosité d'une éponte virtuelle à celle du moule, au

terme de laquelle, un critère de sélection des particules participant à la surface virtuelle est établi. A l'issue de cette sélection les surfaces virtuelles présentent la même longueur de corrélation, la même variance des hauteurs mais un exposant de Hurst légèrement diminué. Par comparaison avec les images de la figure 2, les surfaces virtuelles (figure 4) montrent des espaces laissés vides dus à l'empilement des particules sphériques naturellement non compact et à l'élimination de celles qui ne répondent pas au critère.

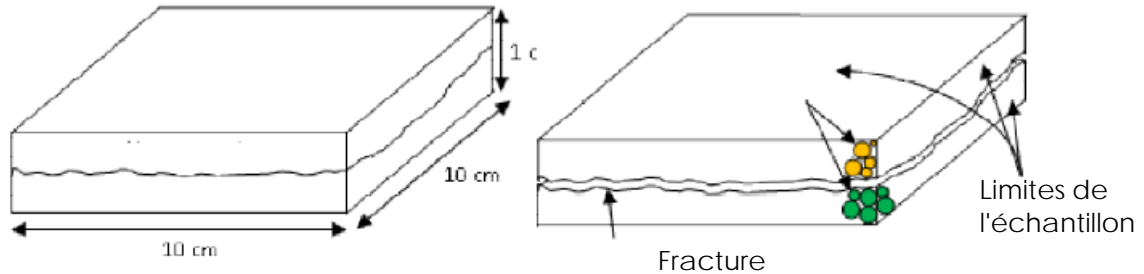


Figure 3. Principe de création des échantillons virtuels

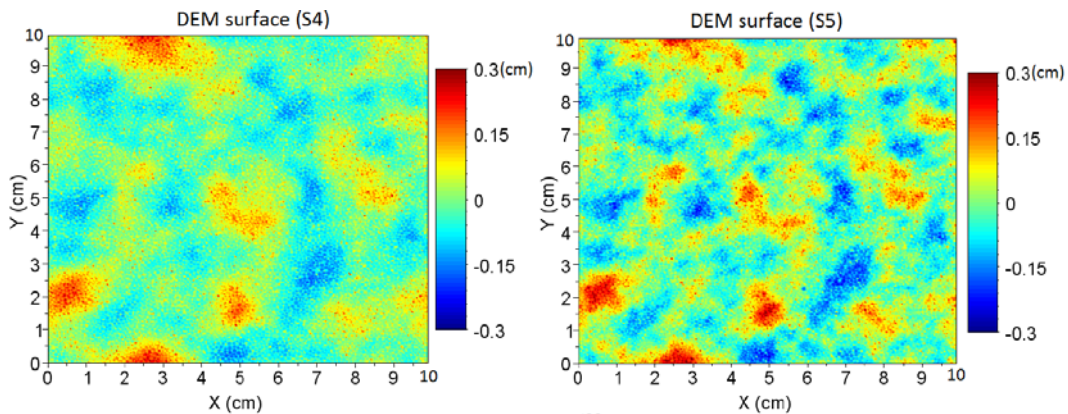


Figure 4. Aspect des surfaces virtuelles présentées figure 2.

4. Comportement mécanique

4.1. Généralités

On cherche à reproduire par simulation par éléments discrets les essais de cisaillement réalisés sur des répliques en mortier par Flamand (2000). Une étape préliminaire consiste à déterminer les caractéristiques géométriques (nombre de particules sphériques) et mécaniques (module d'Young, coefficient de Poisson, etc.) du matériau virtuel constitué d'un empilement de sphères et d'espaces laissés vides entre elles ; cet espace est considéré comme une porosité de nature numérique n'ayant pas de sens physique.

Pour que les calculs puissent être réalisés avec des durées acceptables même pour des cas où il y aurait 100 000 particules (trois ou quatre jours de calcul avec 2 Processeurs Intel Xeon CPU E5-2640 0 @ 2.50 GHz ; RAM de 64.0 Go et- Système d'exploitation Windows Server 2012, 64 bits, processeur x64) le pas de temps critique (inversement proportionnel à la rigidité des contacts entre les sphères) ne doit pas être trop petit et, par suite, le module d'Young du matériau virtuel doit ne pas être trop élevé (PFC3D®, user guide). Ceci conduit à considérer un matériau équivalent au mortier pour le modèle DEM sur la base du critère selon lequel les déformations calculées doivent être égales aux déformations mesurées ; en conséquence de quoi on a l'équation 4 :

$$\frac{\sigma_{DEM}}{E_{REV}} = \frac{\sigma_{exp}}{E_{exp}} \quad (4)$$

Les éléments discrets (particules sphériques) reproduisent le squelette granulaire du mortier tandis que la cohésion assurée par la matrice cimentaire est modélisée par un maillage de poutres entre particules. A la suite d'une série d'essais de mise à l'équilibre d'un échantillon virtuel cubique de 1 cm de côté (volume élémentaire représentatif : VER) une porosité numérique égale à 0,51 pour une distribution gaussienne des rayons (moyenne 5 mm et écart –type 0,1 mm) est considérée comme un bon compromis entre un nombre pas trop élevé de particules (limitant ainsi les temps de calcul) et les contraintes internes dont dépend la stabilité du modèle. Ensuite, les propriétés élastiques du mortier sont obtenues à partir de la calibration des micropropriétés mécaniques du VER. Pour cela, une simulation DEM du comportement élastique du VER (simulation en conditions quasi-statiques) montre un comportement symétrique en tension-compression et donne une estimation du module d'Young, du module de cisaillement et du coefficient de Poisson. Une autre simulation tenant compte d'un critère de rupture elliptique (dépendant de la résistance en tension des liens entre particules) conduit à l'estimation de la résistance à la compression et en tension (tableau 2). Les caractéristiques du matériau virtuel sont données tableau 2.

Tableau 2. Propriétés mécaniques du mortier et du matériau virtuel

	E	ν	Rc	Rt
Mortier (Flamand, 2000)	30 853 MPa	0,187	74,6 MPa	6,6 MPa
Matériau virtuel	48,9 Pa	0,210	0,113 Pa	0,0111 Pa
Matériau équivalent	32 282 MPa	0,210	71,3 MPa	7,0 MPa

4.2. Résultats et exemples

Trois types de modèle mécanique pour le comportement en cisaillement sous deux contraintes normales (14 et 21 MPa) ont été étudiés après vérification du comportement en fermeture : 1) un modèle rigide pour lequel les joints ne se déforment qu'en surface et sans fissuration, 2) un modèle élastique pour lesquels les joints se déforment dans tout leur volume et toujours sans fissuration et enfin 3) un modèle dit « élastique-fracture » pour lesquels le joint se déforme dans tout son volume et, lorsque les contraintes dans les poutres dépassent une contrainte critique (critère de rupture), les liens disparaissent, ce qui est assimilé à la création de fissures.

L'ensemble des résultats, en utilisant huit surfaces virtuelles décrites dans le tableau 3 porte globalement, pour chaque modèle mécanique, sur les essais de fermeture en compression simple, les essais de cisaillement direct sous contrainte normale constante, l'analyse des zones en contact d'une éponte à l'autre, l'endommagement des joints et une analyse énergétique. Il n'est pas possible de tout présenter dans le cadre de cet article, aussi on ne présente que les courbes de cisaillement et de dilatance dans le cas du modèle « élastique-fracture » (figure 5) pour les contraintes normales de 14 et 21 MPa.

La figure 5 montre que les réponses aux essais numériques sont, tant pour la contrainte de cisaillement que pour la dilatance en fonction du déplacement, dépendantes de la contrainte normale appliquée et de la rugosité. L'ensemble des courbes se situe entre celles de l'échantillon aux épontes les plus rugueuses (S5) et celles de l'échantillon S4 aux épontes les moins rugueuses (cf. figures 2 et 4).

Tableau 3. Caractéristiques des moules utilisés pour créer huit types de surfaces virtuelles.

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
$H_x = H_y$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,52	0,52	0,52	0,52
$\delta_{CX} = \delta_{CY} \text{ mm}$	16	16	20	20	16	16	20	20
$\sigma_x^2 = \sigma_y^2 \text{ mm}^2$	0,547	0,328	0,547	0,328	0,547	0,328	0,547	0,328

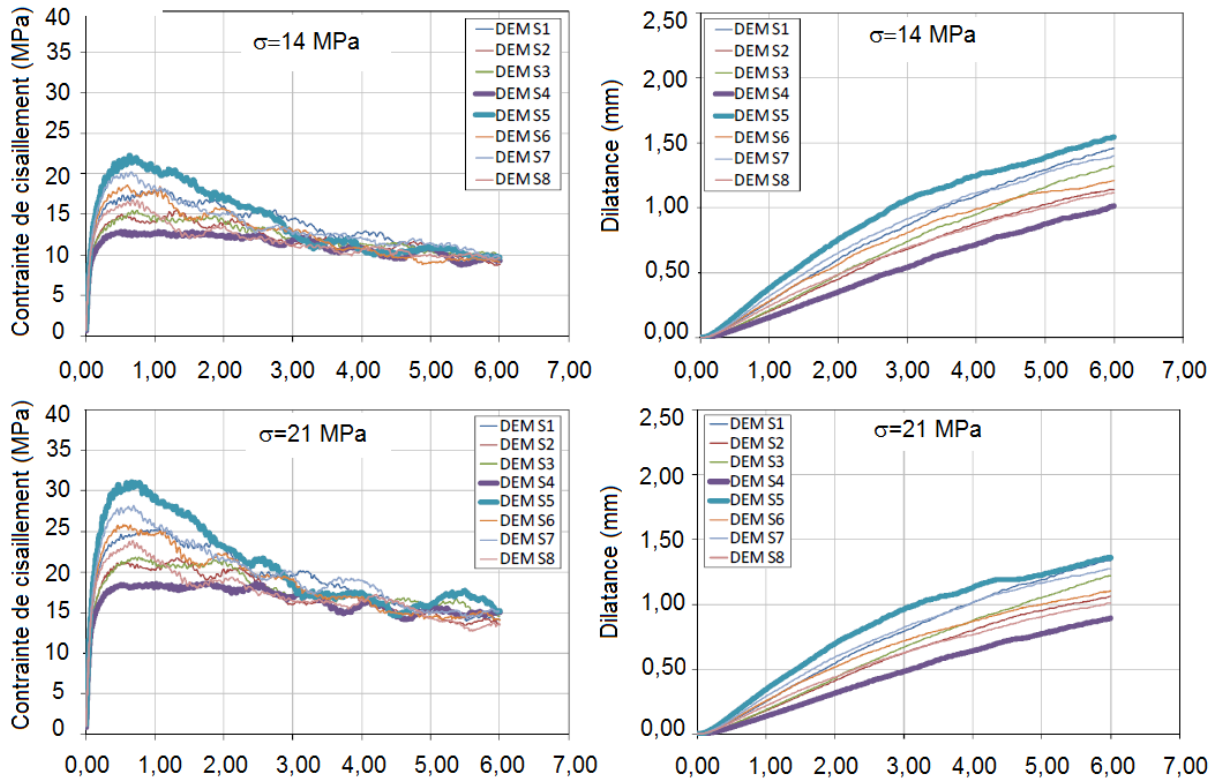


Figure 5. Résultats des simulations pour 14 et 21 MPa (cas élastique-fracture)

Plus la contrainte normale est élevée, plus la contrainte au pic est élevée et plus la rugosité est élevée plus la contrainte au pic est élevée. Des huit moules à partir desquels, les surfaces virtuelles ont été créées, l'échantillon virtuel issu du moule S1 présente des caractéristiques proches de celles des échantillons en mortier utilisé par Flamand (2000). Les écarts rapportés aux valeurs expérimentales sont en valeur absolue inférieurs à 10% à l'exception de la rigidité et du déplacement au pic de cisaillement surestimé pour S1 à 14 MPa. Ces derniers écarts demandent encore à être expliqués.

Tableau 4. Résultats numériques et expérimentaux pour S1

	H	δ_c	σ^2	σ_N MPa	τ_{pic} MPa	$\tau_{résiduel}$ MPa	K_s MPa/mm	Δ_u mm
S1	0,55	15	0,53	14	17,9	11,7	79	0,72
				21	25,7	15,9	110	0,66
Mortier (Flamand 2000)	0,60	15	0,55	14	18,47	11,5	51	0,50
				21	24,6	17,0	68	0,60

5. Conclusions

A l'issue de ce travail, il est établi que des simulations par éléments discrets permettent de reproduire le comportement en cisaillement de joints rocheux. La méthode proposée

repose sur l'enregistrement des élévations d'épentes de fractures naturelles ce qui est actuellement une pratique courante en laboratoire. Elle consiste ensuite, après calculs des paramètres de rugosité des surfaces, 1) en la création de moules par la méthode de Densité Spectrale de Puissance (répliques numériques des épentes), 2) en la création d'échantillons virtuels de joints rocheux formés par éléments discrets, 3) en l'estimation des paramètres géométriques et mécaniques du matériau virtuel pour, *in fine* 4) en la simulation d'essais par éléments discrets.

Cette méthode alternative à la méthode basée sur l'utilisation de répliques et d'essais de laboratoire a l'avantage de permettre des essais numériques en ayant une morphologie d'épente constante. L'étude paramétrique de l'effet des autres paramètres que la rugosité est donc possible.

L'adéquation des résultats obtenus sur répliques en laboratoire et sur échantillons virtuels s'avère encourageante et prometteuse. Ainsi, outre des développements théoriques à venir, l'application de cette méthode permettrait d'orienter les modalités de réalisation d'une campagne d'essais en vraie grandeur à partir des résultats de simulations ne demandant a priori que l'enregistrement des élévations sur des épentes de fractures naturelles.

6. Références bibliographiques

- Budi G., Rao K.U.M., Deb D. (2014). Laboratory modelling of rock joints under shear and constant normal loading. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 03, n° 04, pp. 190-200.
- Flamand R. (2000). Validation d'une loi de comportement mécanique pour les fractures rocheuses en cisaillement. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Canada.
- Gentier S., Chilès J.P., Riss J. (1991). Analyse et simulation d'une fracture rocheuse. *Cahier de géostatistique, Fascicule 1, Fontainebleau*, pp. 77-87.
- Gentier S., Riss J., Archambault G., Flamand R., Hopkins D. (2000). Influence of fracture geometry on shear behavior. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*. vol. 37, pp. 161-174.
- Hoang T.T.N. (2010). Etude du comportement d'un milieu fracturé :Application à la réalisation du tunnel de Saint Béat. Thèse de l'université Paris-Est (France).
- Gasc-Barbier M., Hoang T.T.N., Marache A., Sulem J., Riss J. (2012). Morphological and mechanical analysis of natural marble joints submitted to shear tests. *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 4, n° 4, pp. 296-311.
- Ladanyi, B. and Archambault, G. (1969). Simulation of shear behavior of jointed rock mass. *Proc. 11th Symp. On Rock Mechanics: Theory and Practice, AIME*, New York, pp. 105-125.
- Marache A. Riss J., Gentier S., Chilès J.P. (2002). Characterisation and Reconstruction of a rock fracture surface by geostatistics. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, vol. 26, pp. 873-896.
- Maske H.A. (1996). Method for generating long-range correlations for large system. *Physical review, E*, v. 53.
- Thirukumaran S., Indraratna B. (2015). A review of shear strength models for rock joints subjected to constant normalstiffness. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.10.006.
- Varela Valdez A. (2015). Mechanical behavior of rock joints: influence of joint roughness on its closure and shear behavior. Thèse de l'université de Bordeaux. <http://www.theses.fr/2015BORD0184>.