

# Application de l'impression 3D-sable pour l'étude du comportement mécanique des joints rocheux associé à leur morphologie

## *Joint Behavior during shear process using an innovative equivalent geometrical and 3DP technology*

Emilio ABI AAD<sup>1</sup>, Marianne CONIN<sup>1</sup>, Olivier DECK<sup>1</sup>, Marwan AL HEIB<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, CNRS GeoRessources, Ecole des Mines de Nancy, Campus Artem CS14234, 54042 Nancy Cedex, France

<sup>2</sup>Ineris – Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 54042 Nancy Cedex, France

**RÉSUMÉ** – L'objectif de cette étude est d'examiner l'occurrence des mécanismes d'ouverture et fermeture d'un joint rocheux soumis à des sollicitations mécaniques. Une méthodologie innovante basée sur la technologie 3DP a été appliquée pour construire la matrice et le joint. La morphologie des surfaces est assimilée à une surface fractale. Une fois imprimées, ces surfaces sont cisailées.

**ABSTRACT** – The purpose of the paper is to examine how the joint aperture or closure occurs in the joint, discussing the relationship with normal stress, joint morphology, and intact matrix mechanical properties. To do this, an innovative methodology based on 3DP technology was applied to construct the matrix and joint. The surface roughness was considered to have fractal. The constructed joint underwent eighteen shear tests.

## 1 Introduction

Le comportement au cisaillement des joints rocheux est depuis longtemps reconnu comme un élément clé dans la compréhension du comportement mécanique des massifs rocheux fracturés ainsi que de leurs processus d'écoulement et de transport de fluides. (Chang, Konietzky, and Frühwirt 2019). La morphologie de la discontinuité rocheuse, souvent appelée rugosité, couplée aux paramètres mécaniques de la matrice et aux conditions in situ, joue un rôle important dans le comportement au cisaillement. Cependant, l'écoulement des eaux souterraines et le transport des solutés sont régis par les vides développés au contact des joints pendant le mécanisme de cisaillement ce qui correspond au phénomène de dilatance. Patton (1966) a reconnu que la rugosité apparaît à plusieurs échelles et a classé les aspérités en deux catégories : (i) l'aspérité secondaire, soit l'aspérité à petite échelle contrôlant majoritairement le comportement au cisaillement pour un faible déplacement, (ii) l'aspérité primaire, soit l'aspérité à grande échelle gouvernant le comportement au cisaillement pour un grand déplacement. Barton (1973) a également spécifié, à la suite d'une campagne d'essais de cisaillement sur un joint rugueux naturel, que le comportement au cisaillement est contrôlé par les aspérités secondaires à faible contrainte normale, tandis qu'en augmentant cette dernière ces aspérités sont cisailées et le comportement est régi par les aspérités primaires. Yang, Di, and Yen (2001) confirment ces recherches en réalisant des essais de cisaillement sur des surfaces rugueuses assimilées à un objet fractal 1D et moulées dans du polystyrène. De nombreuses études ont été menées pour examiner l'effet de la forme et de la dégradation de l'aspérité sur le comportement au cisaillement pendant le processus de cisaillement. (Zhang et al. 2019; Bahaaddini et al. 2016). Asadi, Rasouli, and Barla (2013) ont montré, sur la base d'essais de cisaillement réalisés sur des joints de mortier de forme triangulaire et ondulée, qu'en augmentant l'angle d'inclinaison de l'aspérité le mode de rupture passe du glissement de l'aspérité à l'écrasement et à la propagation de la fissuration dans la matrice; par

conséquent, la rupture se produit au sein de la matrice et le comportement post-pic dépend des propriétés mécaniques du matériau. Plus tard, Song et al. (2015) ont conclu que pour une aspérité auto-similaire à l'échelle du micromètre, la contrainte de cisaillement maximale augmente avec l'amplitude de l'aspérité. Lorsque la longueur d'onde ou l'amplitude de l'aspérité est importante, celle-ci commence à se fracturer ; dans le cas contraire la plasticité est observée dans la matrice sous l'aspérité.

Trois méthodes permettent de décrire quantitativement la rugosité de la surface d'une fracture : (i) La méthode empirique subjective JRC (joint roughness coefficient) proposée par N. Barton and Choubey (1977), et adoptée par l'ISRM. Cependant, afin de minimiser la subjectivité de la détermination du JRC, d'autres approches ont été proposées : (ii) l'analyse statistique qui a établi de nombreux paramètres pour quantifier la forme de la rugosité, classés en trois groupes : amplitude, espacement et paramètres hybrides (Zeynep Bade Sozer 2005; Myers 1962; Tatone and Grasselli 2009) ; (iii) la méthode fractale proposée pour la première fois par Mandelbort (Benoit 1985). Par la suite, de nombreuses études ont été consacrées à l'identification d'une surface fractale avec une réplication auto-affine ayant un grand potentiel pour décrire la rugosité de surface d'un joint rocheux naturel, par exemple le granit, le grès ou le marbre, sur plusieurs ordres de grandeur (Odling 1994; Candela et al. 2012; Li et al. 2017). De telles surfaces garantissent une invariance d'échelle, et sont statiquement invariantes par transformation.

$$\mathbf{x} \rightarrow \lambda \mathbf{x}; \mathbf{y} \rightarrow \lambda \mathbf{y}; \mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \rightarrow \lambda^H \mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (1)$$

Avec  $H$  appelé l'exposant de Hurst.

Par conséquent, l'objectif de ce travail est d'analyser expérimentalement la relation entre la rugosité de la fracture, le comportement au cisaillement et la dilatation à diverses charges normales pour un joint rocheux constitué d'un matériau granulaire cohésif. A cette fin, une approche innovante basée sur la technologie d'impression 3D (3DP) utilisant du sable et un liant liquide est adoptée pour fabriquer le joint rocheux rugueux artificiel en raison de sa grande précision et de sa répétabilité (Perras and Vogler 2019; Nyembwe et al. 2016; Jaber et al. 2020). Différentes surfaces rugueuses reproduisant les joints rocheux naturels (de lisses à plus rugueux) sont générées numériquement comme objet 3D fractal auto-affine en contrôlant précisément leurs paramètres géométriques.

## 2 Matériel artificiel : 3DP

### 2.1 Impression 3D

Dans cet article, le matériau analogue à la roche est un matériau artificiel, alliant sable de silice GS140 et liant phénolique, imprimé par procédé 3DP « Binder Jetting » grâce à l'imprimante 3D VX1000 de Volxejet. Ce procédé consiste à appliquer un liant sélectif pour agglomérer les grains de sable et créer les formes requises. L'épaisseur de la couche imprimée est comprise entre 250  $\mu\text{m}$  et 300  $\mu\text{m}$ . Les propriétés du matériau analogue dépendent de la teneur en liant, du sens d'impression et des conditions de stockage, notamment le temps et la température. (Jacques-hulin 2019)

### 2.2 Préparation des spécimens pour les essais mécaniques

Une campagne d'essais de compression uniaxiale et de flexion trois points a été réalisée pour caractériser le comportement macro-mécanique de la roche analogue. Deux types d'éprouvettes sont imprimés : cylindrique ( $D=38$  mm,  $H=76$  mm) et prismatique ( $w=e=34$  mm,  $L=150$  mm) (Figure 1). En raison de l'anisotropie induite par le processus d'impression 3D, les échantillons sont imprimés dans trois directions perpendiculaires X, Y et Z, avec trois

teneurs en liant différentes : 6,5 % (pourcentage le plus élevé), 5,7 % (pourcentage intermédiaire) et 5 % (pourcentage minimum pour assurer la cohésion du matériau).



Figure 1 Echantillons cylindriques et poutres imprimés en 3D en direction X

### 2.3 Résultats des essais de compression uniaxiale et de flexion trois points

Les essais de compression uniaxiale et de flexion trois points sont respectivement réalisés sur les éprouvettes cylindriques et prismatiques. Ces dernières sont chargées jusqu'à la rupture à une vitesse constante de 0,2 mm/s lors des essais de compression et de 0,1 mm/s ou 0,05 mm/s lors des essais de flexion. Au moins trois essais sont réalisés pour chaque configuration (sens d'impression ; taux de liant W). Les échantillons sont testés à température ambiante et après un temps de stockage identique de deux mois. Les résultats montrent la répétabilité des essais de compression. Dans 90% des cas, les éprouvettes imprimées dans les directions X et Y présentent un comportement fragile, tandis qu'un comportement ductile (un léger plateau) est observé pour la direction Z. Les résultats indiquent que l'UCS,  $\sigma_t$  et E dépendent fortement de la teneur en liant (W) et de la direction d'impression (Figure 2 et Figure 3). Dans le détail, UCS,  $\sigma_t$  et E augmentent avec la teneur en liant. Les propriétés les plus élevées sont mesurées pour les éprouvettes imprimées selon la direction Y. Par conséquent, ce procédé 3DP pourrait être une reproduction intéressante d'une roche intacte anisotrope altérée, faible à moyennement rigide, très faible à faible résistance, et très faible à faible fragilité ( $UCS/\sigma_t < 10$ )

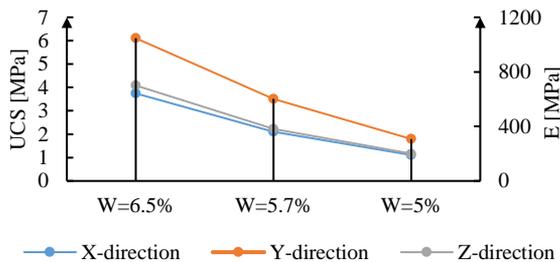


Figure 2. UCS et module de Young (E) des éprouvettes 3DP en fonction de la teneur en liant (W)

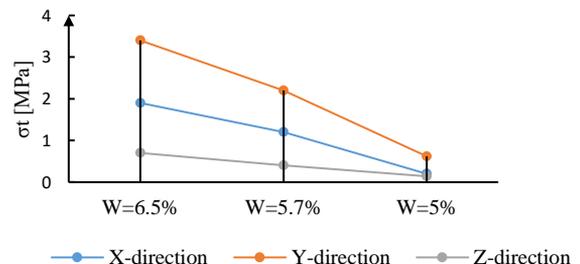


Figure 3. Résistance à la traction ( $\sigma_t$ ) des éprouvettes 3DP en fonction de la teneur en liant (W)

## 3 Joint rocheux artificiel

### 3.1 Caractérisation de la morphologie du joint rocheux

Le « Power Spectrum Density (PSD) » est défini comme la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation des ondes composant un signal (1D) ou une surface (2D). Cette méthode a été utilisée avec succès comme description quantitative pour générer une surface fractale 3D en additionnant différentes ondes périodiques à diverses échelles. (Persson 2014; Nie et al. 2019). Pour une surface fractale auto-affine, le trace log-log (PSD) révèle une tendance linéaire entre le logarithme de l'amplitude de l'onde et sa fréquence :  $-2(H+1)$ , où H est appelé l'exposant de Hurst lié aux dimensions fractales  $D_f$  via  $H=3-D_f$  (Kulatilake, Um, and Pan 1998). Le PSD d'une surface fractale auto-affine dépend de six paramètres caractérisant la topographie de la surface (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

Tableau 1. Paramètres de surface fractale auto-affine utilisés dans la méthode PSD

Paramètres r		Description	Rough corrélation
H	Exposant de Hurst	Varie entre 0,5 (surface rugueuse) et 0,99 (surface lisse)	-
$\sigma$	Ecart type	Contrôle l'amplitude de l'aspérité	+
$q_{min}$	Smaller wave-vector	Plus petit vecteur d'onde possible selon la taille de la surface	+
$q_{max}$	Cut-off wave-vector	Plus grand vecteur d'onde possible selon l'échelle de mesure	+
$q_{roll-off}$	Roll-off wave-vector	Longueur de corrélation auto-affine : aucune corrélation fractale avec la topographie pour une longueur d'onde supérieure ou égale à roll-off wave	+

Six surfaces rugueuses auto-affines idéales similaires à un joint rocheux naturel de dimension 150mm x 150mm sont générées par la méthode PSD. Elles présentent la même forme de rugosité mais des valeurs différentes du couple ( $H_i = 0,5-0,75-0,99$  ;  $\sigma_j = 0,75-1$ ). La longueur d'onde « roll-off » est fixée à environ 42 mm et la plus petite est 1 mm. La Figure 4 présente deux exemples de surfaces numériques.

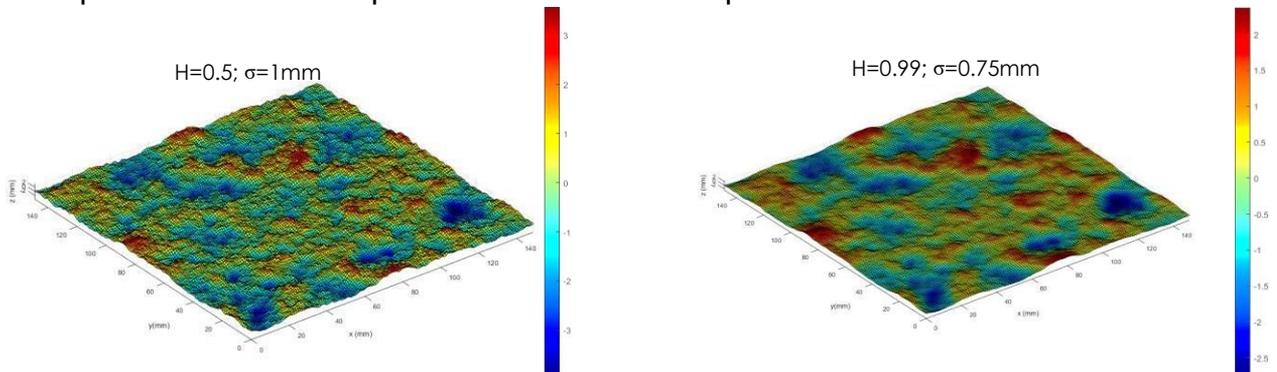


Figure 4. Surface numérique 150x150cm auto-affine, avec  $\delta x = \delta y = 1\text{mm}$ , a) ( $H=0.5$  ;  $\sigma=1\text{mm}$ ) surface rugueuse b) ( $H=0.99$  ;  $\sigma=0.75\text{mm}$ ) surface lisse

Tableau 2 Propriétés fractales des surfaces rugueuses numériques

Surface	$[H_i]_{initial}$	$[\sigma_j]_{initial} \cdot 10^{-3}$	Rugosité
S1	0.99	0.75	lisse   Rugueuse ↓
S2	0.75	0.75	
S3	0.99	1.0	
S4	0.5	0.75	
S5	0.75	1.0	
S6	0.5	1.0	

### 3.2 Impression et scanning 3D des joints artificiels

Les joints artificiels ont été imprimés avec un W de 5,7% selon Z, puis scannés avec un scanner 3D DEA Gamma basé sur le concept de triangulation optique. La vitesse de numérisation est de 5mm/s avec une précision de 50 $\mu\text{m}$ , et  $\delta x, y = 300\mu\text{m}$ . Les résultats confirment que les surfaces imprimées sont isotropes dans le plan X-Y. Les écarts entre les surfaces numérisées et imprimées mettent en évidence les limites de résolution (longueur d'onde entre 8 et 2.5mm) de l'imprimante 3D. (Figure 6).



Figure 5. Echantillon de cisaillement imprimé en 3D

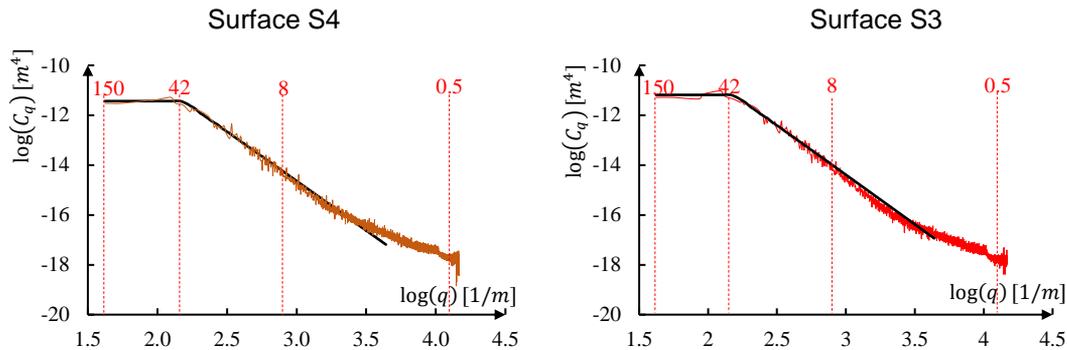


Figure 6. Comparaison entre le PSD des surfaces numériques (lignes noires) et les surfaces imprimées (orange pour la surface S4, rouge pour la surface S3)

#### 4 Essai de cisaillement direct

Les essais de cisaillements directs sont réalisés avec une de boîte de casagrande composée de deux demi-boîtes et conçue pour des échantillons d'une surface maximale de 1500 mm x 1500 mm. La partie supérieure se déplace verticalement dans la direction (-Z) et horizontalement dans (-X), alors que la partie inférieure se déplace horizontalement dans (X). Le dispositif est équipé de trois capteurs de force pour mesurer les charges normales et tangentielles, ainsi que de six capteurs différentiels linéaires variables (LVDT) mesurant le déplacement normal de la moitié supérieure et le déplacement tangentiel des deux boîtes. Les valeurs moyennes des deux capteurs de cisaillement et des LVDT sont utilisées pour les charges de cisaillement et le déplacement normal et tangentiel. Les essais sont effectués sous condition de charge normale constante ( $\sigma_n/UCS=20\%$ ,  $\sigma_n/UCS=35\%$  et  $\sigma_n/UCS=55\%$ ).

#### 5 Résultats des essais de cisaillement

Les six surfaces présentent la même tendance pour les résultats de cisaillement. Les contraintes de cisaillement maximales et résiduelles ( $\tau_p$ ,  $\tau_r$ ) augmentent avec la contrainte normale. L'exposant de Hurst (H) et l'écart type ( $\sigma$ ) n'influent pas sur les contraintes de cisaillement maximales (Tableau 3). La Figure 7 montre les résultats pour les surfaces S3 et S4. La contrainte de cisaillement atteint une valeur maximale, puis diminue jusqu'à une valeur résiduelle constante d'environ 70%-90% de la valeur maximale. Cet écart est classiquement observée lors d'essais de cisaillement sur des joints de roche naturelle (Olsson and Barton 2001) et est interprétée comme la conséquence de l'endommagement de la surface.

Tableau 3. Résultats des contraintes de cisaillement au pic ( $\tau_p$ ) et résiduelles ( $\tau_r$ )

Surface	$\sigma_n/UCS = 20\%$		$\sigma_n/UCS = 35\%$		$\sigma_n/UCS = 55\%$	
	$\tau_p$ [MPa]	$\tau_r$ [MPa]	$\tau_p$ [MPa]	$\tau_r$ [MPa]	$\tau_p$ [MPa]	$\tau_r$ [MPa]
<b>S1</b>	0.23	0.21	0.49	0.43	0.72	0.65
<b>S2</b>	0.27	0.24	0.50	0.44	0.70	0.63
<b>S3</b>	0.32	0.29	0.54	0.43	0.76	0.51
<b>S4</b>	0.19	0.16	0.45	0.38	0.76	0.66
<b>S5</b>	0.24	0.20	0.47	0.41	0.79	0.66
<b>S6</b>	0.23	0.17	0.49	0.40	0.76	0.64

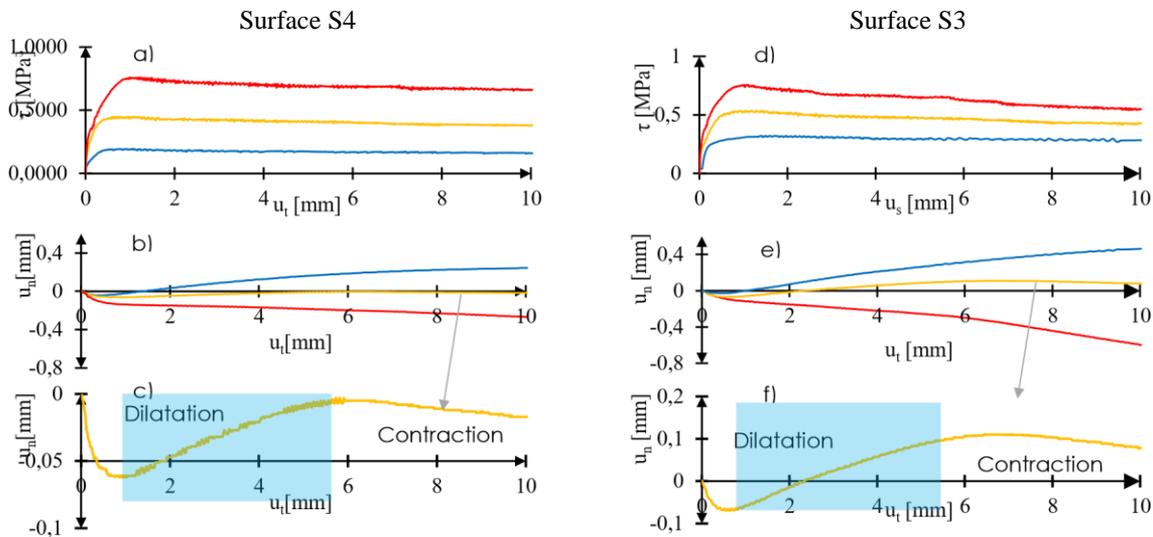


Figure 7. Comportement en cisaillement (a,d) et dilatation (b,c,e,f) pour les surfaces S3 et S4 pour  $\sigma_n/UCS=20\%$  (courbe bleue),  $\sigma_n/UCS=35\%$  (orange), et  $\sigma_n/UCS=55\%$  (rouge)

Cet endommagement est principalement observé sur les aspérités secondaires (figure 8). La Figure 8 montre que la dégradation des aspérités évolue avec l'augmentation de la contrainte normale. Sous une contrainte faible  $\sigma_n/UCS=20\%$ , les aspérités primaires et secondaires sont nettement moins endommagées et accompagnées d'un comportement de dilatation, tandis que dans le cas de  $\sigma_n/UCS=55\%$ , toutes les aspérités sont complètement cisailées et une contraction est observée. (Figure 7b, e et Figure 8). Pour la contrainte intermédiaire, une phase de dilatation est suivie d'une phase de contraction. (Figure 7c, f). La Figure 9 montre des photos de la surface S4 à la fin de l'essai de cisaillement (après 15mm de déplacement tangentiel) sous une contrainte normale égale à  $\sigma_n/UCS=20\%$ ,  $\sigma_n/UCS=35\%$  et  $\sigma_n/UCS=55\%$ , respectivement. Les observations révèlent que : (i) la dilatation du joint est associée à une ouverture (zone bleue), (ii) des zones de contraction et d'endommagement (zone rouge) sont détectées même sous faible contrainte normale au même endroit, et augmentent avec la contrainte normale, (iii) des fissures se développent progressivement au cours des essais. Elles s'étendent progressivement à l'intérieur de la matrice. Trois séries de fissures (lignes bleue, jaune et verte) sont identifiées. Elles s'initient toujours au même endroit, quelle que soit la contrainte normale, mais sont plus nettes sous contrainte normale intermédiaire et supérieure.

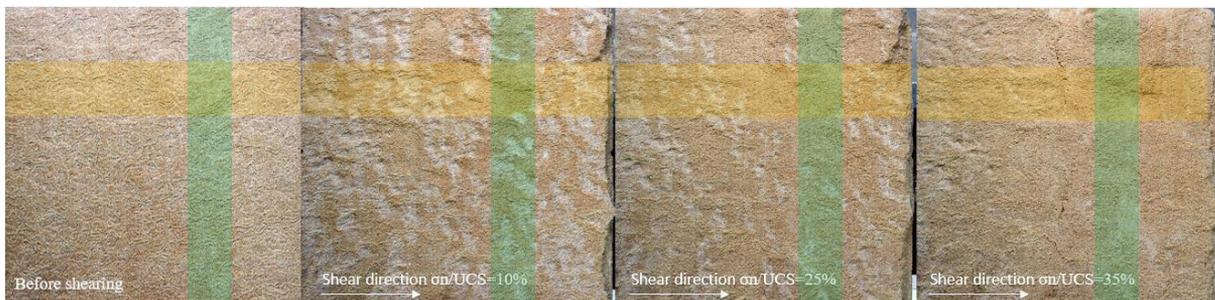


Figure 8. S4 avant et après cisaillement pour  $\sigma_n/UCS=20\%$ ,  $\sigma_n/UCS=35\%$ , et  $\sigma_n/UCS=55\%$ . Les zones vertes et jaunes sont les mêmes dans les 4 cas (avant et après cisaillement). La zone verte correspond à la zone endommagée dans la direction perpendiculaire au cisaillement, et la zone jaune correspond à la zone endommagée dans la direction du cisaillement.

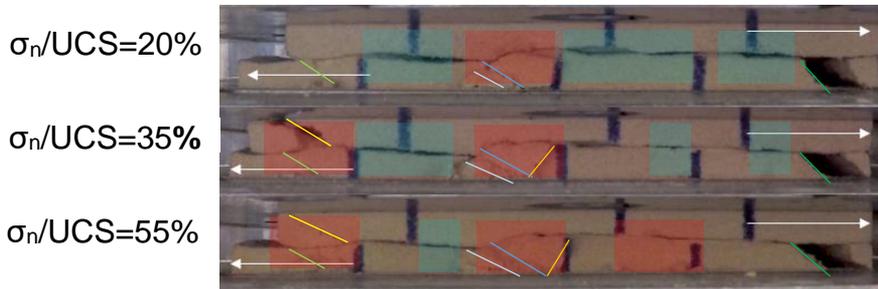


Figure 9. Photos de la surface S4 cisailée sous différentes contraintes normales  $\sigma_n/UCS=20\%$ ,  $\sigma_n/UCS=35\%$ , and  $\sigma_n/UCS=55\%$ , ouverture mécanique (zones bleues), contraction et endommagement (zones rouges), fissures (bleues, jaunes et vertes).

Les différentes surfaces rugueuses sont décomposées en quatre plages de longueur d'onde ( $\lambda$ ) : [150mm, 42mm], [150mm, 8mm], [150mm, 2.5mm], et [150mm, 0.5mm] en utilisant la technique FFT. Les plages sont définies en fonction de la variation de l'exposant de Hurst détecté sur les surfaces imprimées. (Figure 6). Le Tableau 4 présente les calculs des pentes au quantile 95 % de chaque plage de longueur d'onde de chaque surface. Les résultats montrent que l'angle de dilatation est approximativement égal à la pente au quantile de 95% de la longueur d'onde au-dessus de 42mm, ce qui prouve que les aspérités primaires contrôlent principalement la dilatation indépendamment des aspérités secondaires.

Tableau 4. Comparaison entre l'angle de dilatation expérimental et le quantile 95 % de la distribution des angles des surfaces numériques pour différentes longueurs d'onde.

	$\Theta$ [°]-95% Quantile				Angle de dilatance $\psi$ [°]
	$\lambda > 42\text{mm}$	$\lambda > 8\text{mm}$	$\lambda > 2.5\text{mm}$	$\lambda > 0.5\text{mm}$	
<b>S1</b>	3.8	12.5	14.7	19.7	4.1
<b>S2</b>	3.3	13.5	17.2	21.4	3.8
<b>S3</b>	5.0	16.4	18.9	22.3	4.2
<b>S4</b>	3.2	14.9	21.8	25.7	4.1
<b>S5</b>	5.0	18.2	23.2	26.6	Contraction
<b>S6</b>	4.3	19.7	28.0	31.5	Contraction

## 6 Conclusion

Cette étude présente une nouvelle méthode pour reproduire des joints rocheux artificiels avec des paramètres géométriques et mécaniques contrôlables en utilisant la technologie 3DP « Binder Jetting » à base de sable et liant phénolique. Ce procédé permet de reproduire un joint rocheux naturel altéré constitué d'un matériau rocheux granulaire cohésif de faible résistance. Pour caractériser mécaniquement le comportement du joint artificiel, des essais de compression et de flexion trois points sont d'abord réalisés sur le matériau, puis des essais de cisaillement sur différentes configurations de joints. Les principales conclusions sont :

- (i) En augmentant la contrainte normale au-dessus de 35% de la valeur UCS, on remarque une fermeture des ouvertures associées aux zones de contraction et d'endommagement. Ainsi, la matrice cède, et les fissures se propagent dans la matrice,
- (ii) Pour un joint de roche altérée de morphologie naturelle, la contrainte de cisaillement et l'angle de dilatation dépendent de la plus petite aspérité, non cassée.

En complément de cette étude, une série d'essais de cisaillement sera prochainement effectuée sur des surfaces rugueuses avec d'autres géométries fractales pour confirmer ces résultats, et découvrir quelle échelle d'aspérités contrôle les comportements pré-pic et post-pic.

## 7 Références bibliographies

- Asadi, M. S., V. Rasouli, and G. Barla. 2013. "A Laboratory Shear Cell Used for Simulation of Shear Strength and Asperity Degradation of Rough Rock Fractures." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 46 (4): 683–99. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0322-2>.
- Bahaaddini, M., P. C. Hagan, R. Mitra, and M. H. Khosravi. 2016. "Experimental and Numerical Study of Asperity Degradation in the Direct Shear Test." *Engineering Geology* 204: 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.018>.
- Barton, N., and V. Choubey. 1977. "The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice." *Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique Des Roches* 10 (1–2): 1–54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>.
- Barton, Nicholas. 1973. "Review of a New Shear-Strength Criterion for Rock Joints." *Engineering Geology* 7 (4): 287–332. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6).
- Benoit, B Mandelbrot. 1985. "Self-Affine Fractals and Fractal Dimension." *Physica Scripta* 32 (4): 257. <http://stacks.iop.org/1402-4896/32/i=4/a=001>.
- Candela, Thibault, François Renard, Yann Klinger, Karen Mair, Jean Schmittbuhl, and Emily E. Brodsky. 2012. "Roughness of Fault Surfaces over Nine Decades of Length Scales." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (8): 1–30. <https://doi.org/10.1029/2011JB009041>.
- Chang, Lifu, Heinz Konietzky, and Thomas Frühwirth. 2019. "Strength Anisotropy of Rock with Crossing Joints: Results of Physical and Numerical Modeling with Gypsum Models." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 52 (7): 2293–2317. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1714-8>.
- Jaber, Jana, Marianne Conin, Olivier Deck, Mohamed Mounni, Olivier Godard, and Samuel Kenzari. 2020. "Investigation of the Mechanical Behavior of 3D Printed Polyamide-12 Joints for Reduced Scale Models of Rock Mass." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53 (6): 2687–2705. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02064-9>.
- Jacques-hulin, Marjorie. 2019. "Développement d'une Méthode de Conception de Moules Hybrides En Fonderie. Thèse de Doctorat de l'université de Reims Champagne-Ardenne, France."
- Kulatilake, P. H.S.W., J. Um, and G. Pan. 1998. "Requirements for Accurate Quantification of Self-Affine Roughness Using the Variogram Method." *International Journal of Solids and Structures* 35 (31–32): 4167–89. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(97\)00308-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(97)00308-9).
- Li, Y., J. Oh, R. Mitra, and I. Canbulat. 2017. "A Fractal Model for the Shear Behaviour of Large-Scale Opened Rock Joints." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 50 (1): 67–79. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1088-8>.
- Myers, N. O. 1962. "Characterization of Surface Roughness." *Wear* 5 (3): 182–89. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(62\)90002-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(62)90002-9).
- Nie, Zhi hong, Xiang Wang, Dong liang Huang, and Lian heng Zhao. 2019. "Fourier-Shape-Based Reconstruction of Rock Joint Profile with Realistic Unevenness and Waviness Features." *Journal of Central South University* 26 (11): 3103–13. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4239-8>.
- Nyembwe, K., M. Mashila, P. J.M. van Tonder, D. J. de Beer, and E. Gonya. 2016. "Physical Properties of Sand Parts Produced Using a Voxeljet Vx1000 Three-Dimensional Printer." *South African Journal of Industrial Engineering* 27 (3SpecialIssue): 136–42. <https://doi.org/10.7166/27-3-1661>.
- Odling, N E. 1994. "Natural Fracture Profiles, Fractal Dimension and Joint Roughness Coefficients." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 27 (3): 135–53. <https://doi.org/10.1007/BF01020307>.
- Olsson, R., and N. Barton. 2001. "An Improved Model for Hydromechanical Coupling during Shearing of Rock Joints." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38 (3): 317–29. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00079-4).
- Patton, F D. 1966. "Multiple Model of Shear Failure in Rock." In *Proceedings of the 1st Congress of the International Society for Rock Mechanics (ISRM)*, 509–13.
- Perras, Matthew A., and Daniel Vogler. 2019. "Compressive and Tensile Behavior of 3D-Printed and Natural Sandstones." *Transport in Porous Media* 129 (2): 559–81. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1153-8>.
- Persson, B. N.J. 2014. "On the Fractal Dimension of Rough Surfaces." *Tribology Letters* 54 (1): 99–106. <https://doi.org/10.1007/s11249-014-0313-4>.
- Song, H., R. J. Dikken, L. Nicola, and E. Van Der Giessen. 2015. "Plastic Ploughing of a Sinusoidal Asperity on a Rough Surface." *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME* 82 (7): 1–8. <https://doi.org/10.1115/1.4030318>.
- Tatone, Bryan S.A., and Giovanni Grasselli. 2009. "A Method to Evaluate the Three-Dimensional Roughness of Fracture Surfaces in Brittle Geomaterials." *Review of Scientific Instruments* 80 (12). <https://doi.org/10.1063/1.3266964>.
- Yang, Z Y, C C Di, and K C Yen. 2001. "The Effect of Asperity Order on the Roughness of Rock Joints." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38 (5): 745–52. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00032-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00032-6).
- Zeynep Bade Sozer. 2005. "TWO DIMENSIONAL CHARACTERIZATION OF TOPOGRAPHIES OF GEOMATERIAL PARTICLES AND SURFACES A Dissertation Presented To The Academic Faculty By Zeynep Bade Sozer In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Civil and Enviro."
- Zhang, Xiaobo, Qinghui Jiang, P. H.S.W. Kulatilake, Feng Xiong, Chi Yao, and Zhicheng Tang. 2019. "Influence of Asperity Morphology on Failure Characteristics and Shear Strength Properties of Rock Joints under Direct Shear Tests." *International Journal of Geomechanics* 19 (2): 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001347](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001347).