

CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT DES DISCONTINUITÉS ROCHEUSES PAR FABRICATION ADDITIVE

CHARACTERIZATION OF JOINTED ROCK MASS USING ADDITIVE MANUFACTURING

Jana JABER¹, Marianne CONIN¹, Olivier DECK¹, David BONINA², Olivier GODARD², Samuel KENZARI²

¹ Université de Lorraine, CNRS, CREGU, laboratoire GeoRessources, Ecole des Mines de Nancy, Campus Artem, CS14234, 54042 Nancy Cedex, France

² Institut Jean Lamour, UMR 7198 CNRS-Université de Lorraine, 2 allée André Guinier, Campus Artem 54000 NANCY, France

RÉSUMÉ - Cet article s'inscrit dans le cadre d'une activité de recherche visant à construire un modèle physique d'un ouvrage souterrain à une échelle réduite (1/20 à 1/100) en reproduisant explicitement les discontinuités rocheuses et leurs caractéristiques (rugosité, ponts rocheux, etc.). Il présente les résultats expérimentaux préliminaires d'essais mécaniques effectués sur des modèles réduits analogiques d'éprouvettes discontinues en polyamide 12 construites par fabrication additive. Ces essais permettent de caractériser géométriquement et mécaniquement les discontinuités imprimées.

ABSTRACT - This work constitutes a part of a research aiming to construct a physical model of an underground excavation (reduce scale of 1/20 to 1/100). In this model, discontinuities are explicitly reproduced with rock bridges. This study presents the results of mechanical tests conducted on polymer specimens (Nylon 12-PA). These specimens are built using 3D printing technology to reproduce an analogic fractured rock medium.

1. Introduction

Ce travail se situe dans le cadre de l'étude de la stabilité des ouvrages souterrains (tunnel, mine, carrière souterraine, etc.) en environnement rocheux. Dans ces environnements la stabilité de l'ouvrage dépend fortement du comportement mécanique du massif. Ce dernier est lui-même contrôlé par la présence de discontinuités. Une méthode d'étude du comportement mécanique de ces ouvrages est la modélisation physique. L'originalité de notre travail repose sur la modélisation explicite des discontinuités rocheuses dans le modèle réduit d'un ouvrage souterrain.

La modélisation physique en géotechnique est un sujet qui a été abordé par diverses approches et qui trouve des applications dans le domaine minier, pétrolier, en génie civil, etc. (Meguid et al., 2008). Les modèles réduits peuvent être sollicités en centrifugeuse (Mair et al., 1982 ; Blanc et al., 2015), ou sous gravité terrestre (Terzaghi, 1936 ; Berthoz et al., 2013). Notre objectif à terme est de modéliser une mine creusée dans un massif rocheux discontinu, en utilisant une modélisation physique sous gravité terrestre. Ce type de modélisation permet d'obtenir des résultats quantitatifs et d'observer de nouveaux phénomènes, à condition de respecter les facteurs d'échelle (Buckingham, 1914 ; Mandel, 1962). Elle a déjà été utilisée pour modéliser des ouvrages dans un massif rocheux fracturé (Ghabraie et al., 2015; Li et al., 2005). Dans la majorité des modèles réalisés, les chercheurs utilisent des mélanges de matériaux à base de géomatériaux (sable, ciment ou plâtre) pour simuler les roches (Stimpson, 1970). L'utilisation des géomatériaux granulaires impose généralement que le modèle réduit soit un milieu continu, et donc un raisonnement par approche de milieu continu équivalent. La simulation explicite des discontinuités dans les modèles réduits se limite à deux configurations : la modélisation uniquement des

stratifications (Sui et al., 2015) ou la construction du massif rocheux à l'aide des blocs rectangulaires assemblés comme une maçonnerie. Les discontinuités dans ce cas sont les joints entre les blocs (Fuenkajorn and Phueakphum, 2010). Mais cette méthode peine à représenter un massif rocheux naturel où les discontinuités ne sont pas régulières, les familles de discontinuités ne sont pas nécessairement orthogonales et leur nombre peut être supérieur à 2. Par ailleurs le contact entre les différents blocs ne permet pas de reproduire la résistance au cisaillement, l'existence de ponts rocheux ni la rugosité des joints réels. Ainsi, et pour une reproduction explicite des discontinuités rocheuses, il est nécessaire de trouver une nouvelle méthode de construction ou des nouveaux matériaux discontinus respectant les règles de similitudes.

L'objectif de ce travail est de tester la faisabilité et l'intérêt d'utiliser une technologie additive pour réaliser un modèle réduit de massif rocheux discontinu. En premier lieu, il s'agit de justifier la pertinence du matériau choisi et la technique d'impression 3D utilisée du point de vue du respect des règles de similitude et de la réalisation de massifs discontinus. Ensuite, il s'agit de réaliser une première série de tests mécaniques qui permettent une première caractérisation des propriétés et qui débouchent sur la définition d'un plan d'expérience expérimental plus complet. Cet article décrit la démarche ayant permis de sélectionner ce matériau, les avantages qu'il apporte, ses inconvénients et les premiers résultats de caractérisation mécanique.

2. Choix du matériau et de la technique de fabrication

L'une des premières étapes de ce travail est de définir les paramètres du massif rocheux qui devront être mis à l'échelle. Cela nous permet également de trouver le matériau adéquat. L'objectif final est de modéliser les contraintes et les déformations dans une mine souterraine exploitée en chambre et pilier à une centaine de mètres de profondeur et creusée dans un massif rocheux. Le modèle sera sollicité mécaniquement à l'aide d'un dispositif expérimental ayant comme hauteur utile 1 m et comme surface utile $1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$. Les paramètres de notre problème sont donc la densité du matériau, ρ , ses modules élastiques (E, v), et les paramètres mécaniques des discontinuités (la cohésion, c , les angles de frottement et de dilatance φ, ψ , les rigidités normales et tangentielles, k_n et k_s , la résistance à la traction R_t , et la rugosité). On attribue à chaque paramètre un facteur d'échelle A^* tel que :

$$A^* = \frac{A_{réduit}}{A_{réel}} \quad (1)$$

Le facteur d'échelle sur les dimensions L^* est choisi entre 1/20 et 1/100. Le modèle est sollicité sous gravité terrestre, donc $g^*=1$.

$$\sigma^* = \rho^* g^* L^* \quad (2)$$

D'après la relation (2), en considérant que ρ^* varie entre 0,4 et 1 en fonction du matériau ou du mélange de matériau utilisé, et en se plaçant dans un contexte de mécanique des roches, on obtient des valeurs du module d'Young du matériau analogique (à l'échelle réduite) compris entre 0,2 et 3 GPa pour un module de Young de la roche compris entre 5 et 100 GPa. L'utilisation des tables d'Ashby (Ashby et al., 2007) permet d'identifier que les polymères répondent au critère avancé. Il convient en outre de vérifier que la loi de comportement du matériau analogique est similaire à celle du matériau réel.

On limitera l'approche proposée ici aux situations où le comportement du massif rocheux est essentiellement gouverné par celui des discontinuités et par le comportement élastique de la matrice. L'idée est donc de profiter des potentialités offertes par les techniques de fabrications additives pour mettre à l'échelle les propriétés élastiques et optimiser les discontinuités (forme, épaisseur, rugosité, existence de ponts rocheux, etc.) afin de respecter le facteur d'échelle global sur les résistances et les raideurs : dans un premier

temps, on s'intéressera au comportement élastique des discontinuités (k_n et k_s) et du modèle global (E_1 , E_2 , v_1 , v_2 et G_{12}).

Le matériau utilisé est un polymère thermoplastique du type polyamide 12 (PA 12). Malgré un coût relativement élevé par rapport aux géomatériaux classiques, l'utilisation du PA 12 associé à une technique de fabrication additive peut permettre la réalisation de modèles réduits discontinus de géométrie très précise et reproductibles. Un inconvénient est sa sensibilité aux variations de température.

De manière générale, la méthode de fabrication additive consiste à construire des modèles 3D de structures à géométries complexes, à partir d'un fichier de coordonnées de points (fichier CAO). L'utilisation de la fabrication additive pour reproduire un comportement mécanique des roches à partir de PLA (acide polylactique) est en fait très récente (Williams et al, 2017; Jiang et al., 2016; Jiang and Zhao, 2015). Les essais de laboratoires classiques (essais de traction et de compression) effectués sur les échantillons montrent la capacité de reproduire des comportements fragiles et ductiles. Dans ce travail, la technologie additive sélectionnée repose sur le frittage laser sélectif (SLS: Selective Laser Sintering) de matériaux polymères. Avec cette technique, l'objet est fabriqué par couches d'environ 100 à 200 µm d'épaisseur. Une première couche de poudre (couche d'étalonnage) est étalée par un rouleau automatisé sur un plateau de fabrication mobile et un laser IR est utilisé pour transformer cette poudre en un objet solide par "frittage sélectif" sans pression extérieure selon le tracé 2D défini par le modèle CAO : le lit de poudre est préchauffé quelques degrés sous la température de fusion du polymère et le laser ne fournit localement que l'énergie thermique nécessaire pour fondre le polymère et former un objet solide. Les poudres non fondues par l'action du laser assurent naturellement le support des couches suivantes. Puis, la plateforme de construction descend de l'épaisseur d'une couche, une nouvelle couche de poudre est étalée et le cycle recommence pour construire la pièce de bas en haut. Le choix de la méthode de fabrication SLS, s'appuie sur un compromis entre le coût de fabrication, la disponibilité des équipements requis, la précision permise et le volume potentiellement imprimable.

3. Application de la fabrication additive : Premiers essais

Le but principal de l'utilisation de la fabrication additive est d'intégrer les discontinuités explicitement dans le modèle physique. Plusieurs modèles et éprouvettes construites par fabrication additive sont testés pour paramétriser les discontinuités. Nos discontinuités sont formées de deux interfaces rugueuses, liées par des liaisons qui sont assimilables aux ponts rocheux présents au niveau des discontinuités. Pour pouvoir caractériser ces discontinuités, on s'intéresse dans un premier temps aux paramètres suivants : épaisseur de la discontinuité, densité des ponts rocheux, leur disposition sur la surface de la discontinuité et rugosité du joint. Des essais préliminaires de paramétrage permettent de préciser les limites des modèles à imprimer.

Pour vérifier les limites d'impressions et caractériser la géométrie des discontinuités, des éprouvettes avec différentes configurations géométriques sont modélisées, construites puis cryofracturées (fracturées ou coupées après congélation). Cette méthode permet de visualiser la forme interne des discontinuités et leurs dimensions réelles après impression, à partir d'images issues de microscopie optique, microscopie électronique à balayage (MEB) et de tomographie rayon X.

3.1. Anisotropie

Un premier facteur à vérifier est l'anisotropie potentielle induite par le sens de fabrication des éprouvettes. Ce facteur peut affecter la résistance des ponts rocheux à cause de leur faible élancement. Le diamètre des grains du PA 12 varie entre 20 et 100 µm. les premiers échantillons fabriqués par impression 3D montrent une isotropie dans le plan XY et une anisotropie suivant la direction OZ (sens de fabrication). Ceci est davantage visible en

imprimant des éprouvettes dans laquelle on a inclus des discontinuités de section rectangulaire. La même géométrie d'éprouvette est imprimée dans deux directions : l'axe longitudinal de la discontinuité est (1) dans le plan XY perpendiculaire à la direction d'impression (figures 1a et 1c), (2) suivant l'axe oz parallèle à la direction d'impression (figures 1b et 1d). La comparaison entre la forme des « vides » obtenue pour le même modèle montre un retrait dans les dimensions des discontinuités, surtout leur largeur, plus important dans le deuxième cas. Il faut donc favoriser, lorsque c'est possible, la première configuration d'impression, pour limiter les problèmes de retrait.

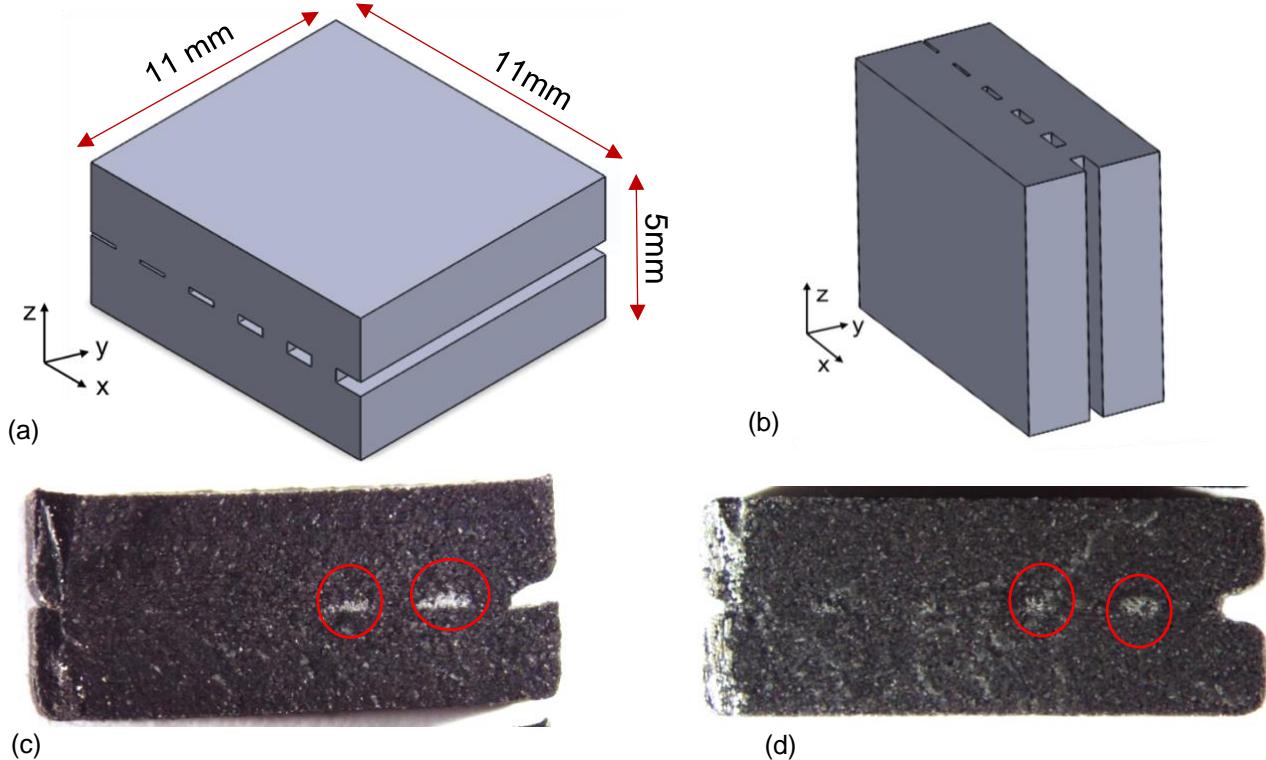


Figure 1: Modèles CAO d'une éprouvette discontinue en 3D imprimée dans deux directions différentes (a et b) et leur modèle imprimé et cryofracturé respectif (c et d)

3.2. Paramétrage de l'épaisseur des discontinuités

On cherche ici à définir l'épaisseur minimale réalisable pour les discontinuités et à caractériser l'écart géométrique entre le modèle CAO et l'éprouvette réalisée compte tenu, entre autres, des effets thermiques et de l'épaisseur de la couche d'étalonnage ($200 \mu\text{m}$). En effet, l'objectif final est de générer un modèle physique de dimension métrique comportant un réseau de discontinuités d'orientations et de positions différentes. Il faut donc choisir une épaisseur qui pourra être imprimée dans ces conditions. Trois séries d'éprouvettes ont été fabriquées pour étudier l'épaisseur minimale qu'il est possible d'imprimer, l'effet de la position du joint par rapport au niveau de la couche d'étalonnage, et l'effet de l'orientation du joint. Les résultats montrent que les discontinuités de faible largeur, et ayant une épaisseur inférieure à $200 \mu\text{m}$ ne sont pas réalisables. Ceci est la conséquence de l'effet thermique, dû au transfert de la chaleur des strates supérieures de poudre en cours de fusion, qui est trop important pour préserver les discontinuités de faibles épaisseurs juste en dessous. Les résultats MEB de la deuxième série montrent un retrait dans l'épaisseur des discontinuités. Ce retrait est plus important lorsque le début de la discontinuité ne se superpose pas avec le début d'une couche d'étalonnage (figures 2a, 2b). Le troisième facteur étudié est l'orientation des discontinuités. Les images MEB montrent une accumulation de poudre non fondue donnant une certaine "rugosité" à la discontinuité, liée à la différence de direction entre l'impression et la discontinuité. De plus, les discontinuités obliques ayant une épaisseur inférieure à $400 \mu\text{m}$ n'étaient pas imprimées (figures 3a, 3b).

Suite à ces premiers essais, une épaisseur théorique de 400 µm a été choisie pour le reste de l'étude. Cette épaisseur peut être imprimée dans les différentes orientations, et donne une valeur réelle variant entre 250 µm et 150 µm selon la position par rapport à la couche d'étalonnage.

N.B. : Les sphères visibles au MEB correspondent à la poudre PA 12 non fondu qui représente la discontinuité.

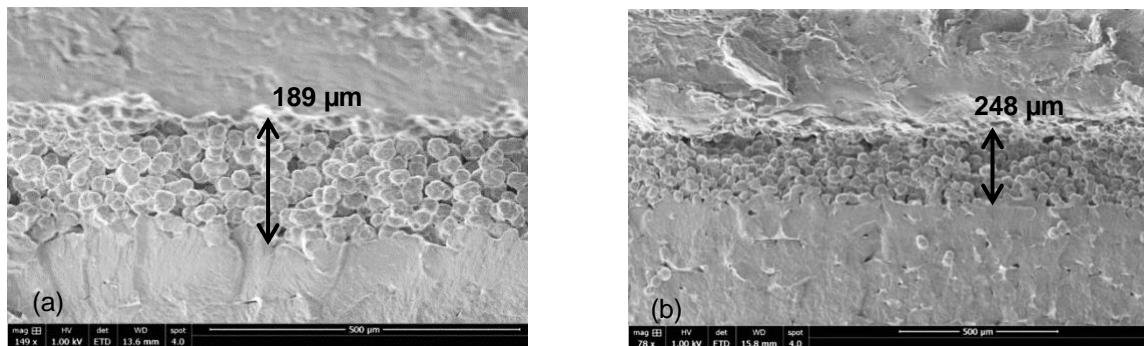


Figure 2 : Valeurs réelles de l'épaisseur d'une discontinuité horizontale théorique de 400 µm ayant (a) un niveau différent de celui de la couche d'étalonnage, (b) le même niveau de la couche d'étalonnage

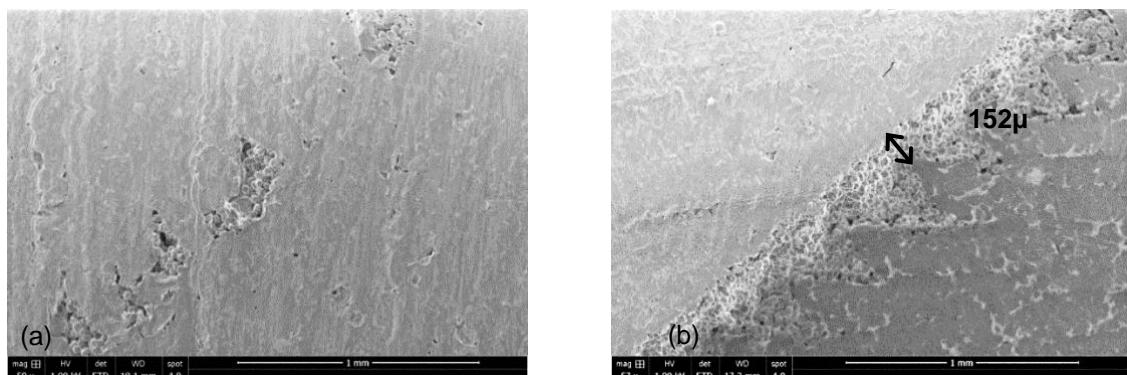


Figure 3 : Valeurs réelles de l'épaisseur d'une discontinuité oblique théorique de (a) 200 µm d'épaisseur, (b) 400 µm d'épaisseur

Il s'agit maintenant de caractériser le comportement mécanique des discontinuités réalisées par fabrication additive. Trois types d'essais sont à réaliser : essais de compression, de traction et de cisaillement. Dans la présente communication, on présente les résultats des essais de compression, les essais de traction et de cisaillement étant en cours.

3.3. Essais de compression :

Deux séries d'essais de compression uni-axiale sont réalisées sur des éprouvettes continues ou contenant une discontinuité. Ces essais permettent de déduire l'effet de la discontinuité sur la résistance à la compression, et d'estimer l'ordre de grandeur de la raideur normale, k_n . Les éprouvettes sont cylindriques, de même dimension, et certaines contiennent une discontinuité horizontale d'épaisseur 400 µm (figure 6a), dans laquelle sont distribués, de manière symétrique, 4 ponts rocheux de surface carrée de 4 mm² chacun. Les courbes contraintes-déformation de ces essais confirment la reproductibilité du comportement mécanique des éprouvettes (figure 4). Le module d'Young est de l'ordre de 1000 MPa pour les éprouvettes continues, et de l'ordre de 760 MPa dans le cas discontinu (figure 5). A noter que les essais de compression n'ont pas été menés jusqu'à la rupture totale des éprouvettes pour des raisons techniques (déformation de la surface de contact entre l'éprouvette et le vérin), mais nous allons jusqu'à la plastification des échantillons. La

comparaison entre les différents essais montre une diminution attendue du module d'Young et de la raideur normale globale des éprouvettes de 24% dans les éprouvettes discontinues.

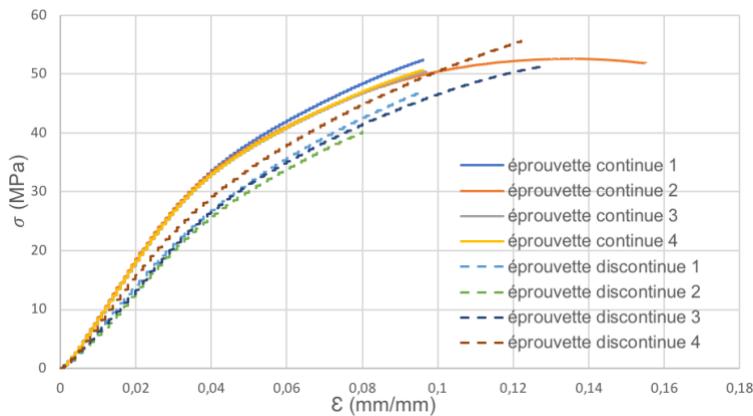


Figure 4 : Essais de compression uniaxiale sur des éprouvettes continues et discontinues

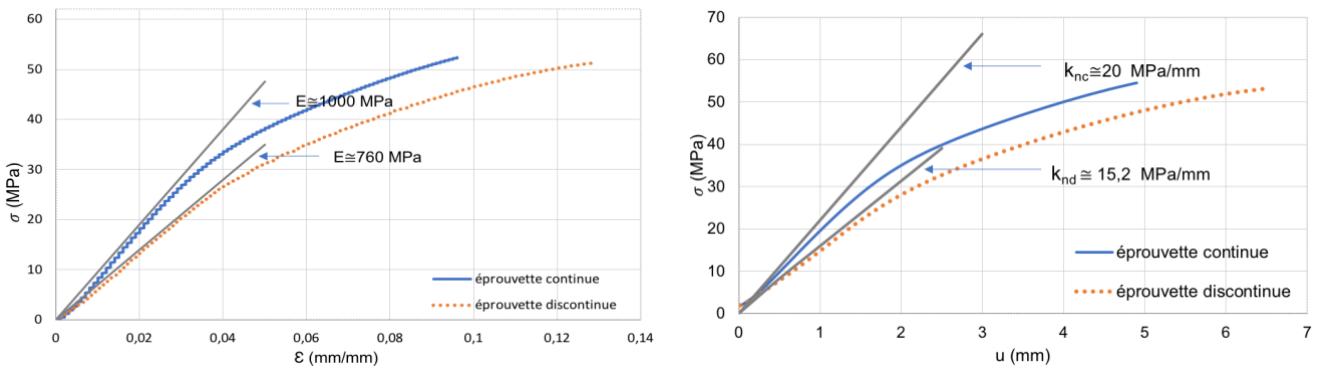


Figure 5 : comparaison du module d'Young et de la raideur normale k_n entre des éprouvettes continues et discontinues

Pour caractériser la raideur du joint à partir de cette diminution globale de raideur, on peut assimiler l'éprouvette discontinue à un modèle à trois ressorts en série ayant des raideurs normales k_1 et k_{nj} (figure 6b). Les relations entre la contrainte appliquée σ , les raideurs normales et les déplacements u sont donnés par les équations (3) et (4)

$$\sigma = k_1 u_1 = k_{nj} u_j = k_{nd} u \quad (3)$$

$$u = 2u_1 + u_j \quad (4)$$

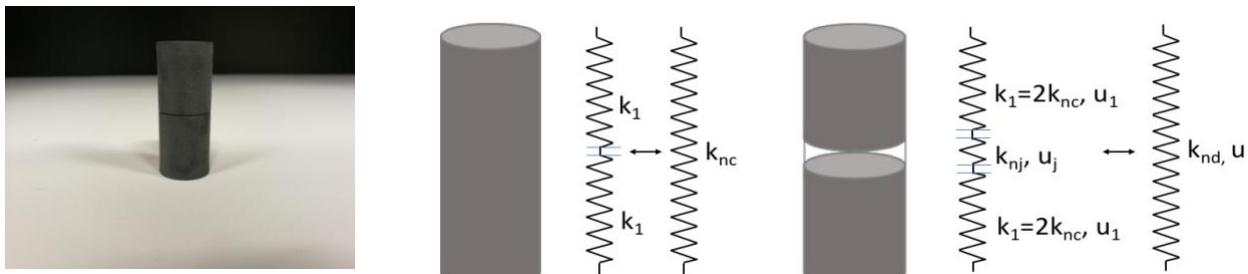


Figure 6 : éprouvette discontinue (a) et modèle analytique des éprouvettes de compression (b)

En appliquant les équations (3) et (4), et en considérant que l'éprouvette continue est formée de deux ressorts ayant chacun une raideur équivalente à k_1 , et donc $k_1 = 2k_{nc}$, on trouve une valeur de raideur du joint de 63 MPa/mm.

Une deuxième approche de calcul théorique de la raideur normale consiste à considérer la discontinuité formée par les ponts rocheux en négligeant les effets de la présence de la poudre non fondu. La raideur de ces ponts est calculée à partir de l'équation (5).

$$k_{nj} = \frac{E}{e_j} \frac{S_{\text{ponts}}}{S_{\text{totale}}} \quad (5)$$

En donnant aux paramètres de l'équation (5) des valeurs théoriques ($E = 1000 \text{ MPa}$, surface des ponts totale $S_{\text{ponts}} = 16 \text{ mm}^2$, surface de l'éprouvette $S_{\text{totale}} = 100 \pi \text{ mm}^2$ et épaisseur du joint $e_j = 0,4 \text{ mm}$) on obtient $k_{nj} = 127 \text{ MPa/mm}$. Cette différence par rapport à la valeur mesurée montre que les ponts rocheux réalisés sont moins rigides qu'attendu. Une explication possible peut être l'hétérogénéité du matériau fondu au niveau des ponts rocheux de la discontinuité. L'image tomographique (figure 7) montre en effet des contrastes de densité dans la partie encadrée pouvant aboutir à une épaisseur effective du joint plus grande. Cette discontinuité effective comprend les ponts, la poudre non fondu, ainsi que des zones de quelques centaines de microns d'épaisseur ayant des raideurs plus faibles (zones plus sombres dans le cadre potentiellement influencées par la diffusion thermique au sein de la matière frittée). En augmentant e_j par ce raisonnement, on peut obtenir le même ordre de grandeur que la raideur expérimentale. Une deuxième explication consiste à critiquer le modèle analytique. Dans ce modèle, les raideurs de la partie continue sont considérées constantes le long de l'éprouvette. En réalité, on est censé avoir une concentration de contraintes aux alentours de la discontinuité liée à un effet de voûtes. Cette redistribution d'efforts sur des sections équivalentes plus petites (effets de voûtes) aboutira à une diminution des raideurs des deux côtés du joint, et donc à une raideur normale du joint équivalente à celle obtenue par l'équation (5).

Des essais et mesures supplémentaires, ainsi que des études analytiques plus approfondies sont nécessaires pour préciser et affiner la caractérisation de la raideur normale équivalente de la discontinuité, et étudier sa raideur tangentielle.

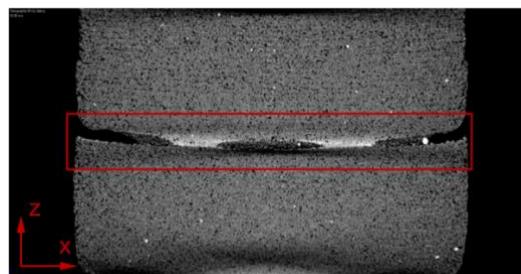


Figure 7 : Image tomographique (coupe XZ) d'une éprouvette contenant des ponts rocheux fabriquée par SLS. Dans l'encadré, la zone hétérogène probable de la discontinuité présentant deux ponts rocheux.

4. Conclusions et Perspectives :

La présente communication s'inscrit dans le cadre d'un travail de recherche visant à construire un modèle analogique d'un ouvrage souterrain se situant dans un massif rocheux discontinu. Son originalité repose sur l'utilisation de la fabrication additive pour construire un modèle explicitement discontinu. Le matériau utilisé est un polymère. Le comportement mécanique global du modèle sera contrôlé par les défauts créés simulant des discontinuités et des ponts rocheux. Le but est donc de pouvoir caler les paramètres de ces discontinuités afin d'ajuster le comportement d'une éprouvette de polymère pour qu'il soit similaire à celui d'une roche compte tenu des lois de similitude. Les premiers essais réalisés ont permis de paramétriser géométriquement l'épaisseur de la discontinuité compte tenu des effets thermiques liés à la technique de fabrication additive. Pour pouvoir intégrer des ponts rocheux dans une discontinuité, dans toute direction, une épaisseur théorique minimale de

400 µm doit être modélisée. Des premiers essais de compression uniaxiale ont mis en évidence la réduction de la rigidité des éprouvettes en présence d'une discontinuité de 24%. Des études complémentaires doivent être menées pour approfondir la caractérisation de la raideur normale équivalente du joint et évaluer sa raideur tangentielle. Dans la suite, un plan d'expérience détaillé sera mis en place pour étudier l'effet de la rugosité du joint, la densité des ponts rocheux et leur distribution, ainsi que l'effet de l'orientation du joint.

5. Remerciement :

Nous tenons à remercier Monsieur Olivier Ferry du CC Xgamma de l'Institut Jean Lamour (Université de Lorraine) pour son aide dans les analyses tomographiques.

6. Références bibliographiques

- Ashby M.F., Shercliff H., Cebon D. (2007). Materials: engineering, science, processing and design, 1st ed. ed. Butterworth-Heinemann, Amsterdam ; Boston.
- Berthoz N., Branque D., Subrin D., Wong H. (2013). Stress measurement in partially saturated soils and its application to physical modeling of tunnel excavation, Canadian Geotechnical Journal, n° 50, p. 1077 -1087
- E. Buckingham. On physically similar systems, illustration of the use ofdimensional equations. Physical review 4 (1914), n° 4, p. 345-376
- Fuenkajorn K., Phueakphum D. (2010). Physical model simulation of shallow openings in jointed rock mass under static and cyclic loadings. Eng. Geol. n° 113, p. 81–89
- Ghabraie B., Ren G., Zhang X., Smith J. (2015). Physical modelling of subsidence from sequential extraction of partially overlapping longwall panels and study of substrata movement characteristics. Int. J. Coal Geol. n° 140, p. 71–83
- Jiang C., Zhao G.-F. (2015). A Preliminary Study of 3D Printing on Rock Mechanics. Rock Mech. Rock Eng. n° 48, p. 1041–1050
- Jiang C., Zhao G.-F., Zhu J., Zhao Y.-X., Shen L. (2016). Investigation of dynamic crack coalescence using a gypsum-like 3D printing material. Rock Mech. Rock Eng. 49, 3983–3998.
- Li, Z., Liu, H., Dai, R., Su, X. (2005). Application of numerical analysis principles and key technology for high fidelity simulation to 3-D physical model tests for underground caverns. Tunn. Undergr. Space Technol. n° 20, p. 390–399
- Mair, R.; Gunn, M. & O'REILLY, M. (1982), Ground movement around shallow tunnels in soft clay, Tunnels& Tunnelling International, 14
- Mandel J., 1962, Essais sur modèle réduits en mécanique des terrains - Etude des conditions de similitude, Revue d'industrie minérale, n° 9, p. 611-620
- Matthieu Blanc, Luc Thorel, Rocio Isorna, Christophe Dano, Panagiotis Kotronis, et al. (2015). Centrifuge investigation of the axial cyclic behaviour of a single pile used for the foundation of a jacket type offshore wind turbine. */SFOG 2015, 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)*, Jun 2015, Oslo, Norway.
- Meguid M.A., Saada O., Nunes M.A., Mattar J. (2008). Physical modeling of tunnels in soft ground: A review. Tunn. Undergr. Space Technol. n° 23, p. 185–198
- Stimpson B. (1970). Modelling materials for engineering rock mechanics, in: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, p. 77–121.
- Sui W., Hang Y., Ma L., Wu Z., Zhou Y., Long, G., Wei, L. (2015). Interactions of overburden failure zones due to multiple-seam mining using longwall caving. Bull. Eng. Geol. Environ. n°74, p. 1019–1035
- Terzaghi, K. (1936), Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door. Proceedings of the international conference on soil mechanics, vol. 1. Harvard University. Press, Cambridge, MA, pp. 307–311
- Williams M., Yoon H., Choens R., Martinez M., Dewers T., Lee M. Power-based 3D printing application for geomechanical testing. (2017) AGU fall meeting, TH13A-1342.