



HAL
open science

Essai préliminaire de l'application de l'impression 3D à la modélisation physique des massifs rocheux

Jana Jaber, Marianne Conin, Olivier Deck, Olivier Godard, Samuel Kenzari

► To cite this version:

Jana Jaber, Marianne Conin, Olivier Deck, Olivier Godard, Samuel Kenzari. Essai préliminaire de l'application de l'impression 3D à la modélisation physique des massifs rocheux. *Revue française de Géotechnique*, 2021, 168, pp.1. 10.1051/geotech/2021011 . insu-03665932

HAL Id: insu-03665932

<https://insu.hal.science/insu-03665932>

Submitted on 19 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

Essai préliminaire de l'application de l'impression 3D à la modélisation physique des massifs rocheux

Jana Jaber^{1,2,*}, Marianne Conin¹, Olivier Deck¹, Olivier Godard³ et Samuel Kenzari³

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

² Andra, Direction Recherche et Développement, Centre de Meuse/Haute-Marne, 55290 Bure, France

³ Institut Jean Lamour, UMR 7198 CNRS, Université de Lorraine, Campus Artem, 54042 Nancy cedex, France

Résumé – Cet article présente une étude de l'applicabilité de l'impression 3D (3DP) en modélisation physique des massifs rocheux. Le comportement mécanique des massifs rocheux est contrôlé par les propriétés de la roche intacte, et par la présence des discontinuités rocheuses à différentes échelles. Afin de comprendre l'influence de ces discontinuités sur le comportement mécanique des ouvrages exploités dans un massif rocheux, la 3DP est utilisée pour introduire explicitement les discontinuités dans la modélisation physique. Des joints rocheux artificiels sont fabriqués en polyamide 12 par 3DP (technique de frittage laser SLS). Ils sont caractérisés géométriquement (rugosité, ouverture du joint, présence de ponts rocheux) et mécaniquement (raideur normale et tangentielle, cohésion, angle de frottement) pour reproduire le comportement d'un joint rocheux réel. Les résultats des joints rocheux sont représentés à l'échelle du prototype (échelle 1) en appliquant des lois de similitudes et comparés à des propriétés des joints réels. Finalement, une comparaison entre le comportement mécanique d'un massif rocheux discontinu numérique à l'échelle du prototype et celui d'un modèle réduit ayant les propriétés du PA12 obtenues par 3DP permet de valider la capacité de cette technique à reproduire le comportement d'un massif discontinu à une échelle réduite.

Mots clés : impression 3D / modélisation physique / discontinuité rocheuse

Abstract – Preliminary studies to 3D printing application for physical modeling of fractured rock mass. This paper investigates the 3D printing (3DP) application in physical modeling of rock masses. The mechanical behavior of the rock mass is controlled both by the properties of intact rock, and by the presence of discontinuities at different scales. To understand the influence of these discontinuities on the mechanical behavior of structures exploited within a rock mass, 3DP is used to model explicitly the discontinuities in physical modeling. Artificial rock joints are made of polyamide 12 by 3DP (SLS laser sintering technique). They are characterized geometrically (roughness, joint aperture, presence of rock bridges) and mechanically (normal and shear stiffness, cohesion, friction angle, etc.) to reproduce the behavior of a real rock joint. Then, the experimental results are translated to the prototype scale (scale 1) by applying scale factors and compared to the actual rock joints properties. Finally, numerical model of a rock mass at the prototype scale and at reduced scale with the experimental properties of PA12 are compared. The results validate the ability of this technique to reproduce the behavior of a discontinuous mass on a reduced scale.

Keywords: 3D printing / physical modelling / rock discontinuity

1 Introduction

La modélisation physique consiste à étudier des phénomènes à l'échelle réduite. Cette méthode utilisée depuis longtemps en géologie et en géotechnique (Everling, 1964; Garnier, 2001; Green, 2014; Piede, 1986), souvent en complément des modélisations numériques, permet d'obtenir

des résultats quantitatifs sous réserve d'appliquer des lois de similitudes (Clark, 1981; Buckingham, 1914; Mandel, 1962). Ces lois définissent les facteurs d'échelle appliqués à tout paramètre A du problème, pour assurer le passage de l'échelle réduite du modèle A_m , à l'échelle 1 du prototype A_p .

Dans le cas de la mécanique des roches, et plus spécifiquement de l'étude du comportement des massifs rocheux fracturés, les modèles physiques sont généralement sollicités sous gravité terrestre en utilisant des matériaux analogiques. L'une des difficultés majeures de ce type de

* Auteur de correspondance : jana.jaber@andra.fr

modélisation est de trouver des matériaux analogiques qui respectent les facteurs d'échelle, mais également de reproduire à l'échelle réduite le réseau de fractures avec sa géométrie complexe et ses effets sur le comportement mécanique.

Les massifs rocheux fracturés sont classiquement représentés par un massif continu équivalent en appliquant les méthodes d'homogénéisation (Davy *et al.*, 2018 ; Gerrard, 1982 ; Pouya et Ghoreychi, 2001). Les modèles sont construits avec des géomatériaux (*i.e.* du sable) mélangés généralement à des liants à des pourcentages différents. La proportion de chaque élément est choisie après différents tests de caractérisation mécanique afin d'obtenir les propriétés respectant les lois de similitudes (Lin *et al.*, 2015 ; Liu *et al.*, 2011). Le point de faiblesse de ces modèles est qu'ils ne prennent pas en compte explicitement l'effet des discontinuités qui, en fonction du volume représentatif élémentaire, doivent parfois être représentés explicitement dans un massif hétérogène. Quelques modèles sont cependant explicitement discontinus. Le premier groupe de modèles discontinus consiste à assembler des blocs réguliers. Les fractures correspondent donc à l'interface entre les blocs (Aydan *et al.*, 1989 ; Fuenkajorn et Phueakphum, 2010). Cependant, la géométrie ainsi créée, avec 2 familles de fractures orthogonales, reste très éloignée de celle classiquement observée dans les massifs rocheux. De plus, les interfaces entre les blocs ne sont pas caractérisées mécaniquement et donc les facteurs d'échelles sur les paramètres des joints ne sont pas respectés. De ce fait, les résultats obtenus avec ce type de modèles restent qualitatifs. Un deuxième groupe de modèles explicitement discontinus consiste à créer des plans de faiblesse entre différentes couches horizontales pour reproduire l'effet d'une stratification. Une méthode consiste par exemple à répandre une couche de sciure (Ghabraie *et al.*, 2015 ; He *et al.*, 2010 ; Sui *et al.*, 2015). Cette représentation géométrique reste très simplifiée et les propriétés des discontinuités sont peu maîtrisées.

Pour améliorer la représentation géométrique des discontinuités, une nouvelle technique, basée sur l'utilisation de la fabrication additive est en cours de développement. La fabrication additive est une technologie permettant de fabriquer des objets 3D à partir d'un modèle géométrique numérique CAO (Conception assistée par ordinateur). Les applications de la 3DP (*3D printing*) en géotechnique restent limitées : modélisation des structures par 3DP pour étudier l'interaction sol-structure (Ritter *et al.*, 2018 ; Stathas *et al.*, 2018) ou pour modéliser les structures (Feng *et al.*, 2015), et modélisation des éprouvettes construites par 3DP pour les caractériser mécaniquement et comparer leur comportement à celui des géomatériaux.

Jiang et Zhao (2015) sont parmi les premiers à tester l'applicabilité de la 3DP en mécanique des roches. Ils ont étudié le comportement d'éprouvettes en PLA (acide polylactique) par la technique FDM (*fused deposition material*). Plusieurs matériaux ont pu être testés (Jiang *et al.*, 2016c ; Zhou et Zhu, 2018). Fereshtenejad et Song (2016) ont mis en évidence l'effet des paramètres d'impression sur le comportement en compression uniaxiale d'éprouvettes fabriquées. Différentes techniques et matériaux ont été utilisés pour tester la capacité de la 3DP à modéliser la porosité des roches : sable, résine (Gomez *et al.*, 2019 ; Head et Vanorio, 2016 ; Ishutov *et al.*, 2015). Liu *et al.* (2016) et Suzuki *et al.* (2016) ont généré un réseau de fractures pour étudier le comportement hydraulique

d'une éprouvette. La 3DP est appliquée aussi en mécanique des roches pour étudier la propagation des fissures et la génération d'un DFN (*Discrete Fracture Network*). Jiang *et al.* (2016a) et Sharafisafa *et al.* (2018) ont utilisé le $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$, un matériau de la famille des gypses, pour étudier sa capacité à reproduire une propagation de fissures à partir d'un défaut préexistant dans la matrice. Zhou *et al.* (2019) et Zhu *et al.* (2018) ont utilisé, dans la même thématique, la résine transparente qui permet de visualiser le mode de propagation à l'intérieur de l'éprouvette. Une troisième application de la 3DP en mécanique des roches est la visualisation de la distribution des contraintes dans le massif rocheux en fonction du réseau de fracture. Les matériaux utilisés sont des polymères photoélastiques. Ju *et al.* (2014, 2017) et Wang *et al.* (2017) ont étudié la distribution des contraintes dans des éprouvettes en 3DP simulant des formations rocheuses, en présence d'hétérogénéités. Dans l'ensemble, ces essais restent préliminaires et n'abordent pas la question du respect des lois de similitude, étape indispensable pour utiliser la 3DP en modélisation physique à l'échelle réduite. Un autre aspect manquant dans les travaux présentés est la question des propriétés mécaniques des joints rocheux : l'intérêt est focalisé plutôt sur le comportement global du massif. Jiang *et al.* (2016b) ont cependant étudié la capacité de la 3DP à reproduire la rugosité des joints rocheux. Pour cela, ils ont généré un modèle CAO à partir d'un nuage de points récupéré par un scan 3D de joints rocheux réels. Le modèle 3DP est un moule utilisé pour construire des éprouvettes de cisaillement en béton ou ciment. La fabrication additive est, dans ce cas, utilisée pour reproduire la géométrie et non pas pour caractériser mécaniquement le joint artificiel. Ishibashi *et al.* (2020) ont utilisé eux aussi la 3DP pour construire des joints rocheux artificiels générés à partir d'une dimension fractale. Ils ont étudié en plus le comportement hydromécanique de ces joints sous cisaillement. Ils ont réussi à reproduire un comportement mécanique comparable à celui des joints rocheux naturels.

À l'échelle des ouvrages, seuls Song *et al.* (2018) ont construit un modèle réduit d'un tunnel pré-excavé en 3DP. Leur massif a une dimension totale de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ et est fabriqué avec une imprimante à base de gypse. Cependant, les notions de facteur d'échelle et de loi de similitude ne sont pas évoquées dans l'article, les dimensions sont petites, et le massif est considéré homogène.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'apport des techniques d'impression 3D pour créer un modèle réduit de massif rocheux discontinu. Sous l'hypothèse que la réponse mécanique du massif rocheux est intimement liée au comportement mécanique de ses joints, l'étape essentielle de ce travail consiste à fabriquer des joints rocheux par 3DP qui respectent les comportements mécaniques classiques des joints (*e.g.* Barton, 1973) et dont les propriétés mécaniques respectent les facteurs d'échelle. Ceci nous permettra dans le futur de réaliser des modèles réduits de massifs rocheux explicitement discontinus. Pour cela, les propriétés mécaniques (raideur, cohésion et frottement) des joints sont contrôlées en jouant sur la rugosité de la surface du joint, et sur la présence de ponts rocheux entre les deux épontes (Jaber *et al.*, 2020). Le matériau utilisé est un polymère (PA12) et la technique d'impression utilisée est le frittage laser (SLS). Dans un second temps, nous abordons explicitement la question des lois de similitudes pour apprécier l'applicabilité de cette technologie à la modélisation physique en mécanique des roches.

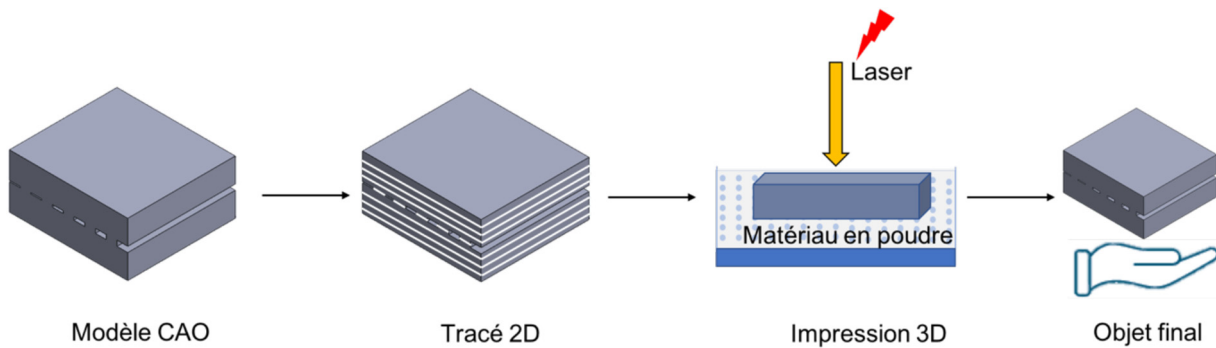


Fig. 1. Processus de la fabrication additive, technique SLS.
Fig. 1. 3D printing process of the SLS technology.

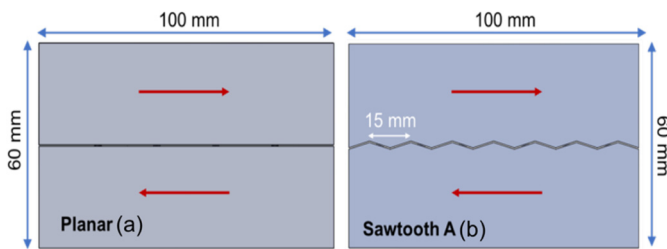


Fig. 2. Les géométries des joints construits par 3DP: (a) joint planaire; (b) joint en dents de scie.
Fig. 2. The 3DP joint geometry: (a) planar joint; (b) sawtooth joint.

2 Caractérisation mécanique des joints en 3DP

La technologie utilisée repose sur le frittage laser sélectif (SLS) des polymères (le polyamide 12, PA12 dans notre cas). Le processus de fabrication est présenté sur la [figure 1](#). La SLS est susceptible de permettre la fabrication réaliste d'objets possédant les caractéristiques géométriques des milieux rocheux constitués de blocs séparés par des discontinuités.

Les paramètres d'impression ont été maintenus identiques pour toutes les fabrications, quels que soient leur forme et leur type afin de garantir des propriétés intrinsèques uniformes entre toutes les éprouvettes ([Zarringhalam et al., 2006](#)).

2.1 Conception des joints

Des essais de cisaillement sous contrainte normale constante (CNL) sur des joints artificiels construits par 3DP sont réalisés au laboratoire GeoRessources. Ce travail est une première étude de faisabilité. Il est plus raisonnable de commencer par des configurations de joints simples à paramètres quantifiables. De ce fait, les joints sont définis comme étant une combinaison des paramètres suivants :

- une ouverture à épaisseur fixe de 0,4 mm. Ce choix est fait pour s'assurer que le joint est ouvert et qu'il n'y a pas de phénomène de fusion de poudre non désirable lié à des effets thermiques ;

- une géométrie équivalente à une rugosité. Cette géométrie prend des formes simplifiées correspondant aux modèles idéaux typiques existant dans la littérature ([Fig. 2](#)) ;
- des ponts rocheux. La notion de ponts rocheux est utilisée généralement dans les études liées à la stabilité des pentes et chutes des blocs. Bien que leur forme soit irrégulière dans la nature, les ponts modélisés dans cette étude sont uniformes et répartis d'une manière symétrique sur la surface des joints. Il s'agit de plots cylindriques, de diamètre fixe de 2,5 mm liant les deux interfaces de la discontinuité. Mécaniquement, les ponts participent à l'augmentation de la résistance au cisaillement et donnent une cohésion apparente au joint ([Bonilla-Sierra et al., 2015](#) ; [Einstein et al., 1983](#) ; [Sturzenegger et Stead, 2012](#)).

2.2 Interprétation des résultats

Quarante-six essais ont été réalisés en faisant varier le nombre de ponts, la géométrie, et la contrainte normale appliquée σ_n . Tous les essais présentent la même tendance. De ce fait, deux géométries différentes sont détaillées : un joint planaire à 25 ponts et un joint en dents de scies à 18 ponts rocheux.

Les résultats montrent que les joints artificiels ont un comportement similaire au comportement classique d'un joint rocheux ([Figs. 3–4](#)). Les courbes de contrainte tangentielle *versus* déplacement tangentiel ($\tau vs u_t$) présentent une première phase linéaire, permettant d'estimer la raideur tangentielle du joint k_s , un pic correspondant à la résistance au cisaillement maximale τ_{pic} , suivie d'une diminution de la contrainte tangentielle jusqu'à atteindre une valeur résiduelle τ_{res} .

Afin de vérifier l'évolution de la résistance des joints en fonction des contraintes normales appliquées et de définir leur critère de rupture, des essais sont réalisés sous différentes valeurs de contraintes normales σ_n ([Fig. 4](#)). Les résultats montrent une augmentation de τ_{pic} avec l'augmentation de σ_n , du nombre de ponts rocheux et de la présence des aspérités.

La raideur tangentielle k_s est du même ordre de grandeur pour tous les essais. Elle varie entre 0,5 MPa/mm et 5 MPa/mm, avec une valeur moyenne de 1,7 MPa/mm ([Jaber, 2020](#)). Toutefois, il est difficile de trouver une corrélation entre les raideurs des différents essais et les paramètres des joints à

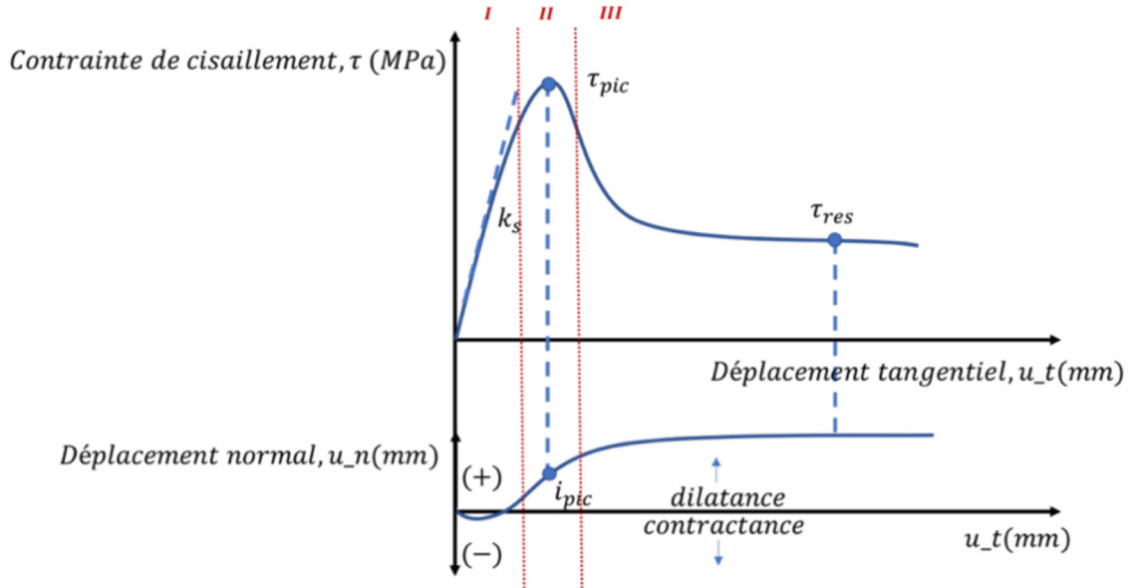


Fig. 3. Comportement mécanique typique des joints rocheux en cisaillement.
Fig. 3. Typical behaviour of rock joints under shearing test.

cause des incertitudes liées à l’ajustement des éprouvettes dans le dispositif et le rattrapage des déplacements horizontaux au début de l’essai. La différence entre les résistances maximale et résiduelle est expliquée classiquement par la destruction des aspérités (Goodman, 1976 ; Homand *et al.*, 2001). Dans notre cas, elle est le résultat de la rupture des ponts rocheux sachant que les aspérités restent presque intactes à la fin d’un test.

Les résultats obtenus pour les courbes de dilatance sont aussi en accord avec la littérature : seuls les joints ayant des aspérités montrent un comportement dilatant avec une dilatance de 13°, proche de l’angle de l’aspérité 15° (Patton, 1966). Les joints planaires présentent un déplacement normal négligeable, dû à la présence des ponts rocheux.

En se basant sur les 46 essais, un critère de rupture prenant en compte explicitement l’effet de l’angle de l’aspérité θ et du nombre des ponts rocheux N_{rb} est généré par analyse statistique.

Le modèle le plus significatif statistiquement est présenté dans les équations (1) et (2). Il est initialement développé dans Jaber *et al.* (2020) et puis modifié dans Jaber (2020). Les paramètres statistiques sont exposés dans le tableau 1 :

$$\tau_{pic} = \sigma_n \tan(23,5 + \theta) + 0,0135 N_{rb} \text{ avec } R^2 = 0,982, \quad (1)$$

$$\tau_{res} = \sigma_n \tan(21,8 + \theta) \text{ avec } R^2 = 0,938. \quad (2)$$

Le critère au pic est formé par deux composantes principales. La première est l’angle de frottement global $\varphi_j = (23,5^\circ + \theta)$. Il est le résultat de la somme de l’angle de frottement de base du joint et de l’angle de l’aspérité θ . On retrouve cette représentation d’angle de frottement dans le modèle classique de Patton. La deuxième composante est la cohésion du joint c_j . Celle-ci est liée explicitement au nombre de ponts rocheux $(0,0135 N_{rb})$.

Pour le critère de rupture résiduel, la cohésion est considérée nulle suite à la rupture des ponts. Seul l’angle de frottement résiduel $\varphi_{j,r}$ joue un rôle. $\varphi_{j,r}$, pareillement à l’angle de frottement au pic, est formé par une combinaison d’un angle de frottement résiduel pour un joint planaire et de l’angle de l’aspérité. Il est estimé à 21,8° en absence d’aspérités, légèrement inférieur à l’angle de base sans aspérités. Généralement, dans la nature, l’angle de frottement de base est du même ordre de grandeur que l’angle résiduel, à quelques degrés près, ce qui est en accord avec nos résultats.

3 Application des facteurs d’échelles

Si les joints artificiels en PA12 sont capables de reproduire qualitativement le comportement global des joints rocheux, il faut également vérifier qu’ils sont représentatifs des roches à une échelle réduite. La première étape consiste donc à définir les facteurs d’échelle nécessaires à notre étude. Il existe plusieurs méthodes pour calculer les facteurs d’échelle $A^* = A_m/A_p$, dont le théorème de Vashy-Buckingham. Il est utilisé pour calculer les facteurs d’échelle des paramètres de la roche intacte (ρ, E, ν, c, φ) et des joints ($\psi_j, \varphi_j, c_j, k_s$ et k_n). Avec E le module d’Young en MPa, ρ la masse volumique en kg/m^3 , ν le coefficient de Poisson, c la cohésion de la roche en MPa, φ l’angle de frottement interne de la roche, ψ_j la dilatance du joint, et k_n et k_s les raideurs normale et tangentielle du joint en MPa/mm. Les résultats sont présentés dans les équations (3) à (7) :

$$E^* = \rho^* g^* L^*, \quad (3)$$

$$\nu^* = 1, \quad (4)$$

$$\varphi_j^* = \varphi^* = \psi_j^* = 1, \quad (5)$$

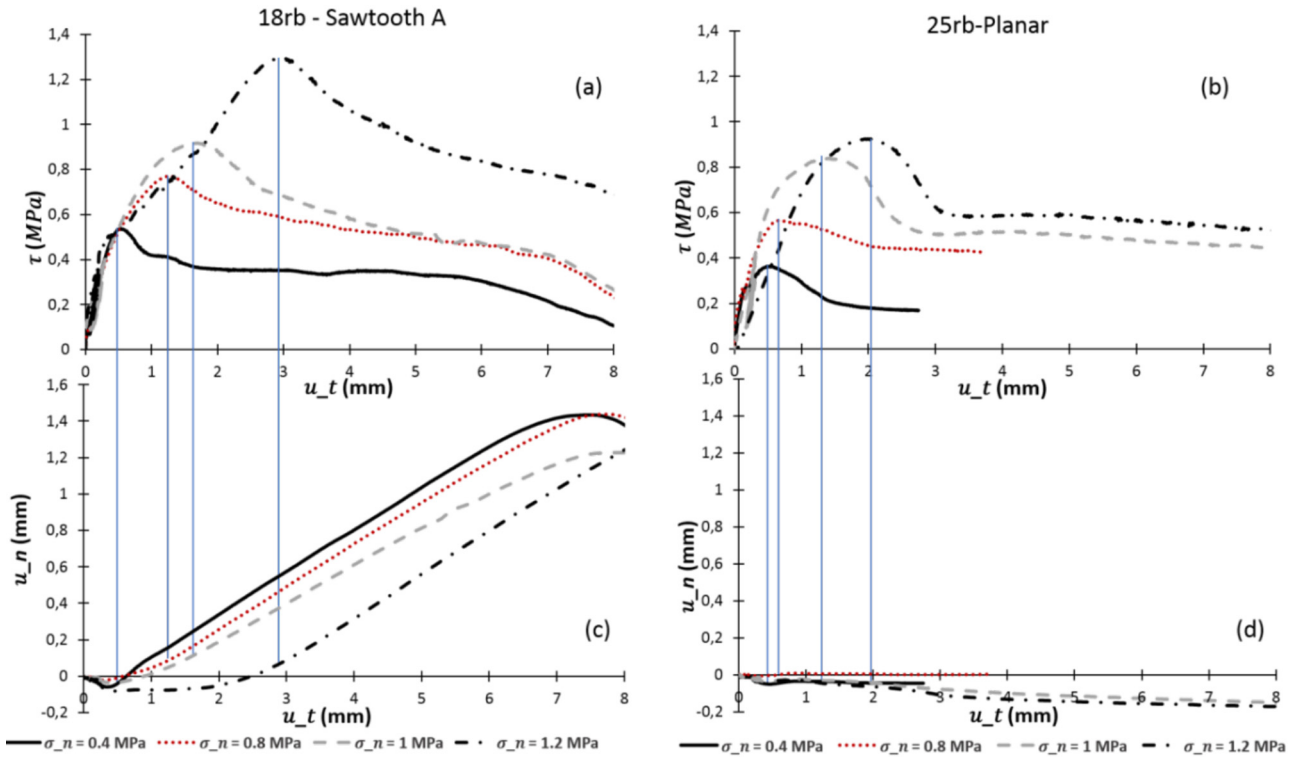


Fig. 4. Les courbes de cisaillement (a et b) et de dilatance (c et d) des géométries 18rb-Sawtooth A et 25rb-Planar à différentes contraintes normales.
Fig. 4. Shear (a and b) and dilation (c and d) curves tests for 18rb-Rough A joints and 25rb-Planar joints at different normal stresses.

Tableau 1. Expression de la cohésion et de l’angle de frottement des joints (au pic et résiduel) issus du modèle statistique, avec les paramètres statistiques correspondants.

Table 1. Friction angle and joint cohesion expression of the statistical model, at peak and residual states, with the corresponding statistical parameters.

	Estimation	Erreur type	t-statistique	P-value
φ_j [°]	$23,5 + \theta$	0,0245	16,79	$8,42 \times 10^{-17}$
c_j [MPa]	$0,0135 Nrb$	0,00068	19,77	$9,24 \times 10^{-19}$
$\varphi_{j,r}$ [°]	21,8	0,0126	30,43	$1,17 \times 10^{-24}$

$$c_j^* = c^* = E^*, \tag{6}$$

$$k_{n/s}^* = \frac{E^*}{L^*} = \frac{\sigma^*}{L^*}. \tag{7}$$

L’application de ce théorème permet de vérifier que les paramètres adimensionnels restent inchangés entre le prototype et le modèle réduit, et les paramètres ayant la même unité subissent la même mise à l’échelle.

Les facteurs d’échelle calculés à partir des lois de similitude sont appliqués aux propriétés du matériau et des joints artificiels issus des essais mécaniques. En modélisation physique, il existe des facteurs d’échelle imposés par le choix de matériau et du dispositif expérimental : L^* , g^* et ρ^* . Il est difficile généralement de respecter les facteurs d’échelle sur tous les paramètres du modèle. Le choix de respecter ou pas un facteur d’échelle dépend de la nature du problème à étudier. À titre d’exemple, si une étude statique d’un ouvrage souterrain à

grande profondeur est réalisée avec un recouvrement modélisé implicitement par un chargement extérieur imposé au massif, le facteur d’échelle sur la masse volumique du petit volume explicitement représenté (un ouvrage de 5 m de haut sous 1 km de recouvrement par exemple) peut ne pas être pris en compte. Ceci donne plus de liberté sur l’application des lois de similitude aux autres paramètres du problème. Par contre, si le but est d’étudier l’affaissement en surface lié à une excavation souterraine, l’intégralité du recouvrement doit être modélisée avec un respect du facteur d’échelle sur la masse volumique. Dans cette application, nous considérons le cas le plus critique, en imposant des facteurs d’échelle sur tous les paramètres. L^* dépend des dimensions du dispositif expérimental. On considérera ici deux ordres de grandeurs : $L^* = 1/10$ ou $1/25$. ρ^* dépend du matériau à l’échelle réelle sachant que les propriétés mécaniques du matériau analogique (PA12) sont imposées : $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ et $E = 1600 \text{ MPa}$. g^* dépend de la nature du dispositif : centrifugeuse ou sous gravité terrestre ; dans notre cas, $g^* = 1$.

Tableau 2. Valeurs typiques des paramètres des roches issues de la littérature (à partir de Barton, 1973 ; Barton et Choubey, 1977 ; Kulhawy, 1975 ; Kulhawy, 1978 ; Mestat, 1993 ; Rachez, 1997).

Table 2. Typical values for rock parameters, as found in literature (from Barton, 1973; Barton and Choubey, 1977; Kulhawy, 1975; Kulhawy, 1978; Mestat, 1993; Rachez, 1997).

Roches	c [MPa]	φ [°]	E [GPa]	C_j [MPa]	φ_j [°]	k_n [MPa/mm]	k_s [MPa/mm]
Intervalle général (min–max)	0–70,6	7,5–51	0,050–110	0–2,69	7–55,8	3,8–46	0,02–29,8
Basalte			20–70	0,24	31–42		
Grès	8–27,2	27,8–45,2	5–60		25–34	35,1	1,29
Argile				0–0,18	12–18,5		
Calcaire	6,72	42	2–80	0	25	3,8–46	0,7–17

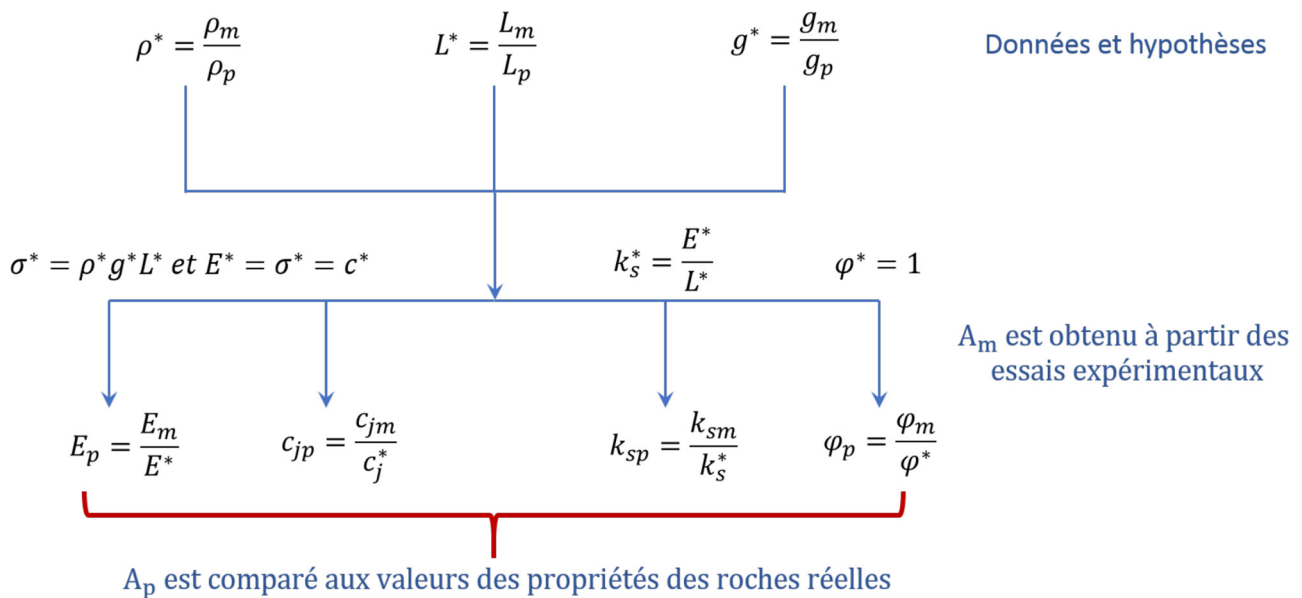


Fig. 5. Schéma de calcul des propriétés à l'échelle du prototype, à partir des essais expérimentaux.

Fig. 5. Scale factor application to rock mechanics, based on experimental results.

Les résultats sont comparés à l'ordre de grandeur des propriétés des roches trouvées dans la nature (Tab. 2) afin d'étudier les limites d'application de cette technique. Le schéma de la figure 5 illustre les étapes d'application des facteurs d'échelle permettant d'atteindre l'objectif.

Les résultats pour les deux facteurs d'échelle sont présentés respectivement dans le tableau 3. En suivant la procédure expliquée dans la figure 5, et en calculant les A_m à partir des 46 essais en fonction de N_{rb} et θ de chaque test. L'intervalle choisi pour ρ* est 0,3 ≤ ρ* ≤ 0,5, ce qui correspond à une roche réelle ayant une masse volumique comprise entre 2000 et 3300 kg/m³. La comparaison de ces résultats avec les valeurs du tableau 2 montre qu'une grande partie des paramètres de PA12 sont convenables pour la modélisation des massifs discontinus, mais qu'il reste quelques propriétés à mieux contrôler :

- pour L* = 1/10, les paramètres k, E et φ_j tombent dans les intervalles de valeurs trouvées pour les roches. Par contre, la cohésion des joints artificiels est élevée par rapport à ce qu'on trouve dans la nature. Celle-ci est liée à la présence des ponts et à leur pourcentage ;

- pour L* = 1/25, les paramètres k_s et φ_j tombent dans les intervalles de valeurs trouvées pour les roches. Le module de Young obtenu à l'échelle du prototype se situe vers la borne supérieure de ce que peut se trouver dans la nature, voire même le dépasse faiblement. Concernant la cohésion du joint, ses valeurs à l'échelle du prototype sont largement plus élevées de ce qui est attendu.

L'utilisation de l'impression 3D en PA12, pour une application en mécanique des roches, semble donc réaliste sous réserve de se limiter à des facteurs d'échelle autour de L* = 1/10. Elle nécessite toutefois d'ajuster la cohésion des joints du modèle en limitant le nombre de ponts rocheux. L'application de l'équation 1, permet ici d'estimer à 8 ponts/100 cm² de joint la limite supérieure à respecter (pour des ponts de 2,5 mm de diamètre). Une alternative complémentaire consiste à réduire également la section des ponts. Pour une application à des facteurs d'échelle autour de L* = 1/25, il convient de réduire le module de Young de la matrice (le PA12). Une possibilité est l'architecture du matériau. En d'autres termes, il est possible d'introduire des vides dans la matrice des PA12 en recréant sa structure, et en optimisant le changement de densité et de module

Tableau 3. Valeurs expérimentales des propriétés des joints (en italique gras) et ses valeurs correspondantes à l'échelle 1 après application des facteurs d'échelle pour $L^* = 1/10$ et $L^* = 1/25$.

Table 3. Experimental range for joint parameters (*italic bold characters*) and their corresponding values at real scale after applying scale factors for $L^* = 1/10$ and $L^* = 1/25$.

	Facteurs d'échelle	xchelle réduite A_m	Résultats à l'échelle du prototype A_p
L	1/10		
E [GPa]	$0,03 \leq E^* \leq 0,05$	1,600	$3,2 \leq E_p \leq 53,33$
c_j [MPa]	$0,03 \leq c^* \leq 0,05$	0,0–1,97	$0 \leq c_j \leq 65,67$
φ_j [°]	$\varphi^* = 1$	21,8–38,5	$21,8 \leq \varphi_j \leq 38,5$
K_s [MPa/mm]	$0,3 \leq k_s^* \leq 0,5$	0,7–5,6	$1,4 \leq k_s \leq 18,7$
L	1/25		
E [GPa]	$0,012 \leq E^* \leq 0,02$	1,600	$80 \leq E_p \leq 133$
c_j [MPa]	$0,012 \leq c^* \leq 0,02$	0,0–1,97	$0 \leq c_j \leq 164,17$
φ_j [°]	$\varphi^* = 1$	21,8–38,5	$21,8 \leq \varphi_j \leq 38,5$
k_s [MPa/mm]	$0,3 \leq k_s^* \leq 0,5$	0,7–5,6	$1,4 \leq k_s \leq 18,7$

d'Young. De cette manière, le module de Young équivalent de la matrice, sans joint rocheux, sera réduit. Il faut toutefois architecturer le matériau de manière à ce que ces défauts introduits ne dominent pas et que le comportement soit contrôlé par les discontinuités majeures introduites et qui représentent les fractures rocheuses préexistantes.

4 Validation de l'utilisation du PA12-3DP en modélisation physique

Le but de cette partie est de comparer 3 modèles numériques afin d'évaluer si les écarts observés dans le respect des lois de similitudes sont rédhibitoires ou non pour une utilisation du PA12 associé à l'impression 3D en mécanique des roches. Les propriétés des modèles A, B et C sont présentées dans le **tableau 4**. Les calculs sont réalisés avec le logiciel de modélisation discontinue aux différences finies UDEC :

- modèle A : modèle numérique représentant le prototype (Fig. 6) ;
- modèle B : modèle réduit numérique idéal respectant l'ensemble des lois de similitude ($L^* = 1/10$) ;
- modèle C : modèle réduit numérique réaliste utilisant les propriétés du PA12 et ne respectant pas l'ensemble des lois de similitudes ($L^* = 1/10$).

Les différences principales entre B et C résident dans les propriétés plastiques de la matrice (c et φ).

Le prototype est formé par un bloc de 10 m de largeur et 5 m de hauteur, traversé par deux familles de discontinuités. Les joints et la roche intacte ont une rhéologie de type Mohr-Coulomb. Le prototype est soumis à des contraintes de confinement horizontales, et une contrainte verticale. Une fois l'équilibre statique initial atteint, un déplacement vertical est imposé en surface jusqu'à atteindre la rupture. Celle-ci est identifiée par une rupture au niveau des joints et par une limite de plasticité sur la courbe $(\sigma_n - u_n)$, où u_n le déplacement vertical. Les contraintes verticales sont calculées sur une coupe à 10 % du bord supérieur. La famille des joints 1 atteint sa

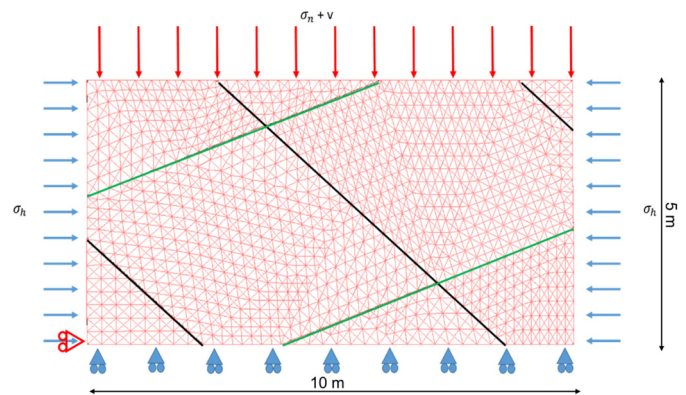


Fig. 6. Modèle UDEC du bloc traversé par deux familles de discontinuité.
Fig. 6. UDEC model of a rock discontinuous block.

limite de rupture en cisaillement avant la famille 2 (Fig. 7) dans les 3 modèles, en accord avec le fait que leur pendage est supérieur à l'angle de frottement de la roche intacte, et à celui de la famille 2.

Les courbes $(\sigma_n - u_n)$ des 3 modèles sont tracés sur un même graphe, en tradant tous les résultats à l'échelle 1 (Fig. 8). Les courbes des modèles A et B se superposent parfaitement en accord avec le fait que les lois de similitude ont été parfaitement respectées. La partie élastique est équivalente entre les trois modèles. Ceci est dû au respect des facteurs d'échelle pour E et k_s . Le faible écart des k_s entre B et C a donc un effet négligeable. Malgré le fait que le critère de plasticité du PA12 soit très supérieur au critère de plasticité du modèle réduit idéal, on observe une faible différence entre le comportement macroscopique des deux modèles réduits pour une déformation inférieure à 0,0016. Cette faible différence à $\varepsilon = 0,0016$ (62 MPa pour A et B contre 65 MPa pour C) est liée principalement à la différence entre la cohésion des joints en PA12 et celle du modèle théorique B. Pour une déformation supérieure à 0,0016, les écarts entre les modèles B et C augmentent significativement. Cet écart est la conséquence du critère de plasticité très élevé du PA12 qui conduit à une absence de plasticité dans le modèle C, contrairement aux

Tableau 4. Propriétés mécaniques des roches et joints, dans le modèle théorique A, le modèle réduit théorique B et le modèle réduit en utilisant le PA12C.

Table 4. Mechanical properties of rock and joints for the prototype A, theoretical reduced scale model B and the reduced scale m.

		ρ (kg/m ³)	E (GPa)	ν	φ	c (MPa)	R_t (MPa)	k_n (MPa/mm)	k_s (MPa/mm)	θ
A	Roche	2400	40	0,3	30	30	34			
	Joints 1				25	2	0,5	46	2.6	-40
	Joints 2				25	2	0,5	46	2.6	20
	A*	5/12	5/120	1	1	5/120	5/120	5/12	5/12	1
B	Roche	1000	1,67	0,3	30	1,25	1,42			
	Joints 1				25	0,084	0,02	18,75	1,67	-40
	Joints 2				25	0,084	0,02	18,75	1,67	20
C	Roche	1000	1,6	0,3	5	24	45			
	Joints 1				23,5	0,16	0,02	24	1,7	-40
	Joints 2				23,5	0,16	0,02	24	1,7	20

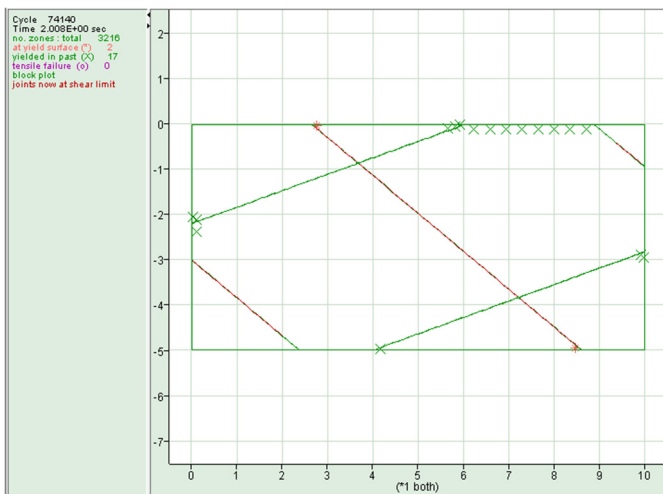


Fig. 7. Rupture des joints de la famille 1 ; la famille 1 atteint la rupture en cisaillement (en rouge) avant la deuxième famille (verte).

Fig. 7. Shear failure of the joints family one (in red) before the family 2 (green).

modèles A et B (Fig. 9). Il en résulte que l'application du PA12 à la modélisation physique en mécanique des roches doit être limitée aux situations où le comportement d'ensemble et la rupture sont pilotés par les discontinuités. Il ne pourrait pas être appliqué pour une modélisation réduite dans un massif homogénéisé.

5 Conclusion

Cet article présente une étude de l'applicabilité de l'impression 3D en modélisation physique des massifs rocheux fracturés. Cette technique est proposée dans le but de permettre une représentation explicite des joints rocheux en modélisation physique, tout en contrôlant les propriétés mécaniques de ces

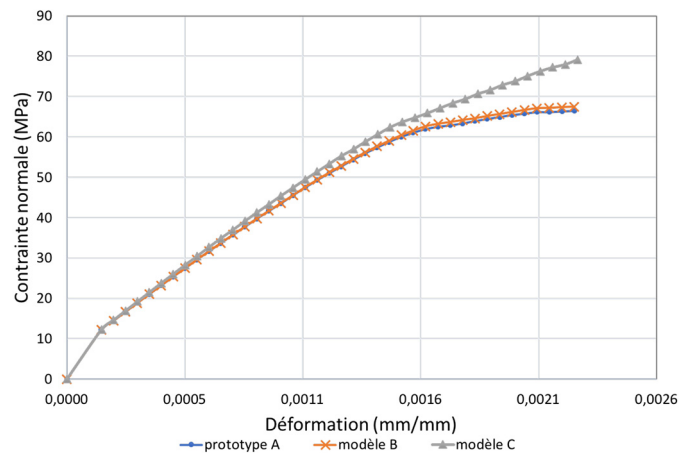


Fig. 8. Contraintes normales en fonction de la déformation axiale pour les 3 modèles après translation à l'échelle 1.

Fig. 8. Normal stress versus axial deformation for the 3 UDEC discontinuous model at scale 1.

joints afin de les mettre à l'échelle et de respecter les lois de similitudes. Les résultats montrent que cette technique est très précise et permet de reproduire fidèlement les géométries demandées. Les essais de cisaillement ont montré que les joints en 3DP ont un comportement mécanique équivalent à celui des roches réelles (phase élastique suivie d'un pic et d'une résistance résiduelle), ce qui permet de définir un critère de rupture prenant en compte explicitement les paramètres contrôlés des joints (géométrie et nombre de ponts rocheux) et qui s'approche des critères classiques que l'on trouve dans la littérature.

Les résultats de l'analyse des lois de similitudes montrent que la raideur tangentielle et l'angle de frottement des joints imprimés en 3DP sont compatibles avec les valeurs trouvées pour les roches. Le module d'Young du PA12 peut être convenable jusqu'à une certaine limite ($L^* = 1/25$). Cependant,

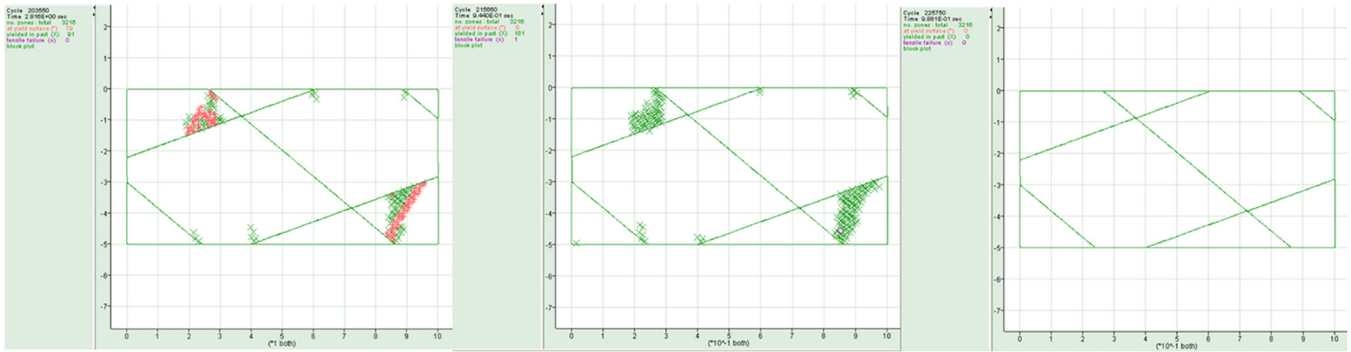


Fig. 9. Localisation de la plasticité en fin d’essai pour les 3 modèles : A (à gauche), B (au centre) et C (à droite).
Fig. 9. Plasticity propagation at the end of the test for the 3 models: A (left), B (center) and C (right).

pour des facteurs d’échelle plus faibles, la matrice devient rigide par rapport à l’échelle du prototype. La cohésion du joint doit quant à elle être réduite par une réduction du nombre de ponts rocheux ou de leur surface. La modélisation numérique d’un massif rocheux discontinu et de son modèle réduit correspondant en utilisant le PA12 a montré un respect du comportement global élastique et de la limite de plasticité engendrée par la rupture des joints. Cependant, le PA12 est incapable de simuler le comportement de la roche intacte à cause de ses propriétés de plasticité élevées. L’utilisation de la 3DP en modélisation physique des massifs rocheux explicitement discontinus est prometteuse et permet surtout de reproduire des joints à propriétés mécaniques contrôlées. Des études supplémentaires sont donc à poursuivre dans le but de passer à la modélisation physique grande échelle.

Conflits d’intérêts

Les auteurs déclarent n’avoir aucun lien d’intérêt concernant les données publiées dans cet article.

Liste des symboles

A_m	Paramètre A à l’échelle du modèle réduit
A_p	Paramètre A à l’échelle réelle du prototype
A^*	Facteur d’échelle sur le paramètre A
CAO	Conception assistée par ordinateur
3DP	3D printing, impression 3D
PLA	Acide polylactique
FDM	<i>Fused Deposition Material</i>
DFN	<i>Discrete Fracture Network</i>
PA12	Polyamide 12
SLS	Frittage laser sélectif
CNL	Contrainte normale constante
σ_n	Contrainte normale (MPa)
τ	Contrainte tangentielle (MPa)
u_t	Déplacement tangentiel (mm)
u_n	Déplacement vertical (mm)
k_s	Raideur tangentielle du joint (MPa/mm)
k_n	Raideur normale (MPa/mm)
τ_{pic}	Résistance au cisaillement maximale
τ_{res}	Résistance au cisaillement résiduelle
φ_j	Angle de frottement du joint

$\varphi_{j,r}$	Angle de frottement résiduel du joint
θ	Angle des aspérités
N_{rb}	Nombre de ponts rocheux
c_j	Cohésion du joint
E	Le module de Young en MPa
ρ	La masse volumique en kg/m^3
ν	Le coefficient de Poisson
c	La cohésion de la roche en MPa
φ	L’angle de frottement interne de la roche
ψ_j	La dilatance du joint
R_t	Résistance à la traction de la roche (MPa)

Remerciements. La bourse de thèse de Jana Jaber a été financée par le ministère de l’Enseignement supérieur et de la Recherche, et le projet a bénéficié d’une bourse de l’institut Carnot-ICÉEL.

Références

Aydan Ö, Shimizu Y, Ichikawa Y. 1989. The effective failure modes and stability of slopes in rock mass with two discontinuity sets. *Rock Mech Rock Eng* 22: 163–188. <https://doi.org/10.1007/BF01470985>.

Barton N. 1973. Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Eng Geol* 7: 287–332. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6).

Barton N, Choubey V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech* 10: 1–54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>.

Bonilla-Sierra V, Scholtès L, Donzé F, Elmoultie M. 2015. DEM analysis of rock bridges and the contribution to rock slope stability in the case of translational sliding failures. *Int J Rock Mech Min Sci* 80: 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2015.09.008>.

Buckingham E. 1914. On physically similar systems, illustration of the use of dimensional equations. *Phys Rev* 4: 345–376. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.345>.

Clark GB. 1981. Geotechnical centrifuges for model studies and physical property testing of rock and rock structures. *Colorado Sch Mines Q* 76(4).

Davy P, Darcel C, Le Goc R, Mas Ivars D. 2018. Elastic properties of fractured rock masses with frictional properties and power law fracture size distributions. *J Geophys Res Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2017JB015329>.

- Einstein HH, Veneziano D, Baecher GB, O'Reilly KJ. 1983. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Elsevier, pp. 227–236. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90003-7).
- Everling G. 1964. Model tests concerning the interaction of ground and roof support in gate-roads. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Elsevier, pp. 319IN5323–322IN16326. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(64\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(64)90002-6).
- Feng P, Meng X, Chen JF, Ye L. 2015. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. *Constr Build Mater* 93: 486–497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132>.
- Fereshtenejad S, Song JJ. 2016. Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics. *Rock Mech Rock Eng* 49: 2065–2074. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0904-x>.
- Fuenkajorn K, Phueakphum D. 2010. Physical model simulation of shallow openings in jointed rock mass under static and cyclic loadings. *Eng Geol* 113: 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.03.003>.
- Garnier J. 2001. Modèles physiques en géotechnique : I – Évolution des techniques expérimentales et des domaines d'application (1). *Rev Fr Geotech*: 3–29. <https://doi.org/10.1051/geotech/2001097003>.
- Gerrard CM. 1982. Equivalent elastic moduli of a rock mass consisting of orthorhombic layers. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Elsevier, pp. 9–14. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(82\)90705-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(82)90705-7).
- 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* 140: 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.01.004>.
- Gomez JS, Chalaturnyk RJ, Zambrano-Narvaez G. 2019. Experimental investigation of the mechanical behavior and permeability of 3D printed sandstone analogues under triaxial conditions. *Transp Porous Media* 129: 541–557. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1177-0>.
- Goodman RE. 1976. Methods of geological engineering in discontinuous rocks. West New York.
- Green DL. 2014. Modelling geomorphic systems: scaled physical models. *Geomorphol Tech* 18. ISSN 2047-0371.
- He M, Jia X, Gong W, Faramarzi L. 2010. Physical modeling of an underground roadway excavation in vertically stratified rock using infrared thermography. *Int J Rock Mech Min Sci* 47: 1212–1221. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.06.020>.
- Head D, Vanorio T. 2016. Effects of changes in rock microstructures on permeability: 3-D printing investigation: permeability of printed microstructures. *Geophys Res Lett* 43: 7494–7502. <https://doi.org/10.1002/2016GL069334>.
- Homand F, Belem T, Souley M. 2001. Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 25: 973–999. <https://doi.org/10.1002/nag.163>.
- Ishibashi T, Fang Y, Elsworth D, Watanabe N, Asanuma H. 2020. Hydromechanical properties of 3D printed fractures with controlled surface roughness: insights into shear-permeability coupling processes. *Int J Rock Mech Min Sci* 128: 104271. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104271>.
- Ishutov S, Hasiuk FJ, Harding C, Gray JN. 2015. 3D printing sandstone porosity models. *Interpretation* 3: SX49–SX61. <https://doi.org/10.1190/INT-2014-0266.1>.
- Jaber J, Conin M, Deck O, Moumni M, Godard O, Kenzari S. 2020. Investigation of the mechanical behavior of 3D printed polyamide-12 joints for reduced scale models of rock mass. *Rock Mech Rock Eng* 53: 2687–2705. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02064-9>.
- Jaber J. 2020. Application de la fabrication additive à la modélisation physique des joints et des massifs rocheux, par approches expérimentales et numériques. Thèse en Génie civil. Université de Lorraine.
- Jiang C, Zhao GF. 2015. A preliminary study of 3D printing on rock mechanics. *Rock Mech Rock Eng* 48: 1041–1050. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0612-y>.
- Jiang C, Zhao GF, Zhu J, Zhao YX, Shen L. 2016a. Investigation of dynamic crack coalescence using a Gypsum-like 3D printing material. *Rock Mech Rock Eng* 49: 3983–3998. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0967-3>.
- Jiang Q, Feng X, Gong Y, Song L, Ran S, Cui J. 2016b. Reverse modelling of natural rock joints using 3D scanning and 3D printing. *Comput Geotech* 73: 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.comptgeo.2015.11.020>.
- Jiang Q, Feng X, Song L, Gong Y, Zheng H, Cui J. 2016c. Modeling rock specimens through 3D printing: tentative experiments and prospects. *Acta Mech Sin* 32: 101–111. <https://doi.org/10.1007/s10409-015-0524-4>.
- Ju Y, Wang L, Xie H, Ma G, Zheng Z, Mao L. 2017. Visualization and transparentization of the structure and stress field of aggregated geomaterials through 3D printing and photoelastic techniques. *Rock Mech Rock Eng* 50: 1383–1407. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1171-9>.
- Ju Y, Xie H, Zheng Z, Lu J, Mao L, Gao F, Peng R. 2014. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology. *Chin Sci Bull* 59: 5354–5365. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0579-9>.
- Kulhawy FH. 1975. Stresses and displacements around openings in homogeneous rock. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Elsevier, pp. 43–57. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)91775-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(75)91775-1).
- Kulhawy FH. 1978. Geomechanical model for rock foundation settlement. *ASCE* 104(GT2): 211–227.
- Lin P, Liu H, Zhou W. 2015. Experimental study on failure behaviour of deep tunnels under high in situ stresses. *Tunn Undergr Space Technol* 46: 28–45. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.10.009>.
- Liu P, Ju Y, Ranjith PG, Zheng Z, Wang L, Wanniarachchi A. 2016. Visual representation and characterization of three-dimensional hydrofracturing cracks within heterogeneous rock through 3D printing and transparent models. *Int J Coal Sci Technol* 3: 284–294. <https://doi.org/10.1007/s40789-016-0145-y>.
- Liu YK, Zhou FB, Liu L, Liu C, Hu SY. 2011. An experimental and numerical investigation on the deformation of overlying coal seams above double-seam extraction for controlling coal mine methane emissions. *Int J Coal Geol* 87: 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.06.003>.
- Mandel J. 1962. Essais sur modèle réduits en mécanique des terrain – Étude des conditions de similitude. *Rev Ind Miner* 9: 611–620.
- Mestat P. 1993. Lois de comportement des géomatériaux et modélisation par la méthode des éléments finis. Coll. « Études et recherche des laboratoires des Ponts et Chaussées », série Géotechnique, ISSN 1157-3910.
- Patton FD. 1966. Multiple modes of shear failure in rock. In: Proceedings 1st Congress of International Society of Rock Mechanics, Lisbon, vol. 1, pp. 509–513.
- Piede L. 1986. Model test study on double lining of tunnels. *Tunn Undergr Space Technol* 1: 53–58. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(86\)90128-8](https://doi.org/10.1016/0886-7798(86)90128-8).

- Pouya A, Ghoreychi M. 2001. Determination of rock mass strength properties by homogenization. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 25: 1285–1303. <https://doi.org/10.1002/nag.176>.
- Rachez X. 1997. Les fondations au rocher de grands viaducs : l'apport de la méthode des éléments distincts. PhD Thesis. École nationale des Ponts et Chaussées.
- Ritter S, DeJong MJ, Giardina G, Mair RJ. 2018. 3D printing of masonry structures for centrifuge modelling. In: 9th International Conference of Physical Modelling in Geotechnics, London, pp. 449–454.
- Sharafisafa M, Shen L, Xu Q. 2018. Characterisation of mechanical behaviour of 3D printed rock-like material with digital image correlation. *Int J Rock Mech Min Sci* 11: 122–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.10.012>.
- Song L, Jiang Q, Shi YE, *et al.* 2018. Feasibility investigation of 3D printing technology for geotechnical physical models: study of tunnels. *Rock Mech Rock Eng* 51: 2617–2637. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1504-3>.
- Stathas D, Xu L, Wang JP, Ling HI, Li L. 2018. Concave segmental retaining walls. In: 9th International Conference of Physical Modelling in Geotechnics, London.
- Sturzenegger M, Stead D. 2012. The Palliser Rockslide, Canadian Rocky Mountains: characterization and modeling of a stepped failure surface. *Geomorphology* 138: 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.09.001>.
- Sui W, Hang Y, Ma L, *et al.* 2015. Interactions of overburden failure zones due to multiple-seam mining using longwall caving. *Bull Eng Geol Environ* 74: 1019–1035. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0674-9>.
- Suzuki A, Sawasdee S, Makita H, Hashida T, Li K, Horne RN. 2016. Characterization of 3D printed fracture networks. In: 17 Proceedings, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, CA: Stanford University.
- Wang L, Ju Y, Xie H, Ma G, Mao L, He K. 2017. The mechanical and photoelastic properties of 3D printable stress-visualized materials. *Sci Rep* 7: 10918. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11433-4>.
- Zarringhalam H, Hopkinson N, Kamperman NF, de Vlieger JJ. 2006. Effects of processing on microstructure and properties of SLS Nylon 12. *Mater Sci Eng A* 435–436: 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.084>.
- Zhou T, Zhu JB. 2018. Identification of a suitable 3D printing material for mimicking brittle and hard rocks and its brittleness enhancements. *Rock Mech Rock Eng* 51: 765–777. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1335-7>.
- Zhou T, Zhu JB, Ju Y, Xie HP. 2019. Volumetric fracturing behavior of 3D printed artificial rocks containing single and double 3D internal flaws under static uniaxial compression. *Eng Fract Mech* 205: 190–204. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.11.030>.
- Zhu JB, Zhou T, Liao ZY, Sun L, Li XB, Chen R. 2018. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behaviour of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography. *Int J Rock Mech Min Sci* 106: 198–212. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.022>.

Citation de l'article : Jana Jaber, Marianne Conin, Olivier Deck, Olivier Godard, Samuel Kenzari. Essai préliminaire de l'application de l'impression 3D à la modélisation physique des massifs rocheux. Rev. Fr. Geotech. 2021, 168, 1.