

# Caractérisation mécanique des suspensions minérales concentrées

**Chuan Chen<sup>1</sup>, Arnaud Perrot<sup>1,2</sup>, Damien Rangeard<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>INSA Rennes, EA 3913, LGCGM, F-35000 Rennes

<sup>2</sup>Univ. Bretagne-Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient

**RESUME** L'impression 3D par extrusion-dépôt des matériaux à base minérale (argile, ciment) a relancé l'intérêt pour le comportement mécanique des suspensions minérales fermes à l'état frais. Une des techniques d'impression consiste à utiliser un matériau plastique ferme (technique dite de la brique infinie) présentant un seuil de cisaillement de l'ordre de 10 kPa et une fraction granulaire élevée. Afin de pouvoir s'assurer de la bonne extrusion du matériau et de la stabilité de la structure durant son impression, il convient d'étudier finement le comportement mécanique des pâtes cimentaires et argileuses fermes en mettant en évidence la contribution du frottement interne du matériau. Pour cela, des essais de cisaillement direct couplés à des essais triaxiaux permettent de mettre en évidence une loi de comportement de type Coulomb ainsi qu'un vieillissement mécanique du matériau au cours du temps.

**Mots-clés** extrusion, impression 3D, matériau cimentaire et argileux, rhéologie, géotechnique.

## I. INTRODUCTION

L'impression 3D des matériaux cimentaires et argileux et aujourd'hui un des axes de recherche les plus actifs dans le domaine des matériaux de construction (Wangler 2016) (Perrot 2019). Une des techniques d'impression les plus utilisées consiste à extruder un matériau ferme présentant un seuil de cisaillement (ou cohésion) de l'ordre de 10 kPa en lui conférant une section rectangulaire (Wolfs 2018). C'est la technique dite de la brique infinie (Roussel 2018). La connaissance fine de la rhéologie et du comportement mécanique du matériau est nécessaire afin de prédire l'extrudabilité du matériau (Perrot 2018) ainsi que de s'assurer de la stabilité du matériau en impression. Il est ainsi nécessaire de connaître la cohésion ainsi que l'angle de frottement interne du matériau pour pouvoir modéliser son comportement en cours d'extrusion mais aussi après son dépôt. Pour cela des essais de géotechnique (essais de cisaillement direct et essais triaxiaux) sont utilisés. Ils montrent la grande dépendance du comportement du matériau à la teneur en granulats et permettent de décrire l'évolution du comportement du matériau cimentaire testé au cours du temps. Les résultats de ces caractérisations permettront d'alimenter des modèles numériques permettant de décrire l'extrusion et l'impression des matériaux étudiés.

## II. Matériaux et méthodes

### A. Matériaux argileux et matériau cimentaire testés

Des mélanges de kaolin ( $d_{50} = 4 \mu\text{m}$  – Imerys, Ploemeur) et de sable 0/4 mm considérés comme des suspensions minérales concentrées sont utilisés dans cette étude. La proportion de sable contenue dans l'échantillon est variable afin d'étudier l'effet de ce paramètre sur le comportement du matériau (0 ; 20 ; 40 et 60% de la masse totale du matériau sec.) La quantité d'eau est ajustée afin d'obtenir un seuil de cisaillement mesuré par essai au scissomètre de 15 kPa identique pour tous les mélanges. Un mortier ferme utilisé pour l'impression 3D est aussi testé dans le cadre de cette étude. La formulation de ce matériau est donnée dans (Mazhoud, 2019). Il s'agit de la formulation de référence ne contenant pas d'agents viscosant et présentant un seuil de cisaillement initial de 5 kPa.

### B. Méthodes de caractérisation

Une campagne d'essais de cisaillement direct est réalisée sur les matériaux étudiés. Elle a pour but de déterminer les paramètres du comportement de cisaillement (cohésion, angle de frottement) en conditions drainées (vitesse de cisaillement : 0.05 mm/min) et non drainées (vitesse de cisaillement : 6 mm/min) pour le matériau argileux aux différents dosages en sable étudiés. Pour le mortier, seuls les essais non drainés sont réalisés à différents âges du matériau afin d'étudier uniquement l'effet de la structuration liée à l'hydratation du ciment. Les éprouvettes cisillées ont une forme cylindrique (hauteur de 30 mm et diamètre de 60 mm) et le chargement normal est varié de 0 à 200 kPa. Des essais triaxiaux sont également réalisés pour confirmer les caractéristiques hydromécaniques de ces suspensions granulaires. Chaque échantillon testé ici possède d'un rapport  $H/D=2$  avec une hauteur proche de 100mm et un diamètre de 50mm. Pour chaque formulation, 3 essais de cisaillement (vitesse de chargement 0,1 mm/min) sont effectués à des pressions de confinement différentes (700, 800 et 900 kPa). Les ruptures observées permettent de décrire la ligne de rupture du matériau dans le plan pression effective-contrainte déviatorique.

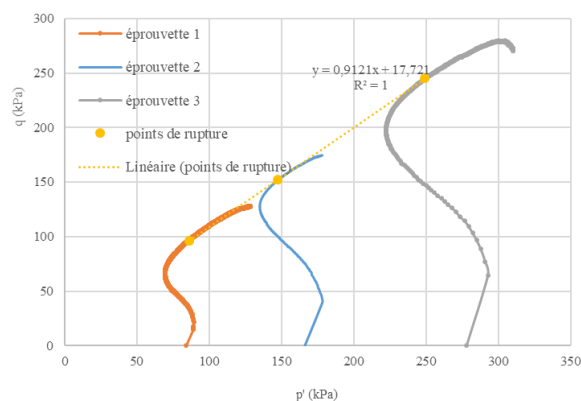


FIGURE 1. Visualisation des résultats des essais triaxiaux dans le plan  $p'$ - $q$ .

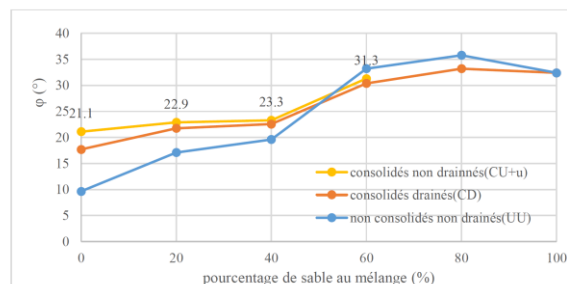
Il est aussi intéressant de noter que, pour les matériaux argileux, une phase de saturation et de consolidation est ajoutée avant le cisaillement. Cette étape a été utilisée pour le calcul de la perméabilité et la compressibilité du matériau (elle n'est pas présentée dans le cadre de cet article).

Pour le mortier, seule une étape de cisaillement non drainée est réalisée après différentes périodes de vieillissement pour obtenir les paramètres du comportement apparent.

### III. Résultats et discussions

#### A. Impact de la teneur en sable du matériaux argileux sur son comportement mécanique

Les angles de frottement mesurés obtenus avec les 2 méthodes de caractérisation sont tracés sur la figure 2. Premièrement, on peut noter que l'essai triaxial consolidé non drainé et l'essai de cisaillement direct drainé donne des résultats similaires. Ensuite, il y a une transition entre un comportement granulaire et un comportement cohésif entre 40 et 60% de teneur en sable. Ainsi, à 60%, l'angle de frottement mesuré est le même que celui mesuré sur du sable seul (point à 100%). Cette transition s'explique par l'existence d'un réseau de contacts continus entre grains de sable. Pour le comportement cohésif (teneur en sable inférieure ou égale à 40%), on note une dépendance du comportement aux conditions d'essai (drainées et non drainées). Cette observation est tout à fait en accord avec les comportements classiques des matériaux argileux.



**FIGURE 2.** Visualisation des angles de cisaillement obtenus (UU : essai de cisaillement direct non drainé. / CD : essai de cisaillement drainé / CU + u : essai triaxial consolidé drainé)

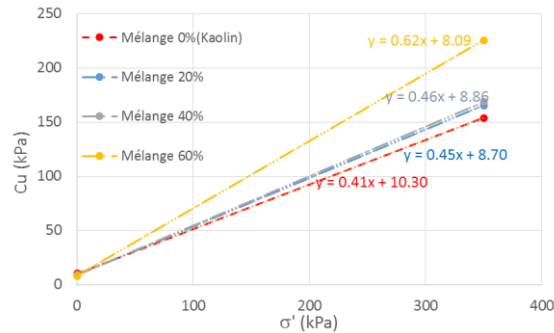
La dépendance du comportement au niveau de consolidation après drainage s'observe également dans l'évolution de la cohésion apparente avec le niveau de contrainte effective enregistré lors de l'essai triaxial. Comme le montre la figure 3, cela permet de relier directement la cohésion apparente non drainée (ou seuil de cisaillement en termes rhéologiques) au niveau de contraintes effectives agissant sur le squelette.

#### B. Influence de l'âge du matériau cimentaire sur son comportement mécanique

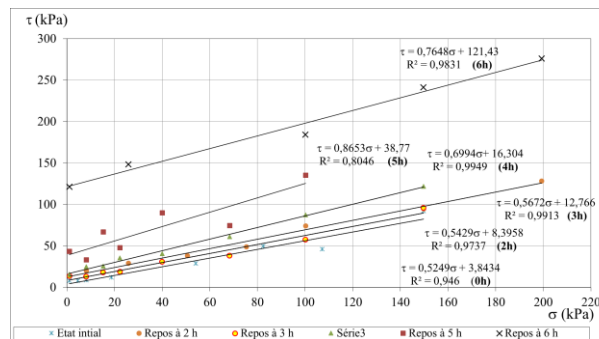
La figure 4 montre les contraintes de rupture enregistrées en fonction de la contrainte normale pour différentes périodes de repos avant les essais de cisaillement direct réalisés sur le mortier. Ainsi, les augmentations de la cohésion non drainée et de l'angle de frottement avec l'âge du matériau peuvent être facilement observées et devront être reliées à la cinétique de structuration chimique du matériau et à la vitesse de chargement obtenue lors du procédé d'impression 3D (Perrot, 2016).

### IV Conclusions

Cette étude montre le potentiel des essais de géotechnique pour décrire le comportement des matériaux à base minérale lors de l'impression. Ces essais permettent de rendre compte de la contribution du frottement interne ainsi que de l'effet de la structuration sur le comportement mécanique pour les matériaux à base cimentaire. Ainsi, pour les matériaux argileux, l'angle de frottement augmente avec la fraction de sable (de 20 à 32°) et les ciments voient leur cohésion passer de quelques kPa à 150 kPa entre 2 et 8h de vieillissement.



**FIGURE 3.** Détermination de la variation de la cohésion apparente avec le niveau de contrainte effective (augmentant avec la consolidation)



**FIGURE 4.** Evolution du comportement du mortier imprimable avec son âge entre 0 et 6h après le contact eau/ciment.

## REFERENCES

- Mazhoud, B/, et al. (2019). *Construction and Building Materials*, 214, 458-467.
- Perrot, A., Rangeard, D., Nerella, V. N., Mechtcherine, V. (2018). *RILEM Tech. Let.*, 3, 91-97.
- Perrot, A. (Ed.). (2019). John Wiley & Sons.
- Roussel, N. (2018). *Cement and Concrete Research*, 112, 76-85.
- Wangler, T., et al. (2016) *RILEM Technical Letters*, 1, 67-75.
- Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2018). *Cem. and Concr. Research*, 106, 103-116.