

# Modélisation numérique bidimensionnelle de l'écoulement de suspensions cimentaires lors du procédé d'impression 3D par liaison sélective

Alexandre Pierre<sup>1\*</sup>, Daniel Weger<sup>2</sup>, Arnaud Perrot<sup>3</sup>, Dirk Lowke<sup>4†</sup>

*1 L2MGC EA4114, CY Cergy Paris Université, 5 mail Gay-Lussac – Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise, France*

*2 Technical University of Munich, Centre for Building Materials (cbm), Munich, Germany*

*3 Univ. Bretagne Sud, FRE CNRS 3744, IRDL, F-56100 Lorient, France*

*4 University of Braunschweig, Institute of Building Materials, Concrete Construction and Fire Safety (iBMB), Braunschweig, Germany*

**RESUME** La fabrication additive de matériaux à base de béton et de ciment devrait révolutionner le domaine de la construction. Dans le cas de la technique d'intrusion sélective de pâte, la buse de l'imprimante 3D applique le liant composé d'eau, de ciment et d'adjuvants sur un lit de particules de sable. Pour atteindre un matériau homogène en utilisant la méthode d'intrusion sélective de la pâte, la couche d'agrégat en sable doit être complètement pénétrée par la pâte de ciment pour se lier avec les autres couches. Par conséquent, cet article vise à fournir et à valider la pénétration des fluides à seuil tels que les suspensions cimentaires à travers une matrice granulaire en utilisant la simulation numérique. Une analyse numérique 2D à l'aide d'un logiciel commercial est réalisée pour étudier le chemin d'écoulement préférentiel. Une méthode numérique de champ de phase et un modèle visco-plastique régularisé continu ont été utilisés pour simuler le procédé d'impression, évaluer la pénétration des suspensions et comparer les résultats numériques avec un modèle expérimental et analytique de la littérature. Nous montrons que la modélisation numérique est capable de prédire l'évaluation de la profondeur de pénétration en fonction de la contrainte seuil de mise en écoulement du matériau, de l'angle de contact et des propriétés du lit de particules de sable.

**Mots-clefs** Impression 3D, intrusion sélective de pâte, rhéologie, simulation numérique

## I. INTRODUCTION

Des procédés d'impression 3D de dépôt de matière par extrusion ont récemment permis de réaliser des ouvrages et éléments de structure à l'échelle de quelques mètres (A. Perrot 2019). Il existe néanmoins d'autres techniques ou procédés de fabrication additive pour le domaine du génie civil telle que la méthode de liaison sélective de granulats par intrusion de pâte cimentaire.

Dans le cas de cette technique, la buse de l'imprimante 3D applique le liant composé d'eau, de matière minérale et des adjuvants sur un lit de particules composé de sable et/ou de granulats. L'avantage de cette dernière méthode est que des structures très complexes peuvent être produites sans avoir besoin de structures de soutien (D. Lowke et al. 2018). Pour atteindre une résistance mécanique élevée en utilisant la méthode d'impression 3D de pénétration localisée de pâte, la couche de granulats ou de sable doit être complètement pénétrée par la pâte de ciment pour se lier avec les couches inférieures [2]. Ce n'est que lorsque les couches sont complètement remplies de la pâte de ciment qu'une structure monolithique et homogène avec un comportement mécanique de qualité, peut être fabriquée (figure 1). Ainsi, l'écoulement de pâte de ciment à travers la couche de sable doit être maîtrisé.

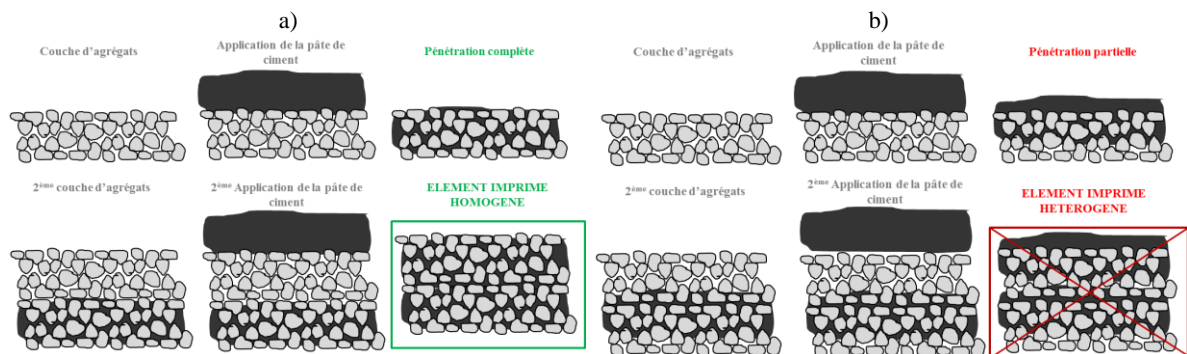


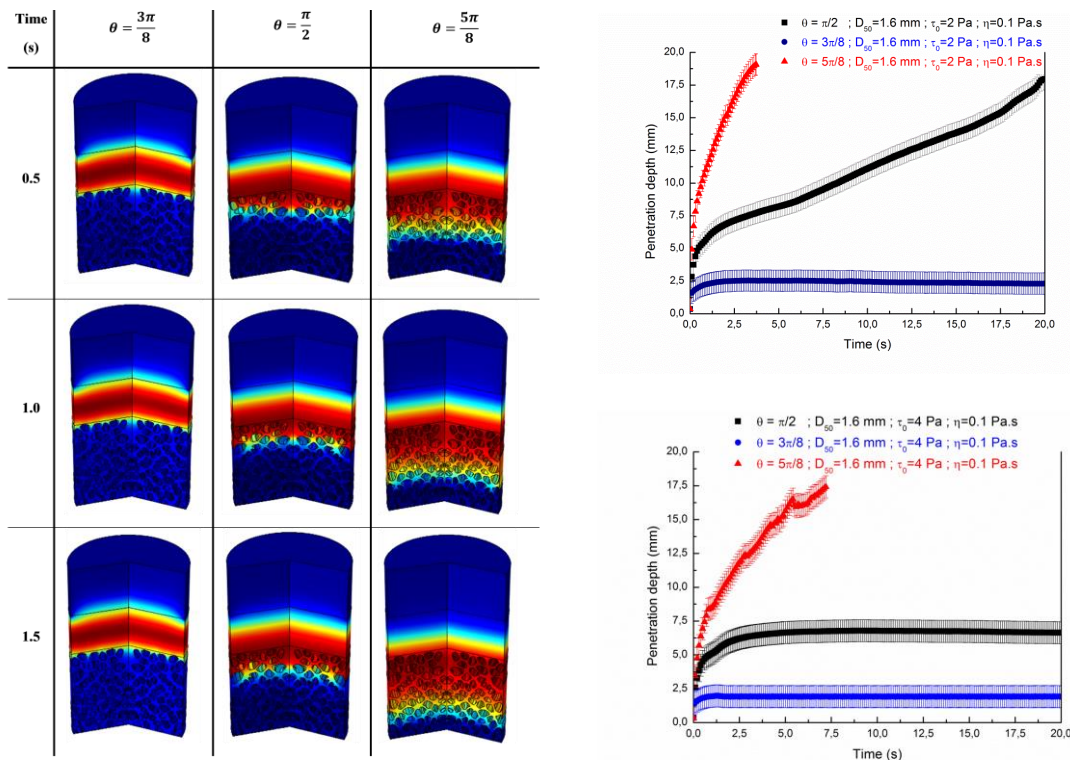
FIGURE 1. Schématisation du procédé d'impression : a) Pénétration complète ; b) Pénétration incomplète.

Ce travail vise donc à fournir et à valider des simulations numériques reproduisant la pénétration de suspensions cimentaires en fonction de ses propriétés rhéologiques telles que la viscosité et la contrainte de mise en écoulement à travers des couches de granulats. Nous nous concentrerons sur l'influence des propriétés rhéologiques et de l'angle de contact à l'interface fluide/solide sur la profondeur de pénétration finale. Dans un premier temps, nous modélisons en deux dimensions les assemblages granulaires utilisés dans les mesures expérimentales de (Pierre et al. 2018) avec un algorithme basée sur la théorie de Fourier-Voronoi de (Mollon and Zhao, 2012). La modélisation numérique proposée ici vise à résoudre les écoulements diphasiques à l'aide du logiciel commercial Comsol® avec une méthode de champ de phase. Après avoir montré que l'angle de contact, les propriétés du lit de particules de sable et la valeur de la contrainte seuil de mise en écoulement du fluide régissent la pénétration, nous comparons les résultats de la modélisation numérique avec les résultats expérimentaux et de la modélisation analytique de (Pierre et al. 2018).

## II. RESULTATS

Nous présentons ici des captures d'écran de la pénétration de fluides ayant une contrainte seuil de mise en écoulement, notées  $\tau_0$ , de 2 Pa et 4 Pa et une viscosité, notée  $\mu$ , de 0,1 Pa.s, en fonction de la valeur de l'angle de contact. Nous observons ici une augmentation de la profondeur de pénétration en fonction de l'augmentation de la valeur de l'angle de contact. L'angle de contact modifie également la cinétique de pénétration dans la porosité de la matrice granulaire. Une fois la contrainte de mise en écoulement atteinte, le mouvement de la pâte de ciment à travers la

matrice granulaire est contrôlé par deux propriétés: un terme dû à la gravité et un terme dû à la tension superficielle ainsi qu'à l'angle de contact.

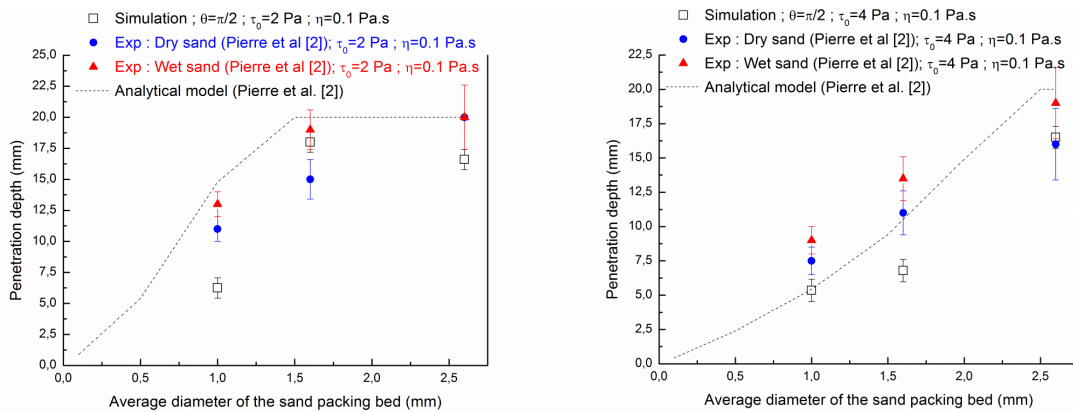


**FIGURE 1.** Influence de l'angle de contact à l'interface granulat/suspension cimentaire sur la profondeur de pénétration de suspensions à travers des assemblages granulaires de différentes tailles.

Nous comparons sur la figure 2 les résultats expérimentaux issus de tests de pénétration réalisés dans une étude précédente (Pierre et al. 2018) avec les résultats issus de la modélisation numérique de ce travail. Trois différentes distributions granulométriques de sables et deux teneurs en eau (0 et 0,6%) ont été étudiées. Deux pâtes de ciment spécifiques avec un seuil de mise en écoulement mesuré de 2 et 4 Pa ont été utilisées dans l'étude de (Pierre et al. 2018). La figure 2 montre que les résultats des simulations numériques sont équivalents avec les mesures expérimentales pour un fluide avec un seuil de 2 Pa pénétrant à travers les couches de sable humide de diamètre moyen de 1,6 et 2,6 mm. Un écart entre la valeur numérique de la pénétration et les valeurs expérimentales de la pénétration est constaté avec l'utilisation d'un sable de 1 mm de diamètre moyen. À ce faible diamètre moyen, les résultats expérimentaux évaluent une pénétration plus élevée que le modèle numérique (valeur proche de 6 mm). Les résultats des simulations numériques sont également fiables pour la pénétration de la pâte de ciment avec une contrainte de mise en écoulement de 4 Pa. Les valeurs provenant des mesures expérimentales et des simulations numériques sont presque similaires, à l'exception des valeurs obtenues avec diamètre moyen de grain de 1,6 mm.

Nous concluons donc que la concordance entre les simulations numériques de Comsol® et les résultats expérimentaux sur deux pâtes de ciment différentes pénétrant à travers des couches de 3 sables différents est cohérente. Bien entendu, la valeur de la pénétration peut être adaptée suivant

les valeurs des angles de contact qui régissent le comportement de la suspension en matière d'écoulement. On peut noter que la modélisation numérique peut saisir l'effet d'un chemin d'écoulement préférentiel. L'effet de la taille de grains ne semble pas être le paramètre discriminant en termes d'écart entre les résultats issus de la modélisation et des expériences. Dans le futur, une modélisation tridimensionnelle de l'écoulement serait sans doute plus adaptée.



**FIGURE 2.** Comparaison des résultats issues des simulations numériques de cette étude et des résultats expérimentaux et analytiques de (A. Pierre and al. 2018) : profondeurs de pénétration mesurées de pâtes de ciment de seuils 2 Pa (à gauche) et 4 Pa (à droite) ; diamètres moyens des sables de 1,0, 1,6 et 2,6 mm avec deux teneurs en eau.

### III. CONCLUSION

Nous avons démontré que la profondeur de pénétration des suspensions cimentaire à travers un assemblage de granulats peut être prédite en utilisant des simulations numériques avec la connaissance des propriétés rhéologiques du fluide, le diamètre moyen des particules ainsi que la porosité de l'assemblage granulaire. Les résultats numériques se sont révélés fournir plus d'informations sur le chemin d'écoulement par rapport à la modélisation unidirectionnelle précédente de l'écoulement. Nous avons également souligné que l'angle de contact est prédominant lors de la pénétration d'un fluide newtonien ou complexe à travers un lit de particules granulaires. Une des perspectives de ce travail est de proposer une modélisation tridimensionnelle de l'écoulement.

### REFERENCES

- 3D Printing of Concrete: State of the Art and Challenge of the Digital Construction Revolution, Edited by Arnaud Perrot, Wiley Editions, 2019, n.d.
- A. Pierre, D.Weger, A. Perrot, D. Lowke, Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing: analytical and experimental study, *Materials and Structures* (2018) 51:22.
- D. Lowke, E. Dini, A. Perrot, D. Weger, C. Gehlen, B. Dillenburger, Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges, *Cem. Conc. Res.* 112 (2018) 50-65.
- Mollon, G., Zhao, J., 2012. Fourier–Voronoi-based generation of realistic samples for discrete modelling of granular materials. *Granul. Matter* 621–628. <https://doi.org/DOI 10.1007/s10035-012-0356-x>