
Impression 3D par la méthode de liaison sélective de granulat : pénétration de ciment dans des assemblages granulaires

Alexandre Pierre¹, Daniel Weger², Arnaud Perrot³, Dirk Lowke⁴

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

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

³ UEB-LIMATB, ECOMATH, Université de Bretagne Sud, Centre de Recherche de St Maudé, 56321 Lorient, France

⁴ Technical University of Braunschweig, Department of Building Materials, Braunschweig, Germany

RÉSUMÉ. Les procédés d'impression 3D des matériaux cimentaires pourraient apporter une innovation architecturale et structurelle dans l'industrie de la construction. Parmi les procédés d'impression 3D existants, l'un des plus intéressants est la méthode de liaison sélective de granulats. Une structure est construite couche par couche en appliquant de manière sélective une pâte de ciment sur un assemblage d'agrégat en utilisant une imprimante 3D. Nous montrons dans cet article que la résistance à la compression de matériaux fabriqués par une telle technique est directement liée à la profondeur de pénétration de la pâte de ciment dans la couche élémentaire d'agrégats. A partir de ce résultat, cet article vise à prédire la profondeur de pénétration des pâtes de ciment dans l'assemblage de particules (sable). Une approche théorique a été développée pour évaluer la profondeur de pénétration en fonction du diamètre moyen des grains de sable et de la contrainte seuil de cisaillement de la pâte de ciment. Nous soulignons dans ce travail que la prédiction de la pénétration avec un modèle analytique est une technique efficace pour assurer la construction de matériaux à base de ciment avec la méthode de liaison sélective.

ABSTRACT. 3D printing processes of concrete and cement based materials could bring architectural and structural innovation in construction industry. Among the 3D printing processes that could bring new perspectives in innovative and designed architectural elements, one of the most interesting is called the selective paste intrusion method. The component is built layer by layer by selectively applying cement paste on an aggregate packing using a 3D printer. We show in this paper that the compressive strength of component made by such a technique is directly linked to the penetration depth of the cement paste into the aggregate layer; consequently, this paper aims at predicting the penetration depth of cement pastes into sand layers. A theoretical framework has been developed to propose an evaluation of penetration depth as a function of the average sand grain diameter and the yield stress of the cement paste. Finally, we stress that the prediction of penetration with an analytical model is an effective technique to ensure building homogeneous cement based materials with the 3D printing selective binding method.

MOTS-CLÉS : Impression 3D, méthode d'intrusion sélective, ciment, seuil de mise en écoulement, assemblage granulaire

KEY WORDS: 3D printing, selective binding, selective paste intrusion, cement, yield stress, particle packing

1. Introduction

Le domaine de la fabrication additive par commande numérique a massivement augmenté depuis 1980. Cette technologie n'a pas encore été entièrement transférée au domaine du génie civil. Pour la construction en béton, deux techniques différentes sont utilisées : les procédés basés sur l'extrusion de béton frais et l'infiltration d'une pâte de ciment ou d'eau dans un empilement de granulats ou d'un mélange ciment-agrégat respectivement. Le principe est simple : un matériau fluide est déposé par la buse de l'imprimante 3D et pénètre ensuite dans le lit de particules. L'avantage de cette dernière méthode est que des structures très complexes peuvent être produites sans avoir besoin de structures de soutien (cf. figure 1b). Pour atteindre une résistance mécanique élevée en utilisant la méthode de pénétration localisée de pâte, la couche d'agrégat appliquée doit être complètement pénétrée par la pâte de ciment pour se lier avec les couches inférieures. 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. Ainsi, l'écoulement de pâte de ciment à travers la couche de sable doit être prévu et contrôlé.

Par conséquent, ce travail a pour objectif de valider un modèle de prédiction de la pénétration de la pâte de ciment à travers un lit de particules au cours de son impression 3D par liaison sélective de particules. Nous montrons que la profondeur de pénétration régit le comportement mécanique des échantillons fabriqués par ce procédé. Une approche théorique est développée pour permettre la prédiction de la profondeur de pénétration de la pâte cimentaire sur la base d'une loi de Darcy adaptée aux fluides à seuil. Enfin, des expériences sur des pâtes de ciment spécifiques et des sables de distribution granulométrique connue ont été réalisées pour valider le

modèle analytique proposé. La comparaison entre le modèle théorique et les résultats expérimentaux montre que la pénétration de la pâte de ciment dépend de la morphologie du sable, du seuil de cisaillement de la pâte de ciment et de la teneur initiale en eau de l'échantillon de sable.

2. Matériaux et méthodes

La méthode de liaison sélective de granulats a été utilisée pour produire des échantillons cylindriques de 51 mm de haut et de 50 mm de diamètre. Cette technique a été implémentée avec l'imprimante 3D présentée sur la Figure 1a. Ce procédé est illustré sur la figure 1.c). Après le dépôt d'une couche de granulats, l'application de pâte de ciment vise à remplir entièrement la porosité du lit de particules. Par conséquent, le volume de la pâte de ciment appliquée est égal au volume des vides dans une couche d'agrégat. La fabrication par couches (voir le schéma de la figure 1c) ne permet la production d'un matériau homogène que si la couche d'agrégat est entièrement pénétrée par la pâte de ciment. Si le comportement rhéologique de la pâte est approprié, la pâte de ciment pénètre entièrement dans la couche et le produit final aura de bonnes résistances mécaniques. D'autre part, si la pâte de ciment n'est pas suffisamment fluide pour remplir le taux de vides de la couche de sable (voir la figure 1.c).ii), le matériau imprimé en 3D aura une structure hétérogène et pourra présenter une défaillance lorsqu'il sera sollicité mécaniquement. L'obtention d'un matériau homogène dépend donc de la profondeur de pénétration h_{pen} . Par conséquent, la pâte de ciment doit pénétrer complètement dans la profondeur de la couche d'agrégat (figure 1). Le taux de pénétration Φ_{pen} qui caractérisa l'homogénéité et la liaison des couches peut être décrit par:

$$\Phi_{pen} = \frac{h_{pen}}{h_{lay}} \quad [1]$$

Les suspensions utilisées sont un mélange de ciment Portland (CEM I 42,5R), d'eau dé-ionisée et de superplastifiant (PCE). Trois sables différents ont été utilisés: un sable fin (0,7 - 1,2 mm), un sable moyen (1,0 - 2,2 mm) et un sable grossier (2,0 - 3,2 mm). La porosité de ces sables déposés en lits a été estimée à 46%. Le protocole de préparation des matériaux et les distributions granulométriques sont détaillés dans [PIE 17]. La caractérisation rhéologique des pâtes de ciment est réalisée avec un rhéomètre Anton Paar MCR 502[®] équipé d'une géométrie vane à 6 ailettes.

Un programme expérimental de 15 tests de pénétration a été réalisé. Les trois différentes distributions granulométriques des sables et deux teneurs en eau de sable (0 et 0,6%) ont été étudiées. Deux pâtes de ciment spécifiques avec un seuil de mise en écoulement mesuré de 2 et 5 Pa ont été utilisées pour remplir la hauteur de sable de 20 mm et 30 mm. Des essais de pénétration ont été effectués sur des colonnes de couches de particules qui étaient supérieures à six fois le diamètre maximum des particules. Un moule en forme d'entonnoir a été positionné sur la surface libre de la couche de sable, créant ainsi un tube vertical qui a été rempli avec la quantité de pâte requise.

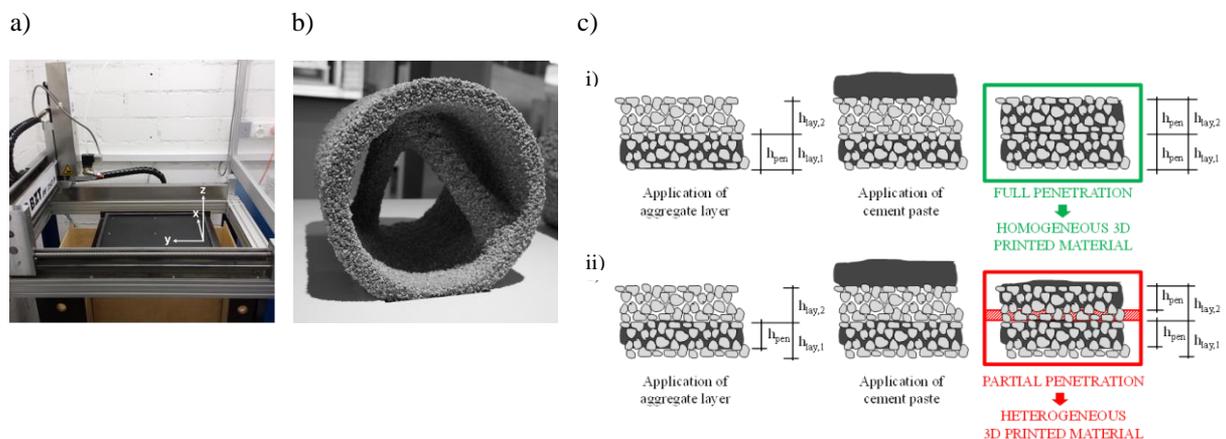


Figure 1. a) Imprimante 3D ; b) exemple de matériau cimentaire imprimé ; c) schématisation de la pénétration.

3. Modélisation

Récemment Chevalier et al. [CHE 13] ont proposé une loi de Darcy modifiée pour les fluides à seuil s'écoulant à travers un milieu poreux (Eq. 2)

$$D\nabla P = \alpha\tau_c + \beta k \left(\frac{V}{D}\right)^n \quad [2]$$

Avec ∇P le gradient de pression par unité de longueur, V la vitesse, τ_c la contrainte seuil, k la consistance et n l'exposant d'Herschel-Bulkley. La pénétration d'un fluide à seuil à travers un milieu poreux, Eq. (2) a lieu si la condition suivante est remplie (Eq. (3)) si la condition suivante est remplie :

$$\nabla P \geq \frac{\alpha\tau_c}{D} \quad [3]$$

Le gradient de pression est estimé suivant les équations de Green et Ampt [GRE 11] et le développement théorique développé dans [PIE 17] permet d'estimer une valeur de seuil maximale qui permet une pénétration complète de la couche de sable :

$$\tau_{c,max} = \frac{\rho g d_{agg}}{\alpha + \frac{6\Phi_s}{1-\Phi_s}} \quad [4]$$

Cette valeur maximale de contrainte seuil ne dépend que de la taille des particules. Ce critère suppose que la durée de la pénétration est beaucoup plus courte que la durée du durcissement du matériau cimentaire utilisé. Par conséquent, la durée de l'écoulement doit être plus de dix fois plus courte que la cinétique de durcissement. Cette condition est remplie lorsque, comme dans notre cas, l'épaisseur de la couche de sable est de l'ordre de quelques dizaines de millimètres. Des valeurs de seuil de cisaillement de 1,6, 2,5 et 4,1 Pa ont été obtenues expérimentalement pour une pâte de ciment d'une masse volumique de 2,0 g.cm⁻³, pénétrant dans des couches de particules avec une fraction solide de 54% et un diamètre moyen de sable de 1, 1,6, 2,6 mm, respectivement.

L'utilisation de l'éq. [2] a permis d'établir la prédiction de la hauteur pénétrée (Eq. 5) [PIE17] :

$$h_{pen} = \frac{\rho g d_{agg} (1-\Phi_s) h_{lay}}{\alpha\tau_c - \rho g d_{agg} \Phi_s + \frac{\Phi_s}{1-\Phi_s} 6\tau_c \kappa} \quad \text{and/or} \quad \Phi_{pen} = \frac{\rho g d_{agg} (1-\Phi_s)}{\alpha\tau_c - \rho g d_{agg} \Phi_s + \frac{\Phi_s}{1-\Phi_s} 6\tau_c \kappa} \quad [5]$$

4. Résultats

La figure 2 montre l'effet du taux de pénétration sur la résistance à la compression des cylindres imprimés en 3D fabriqués par la méthode étudiée. Les résultats montrent que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du taux de pénétration Φ_{pen} . Avec un taux de pénétration croissant, la connexion entre les couches est améliorée, ce qui augmente la résistance. Les résultats mettent en évidence que la profondeur de pénétration h_{pen} de la pâte de ciment doit être au moins égale ou supérieure à la hauteur de la couche agrégée pour assurer un comportement de matériau monolithique. Ainsi, la prédiction de la profondeur de pénétration h_{pen} est fortement conseillée pour garantir qu'une résistance mécanique suffisante peut être obtenue avec la méthode d'intrusion de pâte sélective.

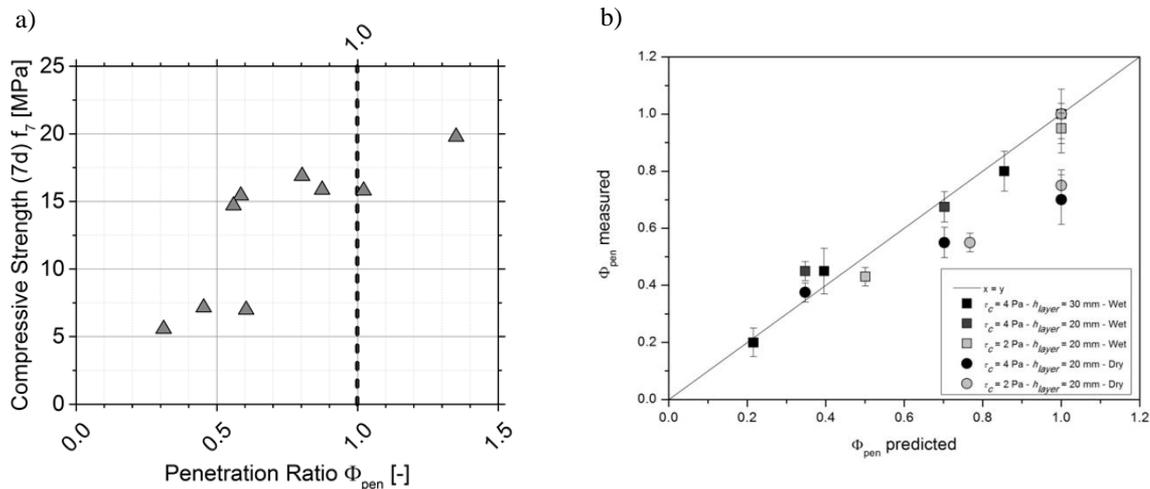


Figure 2. Comparaison des profondeurs de pénétration mesurées et de la pénétration prédite à partir de l'équation (5) de pâtes de ciment de seuils $\tau_0 = 2 \text{ Pa}$ et $\tau_0 = 4 \text{ Pa}$ à travers une couche de sable d'une hauteur de 20 mm ou 30 mm avec des diamètres moyens de 1,0, 1,6 et 2,6 mm.

Les résultats de la figure 2 montrent qu'il est possible de prédire la pénétration de la pâte de ciment à travers un empilement de sable en utilisant le modèle analytique pourvu que les particules de sable soient saturées en eau. Les profondeurs de pénétration mesurées obtenues avec des lits de sable humides sont en bon accord avec la prédiction fournie par l'équation 5. Par conséquent, l'approche analytique est capable de refléter les résultats expérimentaux et peut être utilisée pour modéliser la pénétration de la pâte de ciment dans le sable pour la technique d'impression 3D par injection de pâte sélective. Cependant, lorsque le sable est sec, la profondeur de pénétration mesurée est inférieure à la valeur prédite (à l'exception de la contrainte d'écoulement inférieure et du diamètre de particule le plus élevé, qui est la combinaison la plus favorable pour la pénétration). L'écart entre les valeurs mesurées et prédites augmente avec la profondeur de pénétration et par conséquent, la surface des particules de sable était en contact avec la pâte de ciment. Dans un tel cas, les particules de sable absorbent une partie de l'eau de la pâte de ciment et cet effet tend à diminuer la pénétration. Ainsi la pénétration mesurée est inférieure à celle prédite par le modèle. Cela signifie que la teneur en eau initiale des particules de sable est un paramètre influençant et que le phénomène d'absorption doit être pris en compte dans les travaux ultérieurs sur la méthode d'impression 3D par injection de pâte sélective.

3. Conclusion

Dans cette étude, nous avons montré que la résistance à la compression des composants imprimés en 3D fabriqués avec la méthode de liaison sélective de granulats est liée à la profondeur de pénétration de la pâte de ciment. Les résultats des tests mécaniques ont montré que la hauteur de la couche de sable doit être entièrement remplie de pâte de ciment pour assurer une bonne cohésion du composant et une résistance élevée à la compression. Un cadre théorique a été développé pour calculer une valeur maximale de contrainte seuil pour laquelle une pénétration de couche complète ne peut pas être atteinte. Ce cadre théorique est basé sur la pénétration d'un fluide à seuil à travers un milieu poreux en prenant en compte la pression statique induite par le fluide. De plus, une méthode analytique pour la prédiction de la profondeur de pénétration de la pâte de ciment a été proposée et validée avec des mesures expérimentales. Il a été démontré que la profondeur de pénétration peut être prédite si quatre paramètres sont connus: le diamètre moyen de la garniture de sable, la fraction de volume solide ou le taux de vide de la garniture de sable, la limite d'élasticité et la densité de la pâte de ciment.

4. Bibliographie

- [CHE 13] T. Chevalier et al., "Darcy's law for yield stress fluid flowing through a porous medium," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 195, pp. 57–66, May 2013.
- [GRE 11] W. H. Green and G. Ampt, "Studies of soil physics, part I – the flow of air and water through soils," *Journal of Agricultural Science*, vol. 4, pp. 1–24, 1911.
- [PIE 18] 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