

Impression 3D dans des suspensions : économie de matériau et performances mécaniques

Abdeslam BENAMARA¹, Alexandre PIERRE¹, Abdelhak KACI¹, Yannick MELINGE².

¹CY Cergy Paris Université, L2MGC, Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise, France

²Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH), Champs-sur-Marne, France

RESUME .

Le secteur de la construction connaît une révolution grâce aux nouvelles technologies et à la numérisation. L'impression 3D par injection est une voie possible pour imprimer des éléments complexes. Dans ce travail, nous visons à imprimer une éprouvette en forme de sablier : il s'agit d'une forme complexe instable où le moindre défaut lors du process d'impression peut conduire à l'effondrement de la structure. Une telle forme peut être vue comme une optimisation d'une éprouvette cylindrique où les performances mécaniques de cette forme sont remplies par une disposition judicieuse du matériau. Une résistance ultime à la compression égale à 35 MPa à la plus petite section transversale de l'éprouvette située à mi-hauteur a été mesurée. Cette valeur est inférieure à celle déduite de l'essai sur éprouvette normalisée. Cependant, ces résistances peuvent répondre aux spécifications des éléments structurels porteurs sollicités principalement en compression simple tels que les murs et les colonnes.

Mots-clefs Impression 3D, Matériaux de construction

I. INTRODUCTION

L'impression 3D permet de construire des objets et des structures complexes, architecturalement spectaculaires, tout en répondant aux défis environnementaux et économiques en réduisant le volume des matériaux et le temps de construction. (Nadal et al., 2017; Sanjayan et al., 2019). Cependant, certaines limitations demeurent pour la généralisation de son utilisation à grande échelle, qui sont liées soit à l'équipement, au matériau d'impression, à la forme de l'élément mais aussi aux propriétés mécaniques et à la durabilité de la structure imprimée.

Dans cet article, nous recherchons une alternative à l'impression de formes complexes pour répondre à des critères d'ordre esthétique, mais surtout avec l'objectif de répondre à une fonction mécanique en apportant judicieusement la matière là où elle est théoriquement indispensable. Une forme en sablier est retenue pour ce travail, figure 1.

La figure 1 illustre également l'effondrement d'une éprouvette imprimée bien que les paramètres d'extrusion et de déplacement de l'imprimante utilisées soient en adéquation. Il est donc souhaitable d'aider à maintenir la structure lors de son impression. à l'aide d'un liquide porteur comme coffrage temporaire (Benamara et al., 2020 , Lowke et al. 2021) en adaptant les propriétés des matériaux utilisés. Certains modèles analytiques ont été développés pour prédire la stabilité de l'impression dans une suspension de type gel. Grâce à ceux-ci, il est possible d'imprimer des formes classiques (standardisées), des formes creuses et des formes optimisées imprimées avec cette technique. Si les propriétés rhéologiques et la structure sont ajustées, la forme modélisée peut être fabriquée avec succès. Nous proposons d'utiliser cette technique pour étudier les performances mécaniques d'éprouvettes optimisées.

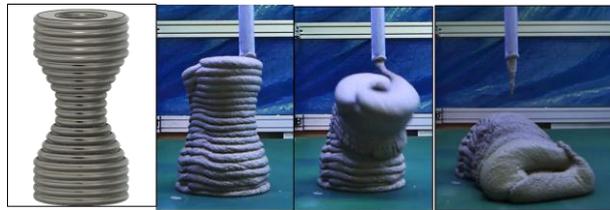


FIGURE 1. Exemple d'effondrement d'échantillons imprimés en 3D pendant le processus

II. MATERIAUX ET METHODES

La formulation du mélange du mortier étudié est présentée dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Formulation du mortier utilisé

| Sand by binder ratio | Kaolin by Cement ratio | Limestone filler by Cement ratio | Water by binder ratio | Superplasticizer by binder ratio |
|----------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1.5 | 0.2 | 0.2 | 0.34 | 0.01 |

L'imprimante 3D utilisée est une imprimante développée au sein du L2MGC (portique 3 axes). La vitesse d'extrusion et la vitesse de la buse sont calibrées afin de ne pas avoir de phénomènes de sous-extrusion ou de sur-extrusion La buse utilisée a une section circulaire et un diamètre de 18 mm. La vitesse d'impression est de 10 mm·s⁻¹.

Deux types de liquides porteurs, un gel de Carbopol et une suspension de calcaire ont été préparés pour assurer la stabilité de la forme pendant l'impression : Une illustration du principe d'impression est donnée sur la figure 2 à gauche. Sur cette figure, au milieu, on distingue une éprouvette obtenue par le principe d'impression via ce coffrage temporaire et à droite, l'allure du faciès de rupture des corps d'épreuve lors des tests post cure.



FIGURE 2. De gauche à droite : Exemple d'échantillons imprimés dans des gels Carbopol et un échantillon durci imprimé dans une suspension de calcaire après hydratation.

Un essai de compression uniaxiale cyclique est effectué à une vitesse de compression fixe de 0,5 mm.min⁻¹. Les éprouvettes sont d'abord rectifiées par un surfaçage au soufre des surfaces d'appui des corps d'épreuve pour assurer une distribution uniforme du champ de contrainte. Les résultats sont comparés à ceux d'éprouvettes normalisées, i.e. de forme cylindrique à section transversale circulaire obtenues par moulage traditionnel. Les éprouvettes ont été équipées de jauges de déformation collées sur une surface plane. A cette fin, la rectification de la surface a été effectuée par un disque diamanté.

II. RESULTATS

La charge moyenne de rupture des deux éprouvettes de forme optimisée imprimées dans la suspension de Calcaire est de 348 ± 14 kN. Le diagramme de l'évolution de la charge en fonction du temps d'essai est présenté dans la figure 3.

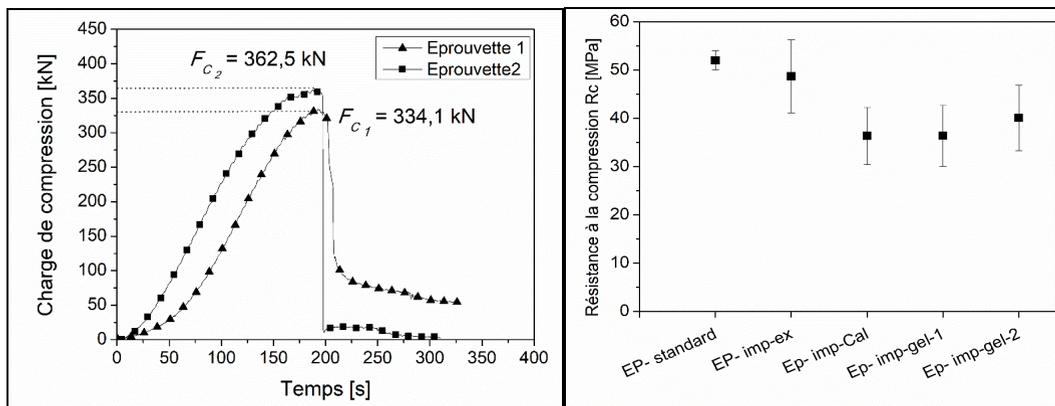


FIGURE 3. A gauche : évaluation de la contrainte maximale de compression à partir du diagramme charge de compression en fonction du temps pour les éprouvettes imprimées dans la suspension de Calcaire ; A droite : Résistance à la compression des éprouvettes imprimées dans les suspensions de calcaire et gel) et des éprouvettes moulées

Nous avons également observé pour les éprouvettes imprimées dans des suspensions de calcaire la présence de lignes blanchâtres au niveau des interfaces. De plus, l'effet géométrique de la forme de l'éprouvette tendrait à affecter les propriétés mécaniques vis à vis d'un défaut d'un mauvais alignement du chargement. Néanmoins, les éprouvettes moulées restent les plus résistantes et donnent une bonne estimation de la résistance mécanique à la compression comme celle mesurée sur les éprouvettes cylindriques standardisées de l'ordre de $52 \pm 1,2$ MPa.

III. CONCLUSION

Le recours à l'utilisation de cette technique d'impression en suspension permet d'obtenir des éléments imprimés avec des valeurs de résistances mécaniques prometteuses, de l'ordre de 35 MPa. Il est important de noter que l'avantage est d'économiser de la matière. Nous avons en effet mesuré que la réduction de matière dépasse 27 % pour les éprouvettes imprimées dans le calcaire et 34 % pour celles imprimées dans le gel de Carbopol.

REFERENCES

- Benamara, A., Pierre, A., Kaci, A., Melinge, Y., 2020. 3D Printing of a Cement-Based Mortar in a Complex Fluid Suspension: Analytical Modeling and Experimental Tests, in: Bos, F.P., Lucas, S.S., Wolfs, R.J.M., Salet, T.A.M. (Eds.), *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, RILEM Bookseries. Springer International Publishing, Cham, pp. 768–777. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_76
- D. Lowke, A. Vandenberg, A. Pierre, A. Thomas, H. Kloft, et N. Hack, n.d. Injection 3D concrete printing in a carrier liquid - Underlying physics and applications to lightweight space frame structures. », *Cem. Concr. Compos.*, p. 104169, juill. 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104169.
- Duballet, R., Baverel, O., Dirrenberger, J., 2017. Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction* 83, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.018>
- Nadal, A., Cifre, H., Pavón, J., Liébana, Ó., 2017. Material use optimization in 3D printing through a physical simulation algorithm. *Automation in Construction* 78, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.017>
- Sanjayan, J.G., Nazari, A., Nematollahi, B., 2019. *3D Concrete Printing Technology: Construction and Building Applications*. Butterworth-Heinemann.