

Performances mécaniques des mortiers de ciment bas carbone imprimables

Abdel-Okash SEIBOU¹, Said RAHAL¹, Abdelhak KACI¹, Eliane KHOURY², Céline FLORENCE², Laure REGNAUD³

¹Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC), CY Cergy Paris Université, F-95000 Cergy, France.

²Institut de Recherche, ESTP, 28 avenue du Président Wilson 94234 Cachan, France.

³Fondation École Française du Béton, 16 bis boulevard Jean Jaurès, 92110 Clichy.

RESUME

Ce travail porte sur les principaux aspects de l'impression 3D d'encre cimentaire bas carbone et aborde également le concept d'anisotropie des résistances mécaniques qui peut influencer la performance et l'application des structures imprimées. L'ouvrabilité des matériaux bas carbone et leur adaptabilité à l'impression 3D ont été étudiées. Dans ce travail les sollicitations mécaniques ont été multidirectionnelles et les résultats présentés ont été réalisés à 28 jours. Ces essais concernent la résistance à la compression ainsi que la résistance à la flexion trois points.

Les éprouvettes imprimées ont été sollicitées à l'état durci dans la direction longitudinale qui coïncide avec la direction de l'impression (X), dans la direction transversale (Y) et dans la direction normale aux couches (Z). Les mesures ont montré que les éléments imprimés présentaient une anisotropie induite par le procédé de mise en œuvre. Quel que soit le type de mortiers, les éprouvettes imprimées ont montré une meilleure résistance à la flexion dans la direction transversale (Y). En revanche, les résistances à la compression ont été supérieures dans la direction normale aux couches (Z). Enfin, quelle que soit la direction, les résistances à la flexion des éprouvettes imprimées ont été supérieures aux mesures obtenues sur les éprouvettes moulées. Les résultats confirment l'imprimabilité des ciments bas carbone pour contribuer à la durabilité environnementale. Il ressort également l'existence d'une anisotropie des structures imprimées qui semble dépendre principalement du procédé que du type de ciment.

Mots-clefs : Ciments bas carbone, Impression 3D, Essais mécaniques, Anisotropie.

I. INTRODUCTION

D'après le rapport sur l'état mondial des Bâtiments et de la construction en 2022 du Programme des Nations Unies pour l'environnement, les émissions issues de la production de matériaux de construction et de l'utilisation des bâtiments représentaient environ 37 % des émissions mondiales de l'année 2021. La réduction de l'impact des activités humaines sur l'environnement est donc une priorité. Le gouvernement français a imposé une réglementation environnementale, la RE2020, qui vise à réduire l'émission de gaz à effet de serre des nouvelles constructions. Cette

réglementation qui repose sur une transformation progressive des techniques de construction, des filières industrielles et des solutions énergétiques.

La fabrication additive plus précisément l'impression 3D du béton est une technique innovante pouvant répondre aux besoins de construction qui deviennent de plus en plus important tout en respectant la réglementation environnementale. Il s'agit d'une technique de mise en œuvre automatisée qui consiste à créer des formes simples ou complexes en déposant des couches successives de matériaux. L'impression 3D dans la construction peut réduire 60 % des déchets de construction et 80 % des coûts liés à la main-d'œuvre. Ceci tout en diminuant le temps de production de 70 % (Press Releases, 2016).

Malgré ses avantages, une attention particulière doit être portée sur le choix du système d'impression, des paramètres d'impression et des matériaux pour une diminution optimale des impacts environnementaux. L'impact environnemental du système d'impression est principalement lié à l'électricité consommée pendant le fonctionnement (Alhumayani et al., 2020). D'après (Tinoco et al., 2022), il est nécessaire d'optimiser le processus d'impression 3D afin de réduire cette consommation. Ainsi, il est suggéré, dans un premier temps, de recourir à l'utilisation de sources d'énergies renouvelables. Dans un second temps, il est recommandé d'optimiser la vitesse de déplacement de la buse en fonction des paramètres-machine. En effet, l'optimisation, entre autres, des paramètres d'extrusion permet d'éviter les dépôts excessifs de matières. En ce qui concerne le matériau, la teneur élevée en ciment dans l'impression 3D soulève la question du développement durable (Han et al., 2021). D'après (Abdalla et al., 2021), près de 90 % des impacts environnementaux des bétons imprimés peuvent être atténués en diminuant la quantité de ciment.

Le ciment est le principal responsable des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) dans le secteur de la construction. Les émissions de CO_2 issues de la fabrication du ciment ont un impact significatif sur l'environnement, principalement en raison de leur rôle dans l'intensification de l'effet de serre et du changement climatique. En 2018, les émissions de CO_2 liées à la production de ciment en France s'élevaient à environ 11,6 millions de tonnes, soit environ 1,5 % de l'empreinte carbone totale de la France (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2020). Pour diminuer l'impact environnemental du ciment dans l'impression 3D, il est proposé dans certaines études d'augmenter le rapport sable/ciment (Zhang et al., 2019; Mohan et al., 2020), tandis que d'autres études suggèrent de remplacer partiellement le ciment portland ordinaire (CPO) par des matériaux cimentaires supplémentaires (MCS) (Rahman et al., 2014; Yang et al., 2022). En 2012, l'utilisation des MCS avait permis la définition et la spécification des ciments à faible impact carbone tels que : CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V par la norme européenne (EN-197-1) et en 2021, la norme a été élargie (EN-197-5) par l'inclusion de deux nouveaux types de ciments bas carbone : CEM II/C-M et CEM VI. Cependant, peu d'études ont été rapportées sur l'imprimabilité des matériaux de ciments bas carbonés normalisés, notamment les ciments CEM III et CEM VI utilisés dans cette étude.

Ce travail explore la possibilité d'utiliser des ciments bas carbonés dans l'impression 3D. Les proportions des constituants et l'ouvrabilité ont été évaluées et adaptées afin d'assurer l'extrudabilité. Les propriétés mécaniques des mortiers de ciment bas carbone imprimés ont été étudiées et comparées à celles d'un mortier à base de CEM I. Ces trois matériaux imprimés ont

été comparés aux mesures obtenues sur des éprouvettes moulées. Ceci nous permettra d'évaluer l'impact du process sur les résultats. En ce qui concerne les résistances mécaniques des éléments imprimés, celles-ci ont été mesurées sur divers types de matériaux tels que le géopolymère (Panda et al., 2017b), le mortier (Wolfs et al., 2019), le béton (Ji et al., 2022), la terre (Rahal et al., 2023) etc. L'ensemble de ces études s'accordent sur la présence d'une anisotropie des résistances mécaniques des éléments issus de la fabrication additive. Les variations des résistances entre les différentes directions sollicitées peuvent dépendre de la suspension imprimée tel que mentionné précédemment mais également de la présence ou non de fibres. En effet celles-ci ont tendance à s'aligner préférentiellement suivant la direction principale d'impression (Ma et al., 2019; Yang et al., 2022). D'un autre côté, les éléments sont imprimés de manière séquentielle, couche après couche, toutes empilées les unes sur les autres. L'objet confectionné présente alors un assemblage successif de « strates » qui rappelle la structure d'un « mille-feuille ». L'interface entre les couches constitue une zone potentielle de faiblesse pouvant réduire les résistances mécaniques apparentes. D'après (Le et al., 2012), lorsque les couches sont déposées avec un intervalle supérieur à 15 min, la rupture par traction des bétons hautes performances imprimés se produisait systématiquement au niveau de l'interface. Dans les travaux de (Meurer and Classen, 2021), un intervalle de dépôt entre les couches supérieur à 10 min semble impacter négativement la résistance à la traction ainsi que l'énergie de fissuration des éprouvettes imprimées en mortier. Ces résultats pourraient s'expliquer par une altération de l'adhérence entre les couches (présence éventuelle de joints froids). Enfin, les travaux de (Ji et al., 2022) mettent en exergue une différence des résultats en fonction de l'orientation de la buse rectangulaire et de la longueur des ailettes (sortie horizontale, sortie verticale sans ailettes et sortie verticale avec ailettes de différentes longueurs) sur les résistances mécaniques du béton. De même, les travaux de (Rahal et al., 2023) ont montré une différence des résultats en fonction de la forme de la buse (sortie circulaire et sortie rectangulaire avec ailettes) sur les résistances mécaniques de la terre. Ce travail a pour objectif d'étudier les propriétés mécaniques des mortiers à impact carbone réduit formulés pour la fabrication additive.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Dans cette étude, l'objectif est d'obtenir un matériau plus respectueux de l'environnement en utilisant des ciments à faible impact carbone. Les ciments CEM I 52.5 N, CEM III/C 32.5 N de EQIOM et CEM VI 52.5 L de LAFARGE ont été utilisés dans ce travail. Leur empreinte carbone est illustrée sur la [FIGURE 1](#). Le superplastifiant à base de polycarboxylate Sika ViscoCrete® Tempo-10 a été utilisé afin de maintenir un rapport eau/ciment proche de 0,40 tout en assurant l'ouvrabilité requise pour le mélange. Le rapport superplastifiant/ciment variait entre 0.25 % et 0.30 %. Le sable silico-calcaire d'une taille maximale de 2 mm a été utilisé. Le rapport sable/ciment (S/C) était de 1,5.

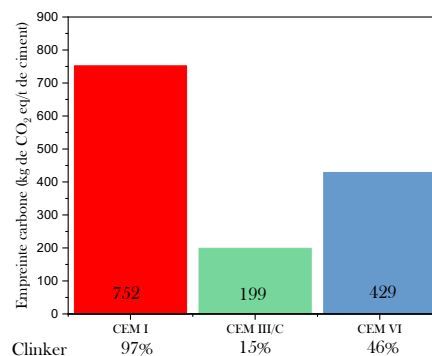


FIGURE 1. Empreinte carbone des ciments étudiés (Infociments, n.d.; Lafarge, n.d.)

B. Essai d'affaissement au mini cône

Des essais d'affaissement ont été réalisés à l'aide d'un mini cône à mortier (hauteur 150 mm, diamètre variant de 100 à 50 mm depuis sa base). Le but de l'essai est de déterminer l'évolution de l'ouvrabilité dans le temps du mortier à l'état frais (FIGURE 2).



(a) Affaissement de 100 mm

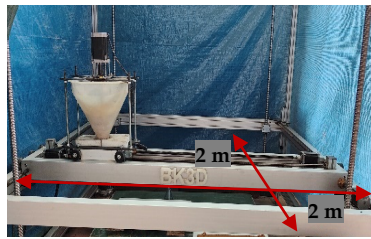
(b) Affaissement de 70 mm

(c) Affaissement de 35 mm

FIGURE 2. Mesure d'affaissement au mini cône de mortier de CEM VI

C. Paramètres d'impression

Les éprouvettes ont été imprimées avec l'imprimante à portique BK3D à 3 axes XYZ développée au Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (FIGURE 3) (Benamara et al., 2020). La buse circulaire utilisée possédait un diamètre de 35 mm. Les éléments de dimensions 50x200x400 mm³ et 50x40x400 mm³ (largeur x hauteur x longueur) ont été imprimés par extrusion couche après couche. Les couches dont l'épaisseur était de 10 mm ont été imprimées à une vitesse horizontale de 10 mm/s avec un volume d'extrusion de 4 ml/s. Le délai de dépôt entre chaque couche était imposé à 2 minutes pour les raisons mentionnées précédemment.



(a) Imprimante BK3D

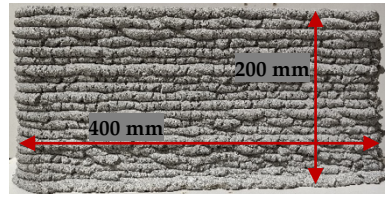
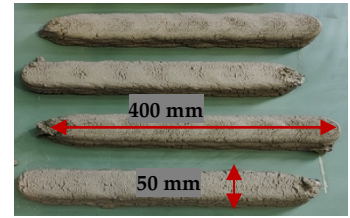
(b) Élément imprimé de
50x200x400 mm³(c) Élément imprimé de
50x40x400 mm³

FIGURE 3. Imprimante à portative et les éléments imprimés

D. Résistances mécaniques à l'état durci

Les résistances mécaniques ont été évaluées sur des éprouvettes moulées et imprimées. Les essais de flexion trois points et de compression ont été réalisés conformément à la norme NF EN 196-1. Les éléments de dimensions 50x200x400 mm³ et 50x40x400 mm³ imprimés ont été sciés et polis en 40x40x160 mm³ et 40x40x40 mm³ et la sollicitation mécanique a été appliquée suivant la direction longitudinale (X), la direction transversale (Y) ainsi que la direction normale (Z) comme illustré sur la FIGURE 4 et FIGURE 5.

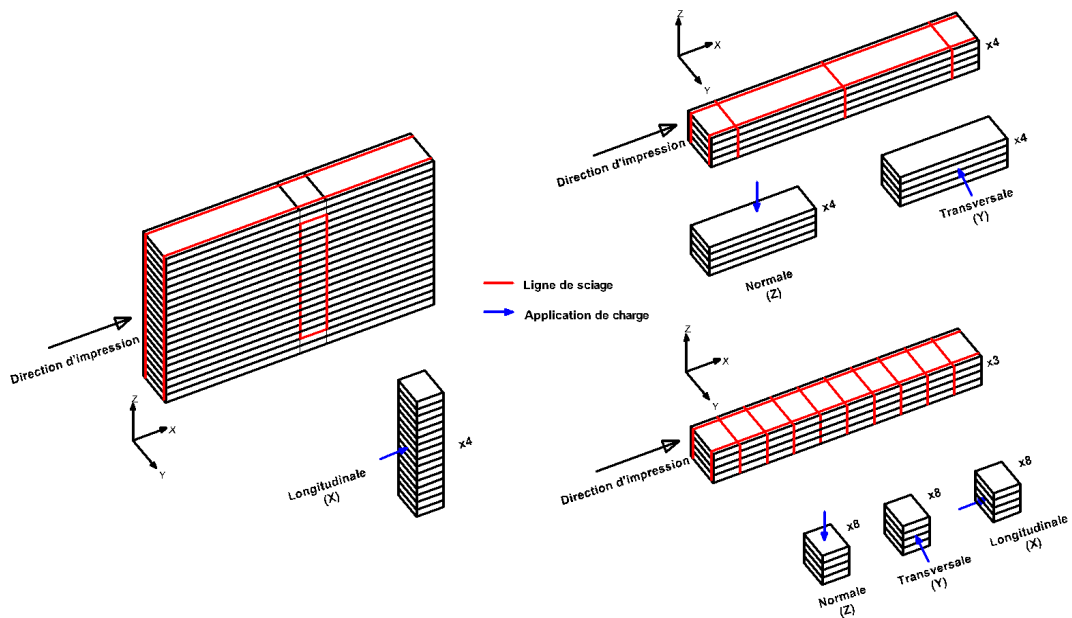


FIGURE 4. Sciage des éléments imprimés et directions d'application de charge

(a) Eprouvettes 40x40x160 mm³(b) Eprouvettes 40x40x40 mm³

FIGURE 5. Eprouvettes M-CEM I après sciage

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Ouvrabilité et contrainte de seuil de cisaillement

Un matériau cimentaire adapté à l'impression 3D doit être suffisamment fluide pour l'extrusion tout en présentant un seuil qui permette aux couches inférieures de supporter le poids des couches supérieures. Ce paramètre peut être évalué par des mesures d'affaissement (Ma et al., 2018; Li et al., 2023). Pour différents niveaux d'affaissements, des essais d'extrusion ont été réalisés afin de déterminer la zone de bonne imprimabilité comme le montre la FIGURE 6 (a). L'extrusion était assurée pour un affaissement de 100 mm (FIGURE 2 (a)), mais une perte de stabilité de la couche inférieure a été observée rapidement, ceci ne permettait donc pas d'atteindre les hauteurs visées. Pour un affaissement de 35 mm (FIGURE 2 (c)), il n'était plus possible de réaliser une extrusion dans de bonnes conditions. Ainsi, pour garantir une bonne extrudabilité tout en assurant la stabilité des couches, l'intervalle d'affaissement retenu était compris entre de 50 et 90 mm. Ce domaine correspond également à l'intervalle proposé par (Ma et al., 2018) qui recommande un affaissement compris entre 32 et 88 mm. En dehors des essais d'ouvrabilité, l'essai de prise a été effectué et les résultats ont montré que la prise n'avait que très peu d'influence sur l'impression, puisque chaque gâchée a été imprimée dans les 25 premières minutes après le malaxage.

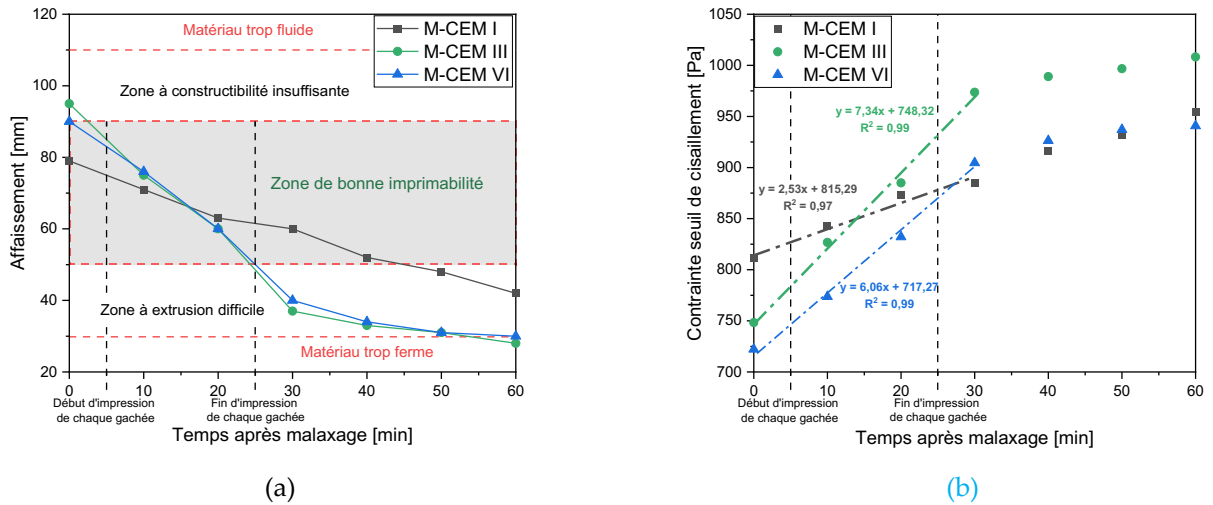


FIGURE 6. Variation de l'affaissement (a) et de la contrainte de seuil statique (b) des différents mortiers.

Nous avons estimé la contrainte seuil de cisaillement (τ_s) des mortiers en tenant compte de l'évolution de l'affaissement (s). Cette estimation se base sur l'équation de (Murata, 1984) modifiée par (Harbouz et al., 2023).

$$\tau_s = \frac{1}{6} \rho g \left((2H - s) - \frac{H^2}{(2H - s)^2} \right) \quad \text{EQUATION 1}$$

Où ρ est la densité apparente du matériau, g est l'accélération de la gravité et H est la hauteur du cône MBE qui est 150 mm. Comme le montre la FIGURE 6 (b), la contrainte de cisaillement des mortiers a subi une augmentation rapide dans les 30 premières minutes. Pour définir la vitesse de

structuration A_{thix} en Pa/min, nous avons considéré l'évolution du seuil en fonction du temps comme linéaire en utilisant l'équation proposée par (Roussel, 2006) :

$$\tau_s(t) = \tau_{s,0} + A_{thix}t \quad \text{EQUATION 2}$$

Où $\tau_{s,0}$ représente le seuil d'écoulement initial du mortier dans un état déstructuré et t est la durée de la période de repos du mortier. Les vitesses de structuration des mortiers à ciment bas carbone sont relativement proches et supérieures à celle du mortier de CEM I (TABLEAU 1).

TABLEAU 1. Contrainte de seuil de cisaillement et vitesse de structuration des mortiers

Mortiers	Contrainte de seuil après malaxage (Pa)	A_{thix} (Pa/min)
M-CEM I	815,29	2,53
M-CEM III	748,32	7,34
M-CEM VI	717,27	6,06

B. Résistances mécaniques

Les essais de résistance à la flexion et à la compression ont été réalisés sur les éprouvettes imprimées et les éprouvettes moulées. Pour les éprouvettes imprimées, la charge a été appliquée suivant les trois directions illustrées sur la FIGURE 4. Les résultats à 28 jours sont présentés sur la FIGURE 7. En flexion, la vitesse de chargement était de 50 N/s. Les valeurs des résistances dans les trois directions pour les trois mortiers sont présentées sur la FIGURE 7 (a). Chacune des barres de l'histogramme correspond à la valeur moyenne calculée sur 4 éprouvettes au minimum. En analysant la résistance à la flexion des différents mortiers, on s'aperçoit que les éprouvettes imprimées présentaient des résistances supérieures aux éprouvettes moulées (toutes directions confondues). Lorsque les éprouvettes de M-CEM I ont été sollicitées dans la direction Z, la résistance à la flexion était supérieure de 59% par rapport à des éprouvettes moulées. En revanche, la résistance à la flexion mesurée suivant cette même direction des éprouvettes imprimées à base de mortier de ciment bas carbone M-CEM III et M-CEM VI était respectivement supérieure de 99% et 10% (par rapport aux éprouvettes moulées). Si l'on compare les résistances des éprouvettes imprimées entre elles, la résistance suivant la direction longitudinale (X) fut la plus faible indépendamment du matériau. Par ailleurs, lorsque la direction (X) est comparée à la direction (Z), celle-ci était inférieure de 19%, 24% et 5% respectivement pour les mortiers M-CEM I, M-CEM III et M-CEM VI. Enfin, les résistances suivant Y des mortiers de ciment bas carbone étaient les plus importantes. Lorsque ces valeurs sont comparées à la direction Z, celles-ci étaient supérieures de 15% et 7% respectivement pour le M-CEM III et le M-CEM VI.

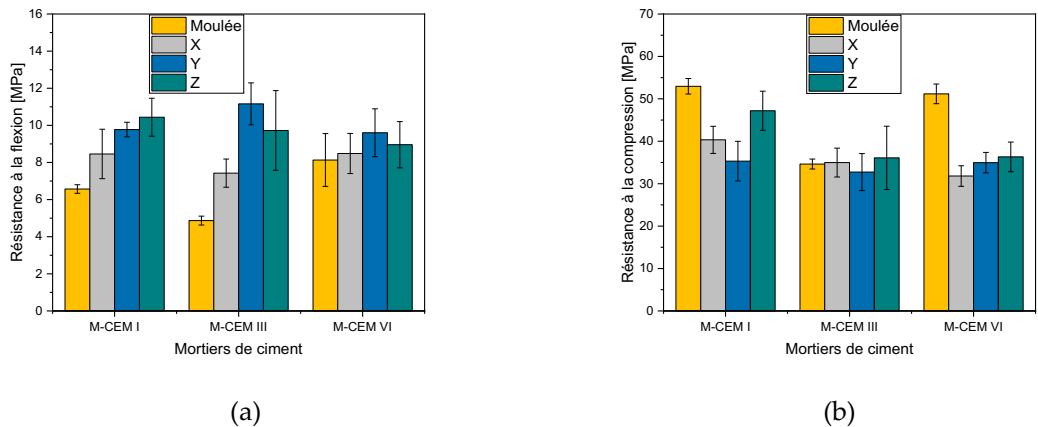


FIGURE 7. Résistance à la flexion (a) et à la compression (b) des éprouvettes moulées et imprimées mesurées à 28 jours

Une synthèse de nos résultats est présentée sur le (TABLEAU 2). Afin d'évaluer les ratios d'anisotropie des éprouvettes imprimées, l'ensemble des mesures ont été normée par rapport à la direction Z.

TABLEAU 2. Dépendances directionnelles de la résistance à la flexion des mortiers imprimés : Normalisation des mesures par rapport à la direction Z

Références	Normalisation par rapport à Z		
	Moulée	X	Y
M-CEM I	0,63	0,81	0,94
M-CEM III	0,50	0,76	1,15
M-CEM VI	0,91	0,95	1,07
(Panda et al., 2017a)*	-	0,60 à 0,80	0,91 à 0,99
(Paul et al., 2018)	0,94	-	1,06
(Wolfs et al., 2019)	1,00	0,86	1,10
(Rahul et al., 2019)*	0,83 à 0,84	0,50 à 0,56	0,96

(*) fibré

Les résultats de (Paul et al., 2018; Wolfs et al., 2019) confirment que la résistance à la flexion dans la direction latérale est supérieure aux deux autres. Néanmoins, la présence des fibres semble augmenter la résistance dans la direction normale (Panda et al., 2017a; Rahul et al., 2019). L'alignement des fibres imposé par le processus d'impression engendre une anisotropie additionnelle de la couche, ceci pourrait influencer la résistance des éléments imprimés dans la direction normale. La résistance dans la direction longitudinale demeure la plus faible.

En ce qui concerne les essais de compression, la vitesse de chargement était 2400 N/s. Les résultats sont présentés sur la FIGURE 7 (b). Les résistances à la compression des éprouvettes imprimées de M-CEM III étaient comparables à celles des éprouvettes moulées. Par ailleurs, les résistances suivant Z des mortiers M-CEM I et M-CEM VI étaient respectivement inférieures de 11% et 29% par rapport aux éprouvettes moulées. La différence entre les résistances des éprouvettes imprimées dans les trois directions n'était pas significative pour les mortiers de ciment bas

carbone. Lorsque les résultats suivant les directions X et Y sont comparés à la direction Z, les mesures pour le M-CEM I étaient inférieures de 15% et 25% respectivement. Comparant nos résultats à la littérature (TABLEAU 3), la plus faible résistance à la compression est généralement dans la direction transversale (Y). En revanche, les résultats de (Panda et al., 2017a) suggèrent plutôt une résistance supérieures suivant la direction X. Rappelons que, d'une part, il est utilisé dans cette étude un matériau fibré, d'autre part, la méthode de mise en œuvre exploite un procédé de pompage pour le transport du matériau. D'après (Panda et al., 2017a), cela pourra être dû à la densification dans cette direction en raison d'un compactage plus serré du matériau (phénomène induit par la pression du pompage).

Les résultats de (Paul et al., 2018) suggèrent un matériau quasi-isotrope (utilisation d'une buse rectangulaire dans cette étude). Les auteurs indiquent que la forme de l'orifice de sortie et la complexité de l'élément imprimé sont des paramètres d'impression qui peuvent influencer les propriétés mécaniques des éléments imprimés.

TABLEAU 3. Dépendances directionnelles de la résistance à la compression des mortiers imprimés : Normalisation des mesures par rapport à la direction Z

Références	Normalisation par rapport à Z		
	Moulée	X	Y
M-CEM I	1,12	0,85	0,75
M-CEM III	0,96	0,97	0,91
M-CEM VI	1,41	0,88	0,96
(Panda et al., 2017a)*	-	1,04 à 1,11	0,91 à 1,02
(Paul et al., 2018)	0,99	1,00	0,99
(Wolfs et al., 2019)	1,48	1,02	1,02
(Rahul et al., 2019)*	1,15 à 1,20	0,94 à 0,96	0,95 à 0,97

(*) fibré

IV. CONCLUSION

Dans cette étude, les résistances mécaniques des mortiers de ciment bas carbone imprimés ont été étudiées. La proportion de mélange de chaque mortier a été conçue en se basant sur leur ouvrabilité. Les essais mécaniques multidirectionnels montrent une anisotropie des éléments imprimés. L'ensemble des résultats ont montré que les éléments imprimés étaient plus résistants à la flexion lorsque la sollicitation était exercée suivant la direction transversale (Y) et moins résistants suivant la direction longitudinale d'impression (X). En compression, les résistances mesurées étaient supérieures suivant la direction normale. L'anisotropie se manifeste principalement lorsque la sollicitation mécanique engendre une expansion (cas de la compression) ou une tension (cas de la flexion) perpendiculaire aux couches. Quelle que soit la direction, les éprouvettes moulées présentaient une résistance à la flexion inférieure à celle des éprouvettes imprimées. En revanche, les éprouvettes imprimées étaient moins résistantes à la compression que les éprouvettes moulées.

La connaissance ainsi que la maîtrise des propriétés anisotropes des éléments imprimées est primordiale afin d'adopter une stratégie d'impression optimale qui tienne compte des sollicitations futures des pièces imprimées.

REMERCIEMENTS

Ce travail fait partie du projet "REV3D" financé par la fondation des entreprises école française du béton (R: Recherche, E: Enseignement, V: Valorisation).

REFERENCES

- Abdalla, H., Fattah, K.P., Abdallah, M., Tamimi, A.K., 2021. Environmental Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House. *Sustainability* 13, 11978. <https://doi.org/10.3390/su132111978>
- Alhumayani, H., Gomaa, M., Soebarto, V., Jabi, W., 2020. Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete. *Journal of Cleaner Production* 270, 122463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122463>
- 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
- Han, Y., Yang, Z., Ding, T., Xiao, J., 2021. Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete. *Journal of Cleaner Production* 278, 123884. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123884>
- Harbouz, I., Rozière, E., Loukili, A., Yahia, A., 2023. Effect of the structuration rate on dimensional stability and mechanical performance of 3D printed mortars. *Materials Today: Proceedings* S2214785323041019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.231>
- Infociments, n.d. Solutions Béton RE2020 - Concevoir des logements avec des solutions en béton. Les bétons bas carbone (10) [WWW Document]. URL <https://www.infociments.fr/reduire-les-emissions-de-co2/solutions-beton-re2020-concevoir-des-logements-avec-des-solutions-en-beton-les-betons-bas-carbone-et-les-pistes-hors-go> (accessed 8.23.23).
- Ji, G., Xiao, J., Zhi, P., Wu, Y.-C., Han, N., 2022. Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates. *Construction and Building Materials* 325, 126740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126740>
- Lafarge, n.d. Lafarge lance avec succès le premier ciment CEM VI certifié en France, un ciment ECOPlanet à empreinte carbone réduite. [WWW Document]. URL <https://www.lafarge.fr/lafarge-lance-avec-succes-le-premier-ciment-cem-vi-certifie-en-france-un-ciment-ecoplanet-empreinte-carbone-reduite> (accessed 1.9.24).

- Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., Law, R., Gibb, A.G.F., Thorpe, T., 2012. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research* 42, 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>
- Li, M., Rahal, S., Kaci, A., Seibou, A.-O., Tong, Y., 2023. Potential Application of Flax Fibers in 3D Printed Cementitious Materials. *NanoWorld J* 9. <https://doi.org/10.17756/nwj.2023-s2-059>
- Ma, G., Li, Z., Wang, L., 2018. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and Building Materials* 162, 613–627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>
- Ma, G., Li, Z., Wang, L., Wang, F., Sanjayan, J., 2019. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. *Construction and Building Materials* 202, 770–783. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>
- Meurer, M., Classen, M., 2021. Mechanical Properties of Hardened 3D Printed Concretes and Mortars—Development of a Consistent Experimental Characterization Strategy. *Materials* 14, 752. <https://doi.org/10.3390/ma14040752>
- Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2020. Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports [WWW Document]. URL <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lempreinte-carbone-des-francais-reste-stable> (accessed 8.23.23).
- Mohan, M.K., Rahul, A.V., Van Tittelboom, K., De Schutter, G., 2020. Evaluating the Influence of Aggregate Content on Pumpability of 3D Printable Concrete, in: Bos, F.P., Lucas, S.S., Wolfs, R.J.M., Salet, T.A.M. (Eds.), *RILEM Bookseries*. Springer International Publishing, Cham, pp. 333–341. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_34
- Murata, J., 1984. Flow and deformation of fresh concrete. *Matériaux et Constructions* 17, 117–129. <https://doi.org/10.1007/BF02473663>
- Panda, B., Chandra Paul, S., Jen Tan, M., 2017a. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters* 209, 146–149. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>
- Panda, B., Paul, S.C., Hui, L.J., Tay, Y.W.D., Tan, M.J., 2017b. Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. *Journal of Cleaner Production* 167, 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.165>
- Paul, S.C., Tay, Y.W.D., Panda, B., Tan, M.J., 2018. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 18, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>
- Press Releases, 2016. 3D Concrete Printing Market to Reach \$ 56.4 Million by 2021 [WWW Document]. 3Printr.com. URL <https://www.3printr.com/3d-concrete-printing-market-reach-56-4-million-2021-1239664/> (accessed 8.25.22).

Rahal, S., Kaci, A., Skoudarli, A., 2023. Evaluation of mechanical anisotropy induced by 3D printing process for earth-based materials. *Materials Today: Proceedings* S2214785323040622. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.192>

Rahman, M.K., Baluch, M.H., Malik, M.A., 2014. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. *Construction and Building Materials* 50, 710–717. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.025>

Rahul, A.V., Santhanam, M., Meena, H., Ghani, Z., 2019. Mechanical characterization of 3D printable concrete. *Construction and Building Materials* 227, 116710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>

Roussel, N., 2006. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research* 36, 1797–1806. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.025>

Tinoco, M.P., de Mendonça, É.M., Fernandez, L.I.C., Caldas, L.R., Reales, O.A.M., Toledo Filho, R.D., 2022. Life cycle assessment (LCA) and environmental sustainability of cementitious materials for 3D concrete printing: A systematic literature review. *Journal of Building Engineering* 52, 104456. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104456>

Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., Salet, T.A.M., 2019. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research* 119, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>

Yang, Y., Wu, C., Liu, Z., Wang, H., Ren, Q., 2022. Mechanical anisotropy of ultra-high performance fibre-reinforced concrete for 3D printing. *Cement and Concrete Composites* 125, 104310. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104310>

Zhang, Yu, Zhang, Yunsheng, She, W., Yang, L., Liu, G., Yang, Y., 2019. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials* 201, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061>