

21^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Polytechnique Montréal, Montréal, Canada
5 et 6 juillet 2023

INFLUENCE DE L'UTILISATION DE GRANULATS FINS RECYCLES SUR LES PROPRIETES MECANIQUE DES BETONS IMPRIME 3D

Y. Muy^A, L. Courard^A, X. Garnavault^A, D. Bulteel^{B,C}, M. Taleb^{B,C}, S. Remond^D, J. Hubert^A

A Laboratoire Matériaux de Construction (LMC), Université de Liège, Liège, Belgique

B IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Centre for Materials and Processes, F-59000 Lille, France

C Univ. Lille, Institut Mines-Télécom, Univ. Artois, Junia, ULR 4515 - LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement, F-59000 Lille, France

D. Univ Orléans, Univ Tours, INSA CVL, LaMé, EA 7494, France

RÉSUMÉ :

L'impression en 3D du béton est un procédé innovant dans le domaine de construction, permettant la fabrication rapide et sur mesure de structures complexes. Ce travail actuel s'intéresse à présenter le potentielle d'utilisation de granulats fins recyclés en Belgique dans la production d'encre cimentaire pour le béton imprimé en 3D.

Ce travail vise à comparer la résistance en compression, en flexion et en traction de mortiers contenant du sable recyclé ou du sable naturel. Les résultats démontrent que le remplacement total du sable naturel par du sable recyclé permet d'obtenir un mortier ayant une performance mécanique très satisfaisante et similaire à celle du mortier de référence. Aucun impact significatif sur la résistance en flexion, en compression ou en traction n'a été observé.

L'influence de la méthode de mise en œuvre a également été étudiée via la comparaison d'échantillons moulés et imprimés. Celle-ci a un impact considérable sur la résistance à la compression. En effet, le mortier imprimé résiste moins à la compression que le mortier moulé. De plus, la résistance en compression du mortier imprimé présente un comportement anisotrope avec des résistances plus importante lorsque la charge est appliquée perpendiculairement aux cordons d'impression. Le schéma de rupture obtenu lors des essais de traction directe ne correspond pas à l'interface entre deux cordons. Ces deux résultats nous permettent de conclure que le matériau ne présente pas de plan de faiblesse mécanique assurant ainsi la qualité des éléments de mobilier urbain.

1. INTRODUCTION

L'impression 3D béton est un procédé innovant dans le domaine de la construction permettant la fabrication rapide et sur mesure de structures complexes. Afin de garantir la durabilité et les performances mécaniques des produits imprimés en 3D, il est essentiel de choisir les matériaux appropriés. Cette technique a donc fait l'objet de nombreuses études et des avancées significatives ont été réalisées ces dernières années (Hager et al., 2016; Mechtcherine et al., 2020; Rehman and Kim, 2021; Van Der Putten et al., 2019). Ces études ont principalement porté sur les paramètres de fabrication et sur les propriétés des structures imprimées et ont permis de comprendre les conditions requises à l'imprimabilité des bétons. Cependant, la très vaste majorité des mélanges utilisés à ce jour pour l'impression 3D béton sont basés sur d'importante quantité de ciment et de granulats naturels ce qui en fait un matériau à fort impact environnemental. Pour mitiger ce handicap, deux axes sont possibles : développer des liants alternatifs permettant de réduire l'emprunte carbone du matériau et utiliser des granulats recyclés limitant ainsi la consommation de ressources naturelles en voie de raréfaction (Rémond et al., 2019).

L'utilisation de granulats recyclés dans les mélanges de béton est devenue une pratique courante pour favoriser la circularité et réduire l'impact environnemental de l'industrie de la construction. Les nombreuses recherches menées ces dernières années ont permis d'évaluer l'impact des granulats recyclés sur les propriétés physiques et mécaniques du béton (Courard et al., 2010; Dapena et al., 2011; Debieb et al., 2010; Evangelista and de Brito, 2007; Hubert and Courard, 2022; Khatib, 2005). Ces études antérieures ont examiné les caractéristiques des granulats recyclés ainsi que leur influence sur des propriétés mécaniques essentielles telles que la résistance en compression, la résistance en flexion, la résistance à l'usure, et autres. Les résultats ont démontré que l'utilisation de granulats recyclés peut affecter les performances mécaniques du béton, mais avec une gestion appropriée et des ajustements des mélanges, il est possible d'obtenir des bétons recyclés répondant aux exigences de performance requises.

Cet article expose des travaux expérimentaux menés dans le cadre du projet Interreg NWE CIRMAP (Circular economy via customisable furniture with Recycled MATERIALS for public Places) dont l'objectif est de développer une encre cimentaire à base de granulats recyclés pour l'impression 3D de mobilier urbain. Dans le cadre de cette étude, les propriétés mécaniques de l'encre développée sont étudiées. Spécifiquement, sa résistance en traction, en compression et en flexion, sont étudiées. Une attention particulière est donnée à l'influence du procédé de mise en œuvre via la comparaison d'éprouvettes moulées et imprimées. L'objectif étant de mettre en évidence la potentielle anisotropie des propriétés du matériau imprimé.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1 Matériaux et formulation

Les granulats fins recyclés, appelés sable recyclé (SR) dans ce travail, proviennent du recyclage de béton tout venant et ont été fournis par le centre de recyclage Tradecowall. Afin d'obtenir un ratio entre le diamètre de la buse d'impression et la taille maximale des grains d'au moins 10 (El Cheikh et al., 2017), la taille maximale des grains est limitée à 2 mm. Le sable recyclé présente une masse volumique de 2,46 tonnes/m³ et une absorption d'eau de 5,31%.

Les granulats naturels utilisés comme référence, appelés sable naturel (SN) dans ce travail, ont été extraits de la carrière de Saint Bonnet. La courbe granulométrie du sable naturel est très proche de celle du sable recyclé comme le montre la Figure 1. Ils ont une masse volumique de 2,64 tonnes/m³ et une absorption d'eau de 0,65%.

Le ciment Portland utilisé est de type CEMI 52,5N, provenant de l'usine Créchy de la société VICAT, est utilisé comme liant hydraulique, avec une masse volumique de 3,16 tonnes/m³. Les caractéristiques au clinker du ciment sont présentées dans le tableau Tableau 1.

Le plastifiant de type Polycarboxylate PCE et l'agent viscosant utilisés ont été fournis par la société Chryso.

Tableau 1 : Caractéristique du clinker du ciment CEMI 52,5N de VICAT

Phases minéralogiques	C3S	C2S	C3A	C4AF
Teneur en %	60,4	17,0	6,2	11,2

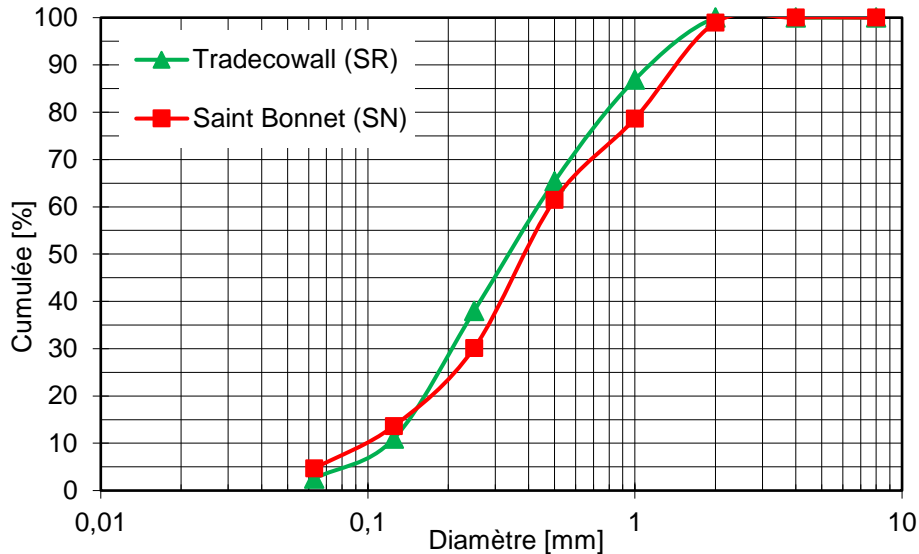


Figure 1 : Courbe granulométrique du sable recyclé de Tradecowall (SR) et du sable naturel de Saint Bonnet (SN)

Deux formulations de mortier ont été utilisées pour les essais, l'une avec du sable naturel (MSN) et l'autre avec du sable recyclé (MSR). Les proportions du mélange de référence à base de SN sont présentées au Tableau 2. Pour le second mélange (MSR), l'intégralité du SN a été remplacé par du SR (substitution massique) et l'eau de gâchage a été ajustée pour tenir compte de l'absorption plus importante du SR afin de travailler à E_{eff}/C constant.

Pour les échantillons réalisés au laboratoire, la séquence de malaxage du mortier commence par l'introduction du sable et de l'eau dans la cuve pour une pré-saturation de 300 secondes. Ensuite, le ciment, le viscosant et le plastifiant sont ajoutés et le mélange est malaxé pendant trente secondes à basse vitesse, suivi de 30 secondes à haute vitesse. Ensuite, après une courte pause de 30 secondes, le mortier qui colle aux parois de la cuve est ramené au centre en mélangeant. La séquence se termine en remettant le mélange à haute vitesse pendant 150 secondes. La mise en œuvre des échantillons a été réalisée conformément à la norme NBN EN 196-1 (NBN EN 196-1, 2016).

Tableau 2 : Proportion des mélanges du mortier (kg/m³)

	Ciment	Granulats	Eau	Plastifiant	Viscosant	E_{eff}/C
MSN/MSR	905,00	995,60	313,52	22,63	1,81	0,29

2.2 Impression 3D

L'impression a été réalisée à l'aide de l'imprimante visible à la Figure Figure 2a. Il s'agit d'une imprimante cartésienne dont le diamètre de la buse est de de 2 mm et la vitesse d'extrusion est fixée à environ 2,50 litres/min. Une gâchée de béton d'un volume de 50 litres est fabriquée en suivant une séquence de malaxage prolongée. Ce processus de mélange commence en combinant les premiers tiers des matériaux tels que le sable, le ciment et l'eau pendant 2 minutes, suivi par l'ajout du deuxième tiers comprenant le plastifiant et l'agent viscosant, qui est également mélangé pendant 2 minutes. Enfin, le troisième tiers est ajouté et mélangé pendant 11 minutes supplémentaires.

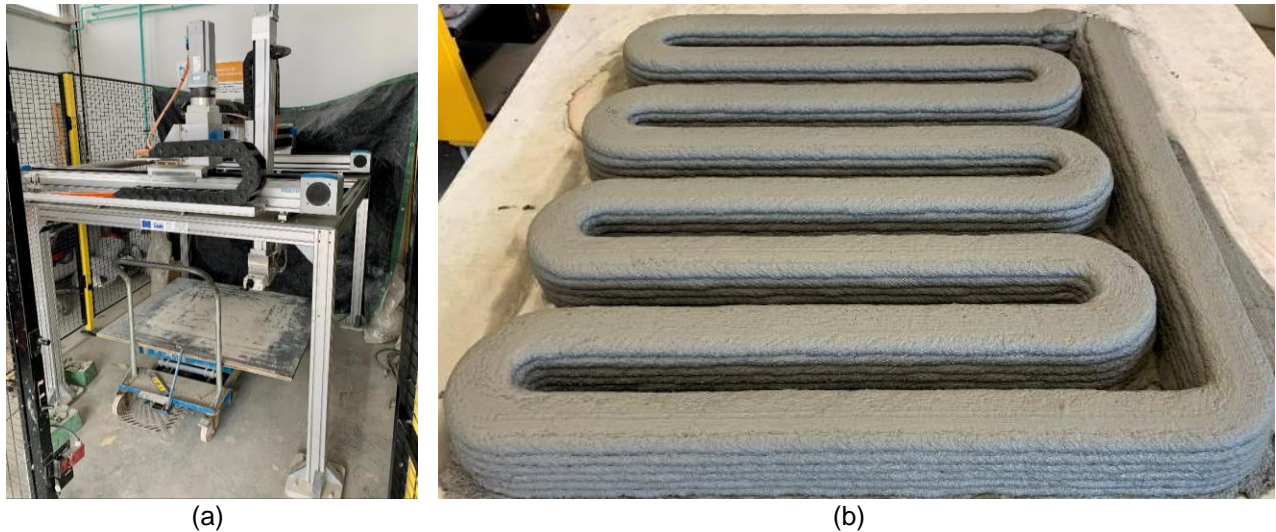


Figure 2 : Imprimante cartésienne sur portique disponible à l'IMT Nord Europe (a) et éléments en « S » imprimés (b)

Seule la formulation MSR a été imprimée pour produire des éléments. Des éléments dit en « S » ont été imprimés (voir Figure 2b) de manière continue jusqu'à 6 couches. Ceux-ci ont ensuite été recouverts d'un film plastique pendant 48 heures avant cure dans une chambre humide (HR de $95\pm 5\%$ et T du $20\pm 2^\circ\text{C}$). Par la suite, les notations utilisées sont MSR_M pour les échantillons moulés et MSR_I pour les échantillons imprimés.

2.3 Méthode expérimentale

Le Tableau 3 présente le récapitulatif des essais réalisés, les normes suivies, le type d'échantillons utilisés, leurs dimensions ainsi que les échéances d'essai.

Les essais de résistance en flexion et en compression ont été réalisés conformément à la norme NBN EN 196-1 (NBN EN 196-1, 2016) en utilisant des échantillons de $4\times 4\times 16\text{ cm}^3$. Deux modes de cure ont été adoptés pour les échantillons moulés afin d'étudier l'influence de la cure: la cure en chambre humide à la température de $20\pm 2^\circ\text{C}$ et à une humidité relative supérieure à 95% et une cure en condition contrôlée au laboratoire à la température de $20\pm 2^\circ\text{C}$ et à une humidité relative de $60\pm 5\%$. Avant chaque essai, les échantillons imprimés ont été rectifiés afin de les ramener aux dimensions prescrites par la norme. Les tests sur échantillons imprimés ont également été dédoublés afin de tester la direction parallèle (Orientation I selon oz) et la direction perpendiculaire (Orientation II selon ox) aux cordons d'impression comme illustré à la Figure 3.

L'essai de traction directe a été réalisé conformément à la norme NBN B15-211 (NBN B 15 211, 1974). Ce test a été effectué sur des échantillons de mortier cylindrique de diamètre 5 cm et d'une hauteur de 5 cm. Pour les échantillons moulés, ils ont été carottés à partir de cubes moulés de dimensions $15\times 15\times 15\text{ cm}^3$, tandis que les échantillons imprimés ont été carottés de manière verticale directement dans les pièces imprimées. La vitesse adoptée pour le test était de 0,10 MPa/s.

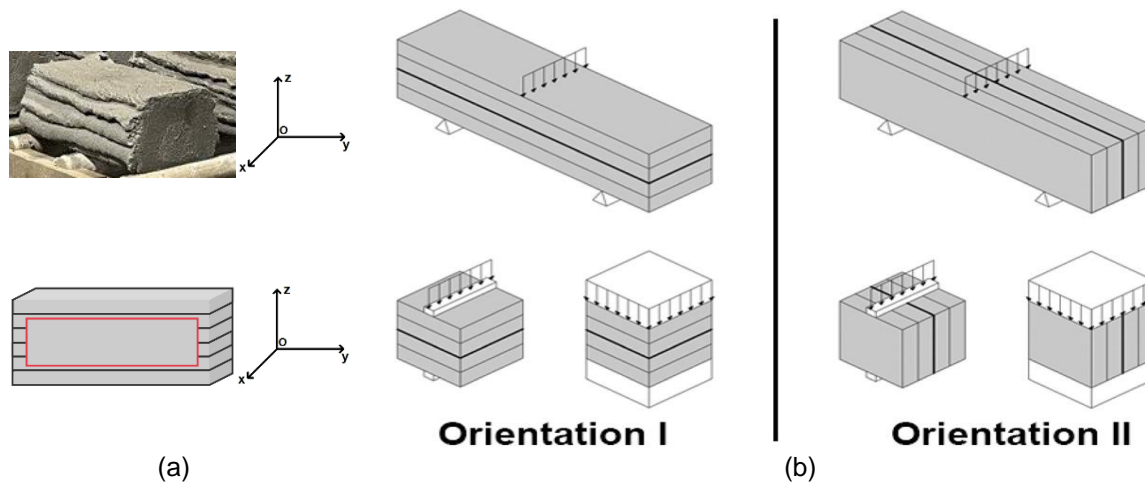


Figure 3 : Échantillon imprimé et le schéma représentant le prélèvement (a) et le type d'orientation de charge appliquée sur les échantillons (Wolfs et al., 2019) (b)

Tableau 3 : Récapitulatifs des essais utilisés et les paramètres correspondants

Essai	Norme	Échantillons	Dimension	Échéances
Résistance en flexion et en compression	NBN EN 196-1	Moulé Imprimé	4° 4° 16 cm ³ 4° 4° 16 cm ³	2, 7, 28, 56 et 91 jours 2, 7, 28, 56 et 91 jours
Résistance en traction	NBN B15-211	Moulé Imprimé	d=5 cm; h=5 cm d=5 cm; h=5 cm	91 jours 7, 28, 56 et 91 jours

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Influence d'incorporation des granulats recyclés sur la résistance mécanique

La Figure 4 illustre la résistance en flexion (a) et en compression (b) des mortiers MSN_M and MSR_M à différentes échéances. La résistance en flexion du matériau est globalement constante avec une valeur oscillant autour de 10 MPa quelle que soit l'échéance. Nous n'observons pas de différence significative entre les mortiers MSN_M et MSR_M.

Une évolution significative de la résistance en compression en fonction du temps est observée. Cette tendance est classique et due à la réaction d'hydratation du ciment. A nouveau, aucune différence significative ne peut être observée entre les deux mortiers.

Ces résultats montrent que l'encre imprimable à base de sable recyclé MSR possèdent de très bonnes propriétés mécaniques et qu'aucune perte significative ne peut être observée lorsque le sable recyclé est substitué au sable naturel. Cela diffère des études antérieures portant sur le remplacement du sable dans les bétons classiques (Dapena et al., 2011; Evangelista and de Brito, 2007; Khatib, 2005), où une diminution de la résistance en compression avait été observée.

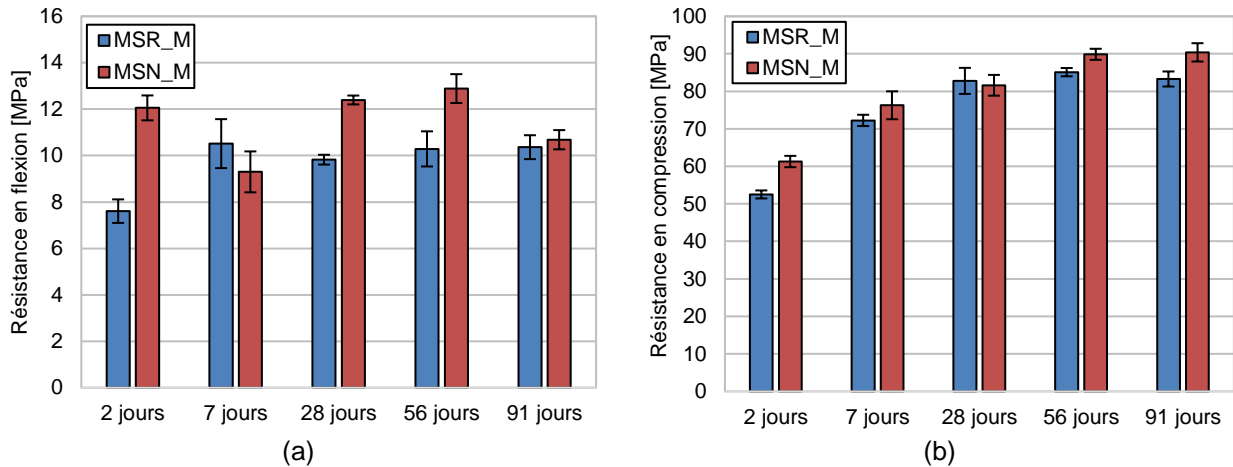


Figure 4 : Résistance en flexion et en compression des mortiers moulés à base de sable recyclé Tradecowall (MSR_M) et de sable naturel Saint Bonnet (MSN_M)

3.2 Influence de la cure sur la résistance mécanique

La Figure 5 montre l'influence de la méthode de cure sur la résistance en compression du mortier à base de sable recyclé MSR pour différentes échéances. Le mortier ayant fait sa cure à 60±5% d'humidité relative présente une résistance en compression plus faible que celui ayant fait sa cure en chambre humide et ce dès la première échéance. Cette différence ne fait que s'accroître avec le temps. En effet, le mortier ayant fait sa cure en chambre humide montre une évolution normale de sa résistance en compression avec le temps alors que la résistance en compression du mortier conservé en chambre climatique cesse de croître après 7 jours. Cette différence est particulièrement marquée sur l'encre cimentaire étudiée en raison de l'importante quantité de ciment utilisée dans sa formulation.

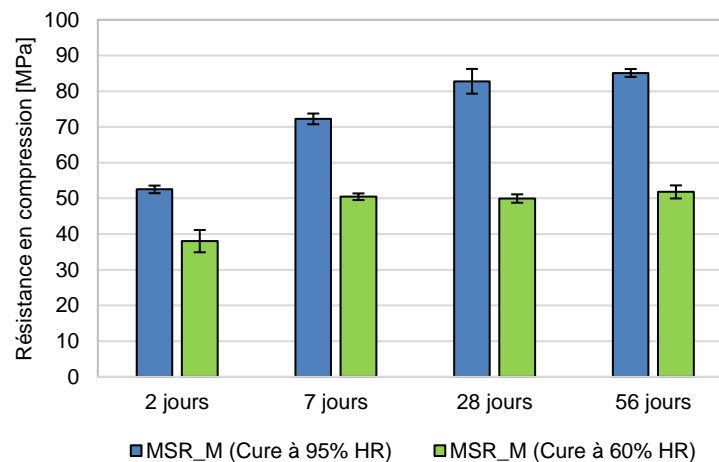


Figure 5 : Résistance en flexion et en compression du mortier moulé à base de sable recyclé Tradecowall (MSR_M) pour une cure en chambre humide et pour une cure dans un environnement contrôlé à 60±5% d'humidité relative.

3.3 Anisotropie de résistance mécanique

La Figure 6 présente les résultats des tests de résistance en compression des mortiers imprimés dans deux orientations, MSR_I (oz) et MSR_I (ox), en les comparant aux mortiers moulés, MSR_M. Dans l'ensemble, les résistance en compression des échantillons imprimés sont plus faible que celles des échantillons moulés en raison de la méthode de mise en œuvre. Par exemple, à 28 jours, la résistance en compression du mortier imprimé diffère d'environ 35% par rapport au mortier moulé pour l'orientation MSR_I (oz), et d'environ 16% pour l'orientation MSR_I (ox). De plus, en ce qui concerne l'anisotropie de la résistance en compression, les résultats indiquent également que les mortiers imprimés sont plus résistants dans l'orientation II (ox), ce qui est en accord avec les conclusions antérieures de plusieurs auteurs (Ma et al., 2019; Mechtcherine et al., 2020; Wolfs et al., 2019), qui sont cités dans la revue de Rehman et Kim (2021). Cette observation peut être attribuée à une zone d'interface moins solide en dehors de la zone de compression des échantillons MSR_I (oz) par rapport à celle des échantillons MSR_I (ox).

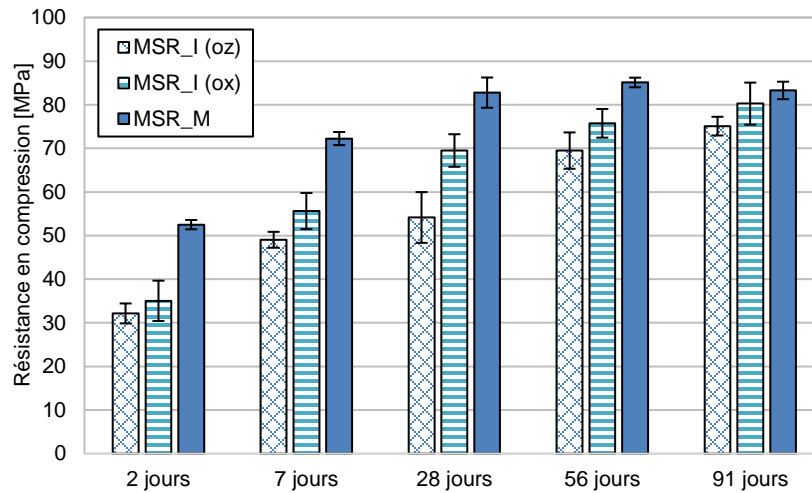


Figure 6 : Résistance en compression des mortiers moulés (MSR_M) et imprimés (MSR_I) selon deux orientations d'impression

3.4 Adhérence entre couche

Les résultats des essais de traction directe réalisés sont visibles à la Figure 7. La résistance en traction du matériau est de l'ordre de 2 MPa ce qui est tout à fait satisfaisant pour un matériau cimentaire. Le schéma de rupture du matériau ne correspond pas à l'interface entre deux des cordons d'impression et tend à valider l'hypothèse selon laquelle notre matériau ne présente pas d'interface entre les couches. Ce résultat va dans le même sens que ceux obtenus suite aux essais de compression. En effet, si le matériau présentait des interfaces ou plans de faiblesses entre les couches cela aurait dû se marquer par une résistance en compression plus faible selon la direction MSR_I(ox) que selon l'autre direction en raison du coefficient de poisson.

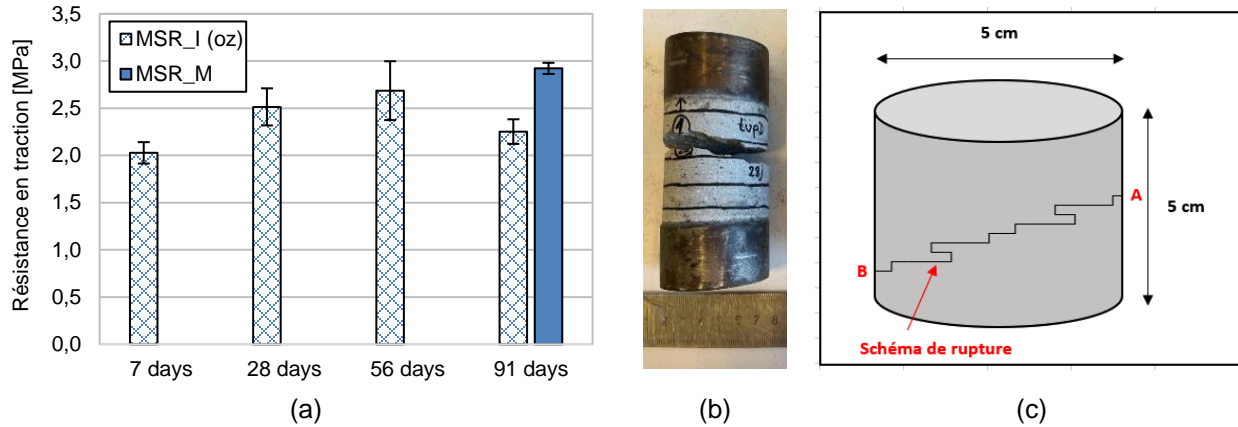


Figure 7 : Résistance en traction des échantillons moulés MSR_M et imprimés MSR_I (oz) (a), échantillon après testé (b) et schéma de rupture après la traction (c)

4. CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif de mettre en évidence la possibilité de substituer les granulats naturels par des granulats recyclés locaux (wallon dans ce cas) pour la production d'une encre cimentaire pour l'impression 3D béton. Les résultats obtenus concernant les performances mécaniques telles que la résistance en flexion, en compression et en traction permettent de tirer certaines conclusions:

- ◁ Il est possible de remplacer 100 % des granulats naturels par des granulats recyclés sans diminution significative de la résistance mécanique (flexion et compression).
- ◁ La méthode de mise en œuvre (moulé ou imprimé) a un impact significatif sur la résistance en compression du mortier.
- ◁ Étant donné que la teneur en ciment est élevée dans la formulation du mortier développé, la cure est indispensable afin de bénéficier de l'hydratation prolongée qui favorise ensuite la résistance mécanique.
- ◁ L'anisotropie de la résistance en compression est observée, et celle-ci est meilleure lorsqu'on applique la charge selon une orientation perpendiculaire à l'empilement des couches. En revanche, en traction, le mortier se comporte de manière isotrope car la rupture ne se produit pas entre les couches et présente une tendance à se déchirer de manière aléatoire.

Les résultats du projet CIRMAP soutiennent la faisabilité et la pertinence de l'utilisation de granulats recyclés dans la production d'encre cimentaire pour le béton imprimé en 3D. Les granulats recyclés utilisés offrent des performances mécaniques satisfaisantes, ce qui ouvre de nouvelles possibilités dans l'industrie de la fabrication de mobilier urbain. Ce projet confirme les avantages potentiels de cette approche innovante.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le programme Interreg North-West Europe qui finance ces travaux dans le cadre du projet CIRMAP.

6. RÉFÉRENCES

- Courard, L., Michel, F., Delhez, P., 2010. Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete. *Construction and Building Materials* 24, 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.040>
- Dapena, E., Alaejos, P., Lobet, A., Perez, D., 2011. Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering* 23, 414–422. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000183](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000183)
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimbre, R., 2010. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites* 32, 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.004>
- El Cheikh, K., Rémond, S., Khalil, N., Aouad, G., 2017. Numerical and experimental studies of aggregate blocking in mortar extrusion. *Construction and Building Materials* 145, 452–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.032>
- Evangelista, L., de Brito, J., 2007. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites* 29, 397–401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>
- Hager, I., Golonka, A., Putanowicz, R., 2016. 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering, Ecology and new building materials and products* 2016 151, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
- Hubert, J., Courard, L., 2022. Utilisation de granulats recyclés dans la construction: le projet de recherche SeRaMCo. *Presented at the Les journées techniques de la Société de l'industrie minérale : Valorisation des granulats recyclés dans les bétons préfabriqués.*
- Khatib, J.M., 2005. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research* 35, 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017>
- 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>
- Mechtcherine, V., Bos, F.P., Perrot, A., da Silva, W.R.L., Nerella, V.N., Fataei, S., Wolfs, R.J.M., Sonebi, M., Roussel, N., 2020. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research* 132, 106037. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106037>
- NBN B 15 211, 1974. *Concrete testing - Direct tensile strength.*
- NBN EN 196-1, 2016. *Méthode d'essais des ciments - Partie 1: Détermination des résistances.*
- Rehman, A.U., Kim, J.-H., 2021. 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics. *Materials* 14, 3800. <https://doi.org/10.3390/ma14143800>
- Rémond, S., Grellier, A., Khoury, E., Khalil, N., Karam, R., Bulteel, D., 2019. Formulation de mortiers imprimables incorporant des matériaux recyclés.
- Van Der Putten, J., De Schutter, G., Tittelboom, K., 2019. The Effect of Print Parameters on the (Micro)structure of 3D Printed Cementitious Materials, in: *RILEM Bookseries*. pp. 234–244. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_22
- 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>