



HAL
open science

Contrôle de l'eau efficace dans les mortiers imprimables en 3D fabriqués avec des granulats de béton recyclé

Mohamed El Karim Bouarroudj, Raghed Al Thib, Naima Belayachi, D. Bulteel, Sébastien Rémond

► To cite this version:

Mohamed El Karim Bouarroudj, Raghed Al Thib, Naima Belayachi, D. Bulteel, Sébastien Rémond. Contrôle de l'eau efficace dans les mortiers imprimables en 3D fabriqués avec des granulats de béton recyclé. NOMAD 2022 - 4e conférence internationale francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité, IMT Mines Alès; LMGC; LIFAM, Nov 2022, Montpellier, France. hal-03881311

HAL Id: hal-03881311

<https://hal.science/hal-03881311v1>

Submitted on 1 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contrôle de l'eau efficace dans les mortiers imprimables en 3D fabriqués avec des granulats de béton recyclé

Mohamed El Karim Bouarroudj¹, Raghed Al Thib¹, Naima Belayachi¹, David Bulteel^{2,3}, Sébastien Rémond¹

¹ Univ, Orléans, Univ, Tours, INSA-CVL, Lamé- EA7494, 8 Rue Léonard De Vinci, 45072 Orléans, France

² Univ. Lille, Institut Mines-Télécom, Univ, Artois, Junis, URL 4515- LGCgE- Laboratoire de Génie Civil et géo Environnement, -59000 Lille, France

³ IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Centre for Materials and Process, F-590000

ABSTRACT L'impression 3D de mortiers cimentaires attire l'attention de nombreux industriels et chercheurs. Cependant, les mortiers imprimables en 3D consomment de grandes quantités de ciment et de sables naturels. Il est donc urgent de trouver des matériaux alternatifs. Les granulats de béton recyclé (GBR) en particulier les sables pourraient constituer une solution intéressante pour l'impression 3D. Le contrôle de l'eau efficace (E_{eff}) est primordial pour assurer le contrôle du comportement rhéologique des mortiers pour l'impression 3D. L'utilisation du sable recyclé après 24 heures d'immersion semble être le moyen le plus simple pour contrôler l'eau efficace du mortier, néanmoins cette démarche n'est pas facile à mettre en œuvre sur site. Ainsi, une méthode simple basée sur un test d'affaissement est utilisée afin de quantifier l'absorption d'eau réelle en fonction de l'état d'humidité initial du sable. Quatre sables recyclés avec différents coefficients d'absorption d'eau (WA) sont utilisés. Des essais d'absorption sont tout d'abord réalisés après 15 minutes et 24 heures d'immersion. Les résultats montrent que plus de 90% d'absorption se produisent dans les 15 premières minutes. Ensuite des essais d'étalement du mortier réalisé avec le sable saturé pendant 15 minutes sont comparés avec la même composition de mortier réalisé avec un sable sec. Les résultats montrent des étalements équivalents pour les deux cas. Ainsi, environ 90% de la capacité d'absorption du sable recyclé est atteinte dans le mortier réalisé avec un sable recyclé sec.

Keywords Granulat de béton recycle (GBR), Impression 3D, Mortier, Porosité, Sable, Absorption d'eau

I. INTRODUCTION

Face aux problématiques environnementales, aux développement technologique et industriel, le domaine de la construction connaît une évolution de plus en plus importante. Il devient ainsi urgent de développer des matériaux et des techniques de construction permettant de faciliter la réalisation d'un certain nombre de pièces in situ ou en préfabrication. L'utilisation de l'impression 3D a déjà connu un grand succès dans différents domaines industriels et elle est considérée comme étant une technique très prometteuse dans le domaine de la construction (Roussel, 2018).

L'utilisation de l'impression 3D nécessite le développement d'un matériau avec des exigences et caractéristiques très spécifiques. Dans l'impression 3D, le mortier doit tout d'abord être suffisamment fluide pour pouvoir l'extruder et il doit ensuite être assez ferme pour conserver sa forme et supporter les couches supérieures (Khalil *et al.*, 2017). Pour satisfaire ce cahier des charges, il est nécessaire de contrôler très précisément le comportement rhéologique du mortier, notamment sa quantité d'eau efficace, ce qui peut être très délicat avec des sables recyclés.

L'utilisation des granulats de béton recyclé pour des mortiers imprimables reste encore complexe car liée d'un côté à leur forte capacité d'absorption et au contrôle de l'eau efficace pour des mortiers fabriqués avec de faibles rapports eau efficace sur liant (Barbudo *et al.*, 2013). Ainsi, contrôler l'état de saturation des sables recyclés (SR) et connaître leur coefficient d'absorption d'eau est plus que primordiale pour l'impression 3D.

L'objectif de cette recherche est de mettre au point un essai simple pour contrôler l'eau efficace des mortiers et ainsi assurer leur imprimabilité. Pour cela, quatre différents SR sont utilisés, les trois premiers sont des sables modèles issus du concassage d'une pâte de ciment pure avec différents rapports eau efficace sur ciment et le quatrième est un sable recyclé issu d'un procédé industriel provenant d'Allemagne dans le cadre du projet CIRMAP autour du développement des mortiers imprimables à base de sables recyclés fin.

II. Matériel et méthode

A. Préparation des sables recyclés

Le premier sable recyclé (SRH) est un sable issu d'un procédé de recyclage industriel allemand utilisé dans le cadre du projet Cirmap (HEBEGER). Les trois autres sables recyclés sont des sables modèles préparés au laboratoire par concassage et tamisage à sec.

Trois pâtes de ciment pures ont été fabriquées au laboratoire avec trois rapports eau/ciment différents (0,3, 0,5, 0,7). Le ciment utilisé est un CEM I 52,5 N, conforme à la norme EN 197-1. Pour la pâte de ciment fabriquée avec un rapport eau/ciment égal à 0,3, un super-plastifiant a été utilisé.

Pour assurer une bonne homogénéisation lors de la fabrication de la pâte de ciment, la moitié de la quantité de ciment est d'abord ajoutée avec l'eau totale et mélangée pendant 90 secondes. Après cela, la seconde moitié est ajoutée et le processus de mélange se poursuit pendant 90 secondes supplémentaires. Pour le mélange réalisé avec du super-plastifiant, ce dernier est mélangé avec l'eau. A la fin du malaxage, la pâte de ciment est versée dans des bouteilles en plastique et vibrée lentement pour minimiser la présence de bulles d'air. Au final, les bouteilles sont scellées et mises en rotation continue pendant 3 heures (jusqu'au début de la prise) pour éviter la ségrégation. Les pâtes de ciment sont ensuite stockées à 20°C dans les bouteilles scellées pendant 90 jours pour assurer un haut degré d'hydratation (Frías and Cabrera, 2000)(Bentz, 2006).

Le concassage des granulats a été réalisé avec un concasseur à mâchoire de laboratoire. Pour éviter la production d'une quantité importante de particules fines, le concassage a été réalisé en deux étapes, d'abord avec une ouverture de 8 mm et ensuite avec une ouverture de 4 mm. Le deuxième passage au concasseur concerne uniquement les particules supérieures à 4 mm issues

du tamisage des granulats produits pendant le premier concassage. Quatre kilogrammes, environ, de particules supérieures à 4 mm pour chaque sable ont été gardés pour la caractérisation des matériaux. Les sables recyclés ainsi obtenus auront les notations suivantes : SR0.3, SR0.5 et SR0.7.

B. Caractérisation des matériaux

Pour les quatre sables recyclés des essais de granulométrie, de masse volumique ainsi que d'absorption d'eau ont été réalisés.

Le coefficient d'absorption d'eau des différentes fractions est déterminé selon la norme européenne EN 1097-6. Il s'agit d'immerger un échantillon sec dans l'eau pour mesurer l'augmentation de masse de l'échantillon due à la pénétration de l'eau dans les pores. Le coefficient d'absorption d'eau est calculé avec l'équation (eq.1). M_{SS} correspond à la masse de l'échantillon à l'état saturé surface sèche. Cet état est obtenu après séchage progressif de l'échantillon avec différentes feuilles de papier absorbant coloré jusqu'à ce qu'aucune trace d'eau ne puisse être observée sur le papier. Cet essai est réalisé pour les fractions supérieures à 0,5 mm pour SRH et supérieur à 4mm pour les SR0.3, SR0.5 et SR0.7. M_s correspond à la masse sèche des échantillons à 60°C (Le *et al.*, 2016).

$$WA(\%) = \frac{M_{SS} - M_s}{M_s} \dots\dots\dots(1)$$

L'absorption d'eau des SR0.3, SR0.5 et SR0.7 est obtenue à partir de la fraction supérieure à 4 mm. L'absorption d'eau du SRH a été déterminée avec la méthode de (Zhao *et al.*, 2015) . Cette méthode est basée sur la relation entre l'absorption d'eau et la teneur en pâte de ciment. Pour déterminer l'absorption d'eau, l'échantillon est divisé en différentes classes granulaires et la teneur en pâte de ciment adhérente est estimée, pour chaque classe granulaire, avec une perte de masse entre 105°C et 475°C. (Zhao *et al.*, 2015) ont montré que la mesure du coefficient d'absorption d'eau n'est fiable que pour les classes granulaires les plus grossières (supérieures à 0,5 mm), ainsi l'absorption d'eau des particules les plus faibles est calculée par extrapolation. Connaissant l'absorption d'eau de chaque fraction du SRH, il est possible ainsi de déterminer l'absorption d'eau de la totalité de la fraction 0/4 mm

Afin d'étudier le rôle de l'état de saturation des matériaux, les essais d'absorption d'eau ont été réalisés après 15 minutes et 24 heures d'immersion.

Comme les sables recyclés sont poreux, la masse volumique réelle (qui prend en compte la porosité) a été calculée à partir de l'absorption d'eau à 24 heures d'immersion. La masse volumique réelle a été calculée avec l'équation (eq.3). ϕ_r représente la porosité du matériau, ρ_a représente la masse volumique absolue et ρ est la masse volumique réelle.

$$WA = \frac{\phi_r}{\rho_a \times (1 - \phi_r)} \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho = \rho_a \times (1 - \phi_r) \dots\dots\dots (3)$$

C. Composition des mortiers étudiés

Le tableau 1 présente les différentes compositions étudiées. Une composition de mortier avec un rapport $E_{eff}/C = 0,3$ a été utilisée en premier lieu pour étudier les mouvements d'eau entre le sable recyclé et une pâte de ciment avec un faible rapport ($E_{eff}/C = 0,3$). Une seconde composition avec

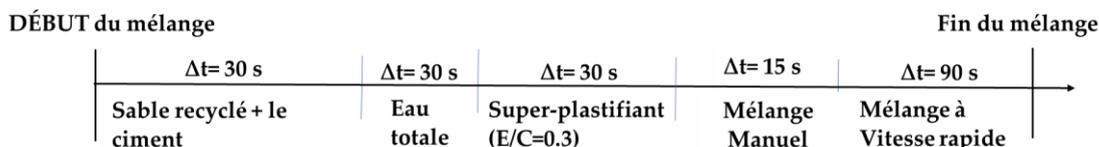
un rapport $E_{eff}/C = 0,7$ a été utilisée afin de vérifier si les mêmes mouvements d'eau sont présents pour des mortiers avec un rapport E_{eff}/C élevé. Dans les différentes formulations, le même volume de pâte ainsi que le même volume réel de sable sont utilisés.

Deux états de saturation du sable recyclé sont utilisés, le premier état est une immersion de 15 minutes et le second état est une utilisation de sable recyclé sec. Le protocole de malaxage est présenté dans la figure 1.

Tableau 1. Composition des mélanges réalisés

	E_{eff}/C	Ciment (g)	Eau efficace (g)	SP (%)	Sable (g)
SR0.3	0,3	905,0	271,5	1	818,3
	0,7	547,5	383,2	0	818,3
SR0.5	0,3	905,0	271,5	1	685,1
	0,7	547,5	383,2	0	685,1
SR0.7	0,3	905,0	271,5	1	583,5
	0,7	547,5	383,2	0	583,5
SRH	0,3	905,0	271,5	1	891,8
	0,7	547,5	383,2	0	891,8

❖ Sable recyclé sec :



❖ Sable recyclé saturé 15min :

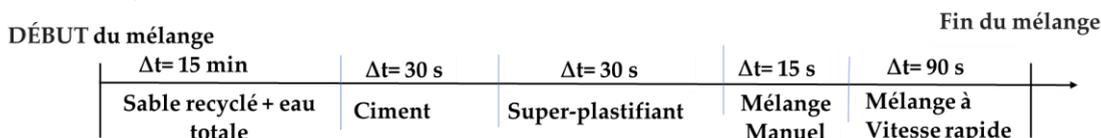


FIGURE 1. Protocole de malaxage pour les différents mélanges. Le mélange manuel permet de recentrer les matériaux dans le bol

D. Essais de maniabilité

Les essais de maniabilité ont été réalisés pour les différents mortiers. Pour les mortiers avec un rapport $E_{eff}/C=0,3$, des essais d'étalement avec la table à choc ont été réalisés. L'étalement est donc obtenu après 15 coups à la table à choc. Pour les mortiers avec un rapport $E_{eff}/C=0,7$ la maniabilité est obtenue à partir d'un étalement sous le poids propre du mortier (car les mortiers avec ce rapport E_{eff}/C ont un comportement auto-plaçant).

Tous les tests sont effectués trois fois pour assurer une bonne répétabilité. Les tests d'étalement sont réalisés avec un cône dont le diamètre supérieur est de 70 mm, le diamètre inférieur est de 100 mm avec une hauteur est de 60 mm.

E. Essais mécaniques

Les essais mécaniques sont réalisés sur des mortiers fabriqués avec les différents sables recyclés avec les deux différents états de saturation. Des éprouvettes prismatiques (40mm X 40mm X 160mm) ont été préparées selon la norme EN 196-1, pour mesurer la résistance en compression à 28 jours. La cure a été réalisée dans l'eau à une température constante de 20°C.

III. Résultats et discussion

A. Caractéristiques des sables recyclés utilisés

La figure 2 présente les courbes granulométriques des 3 sables modèles. Une faible différence dans la granulométrie est obtenue. Cette différence peut être due principalement à une différence de la résistance à la fragmentation des différentes pâtes de ciment lors du concassage. Ainsi, on remarque que le SR0,3 contient moins de fines en comparaison avec le SR0,7.

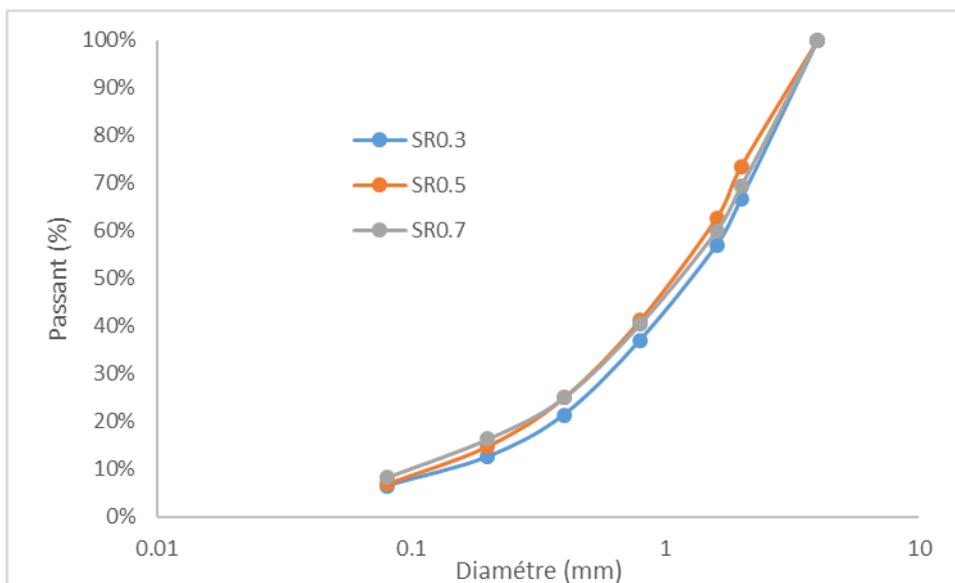


FIGURE 2. Granulométrie des différents sables recyclés utilisés dans l'étude

La figure 3 présente les coefficients d'absorption d'eau après 15 minutes et 24 heures d'immersion. Le SR0,7 présente le coefficient d'absorption d'eau le plus élevé et le SRH présente le coefficient le plus faible. Globalement, le coefficient d'absorption d'eau des sables modèles diminue avec le rapport E_{eff}/C . Pour le SRH, on remarque une plus faible absorption d'eau car ce dernier est composé d'un mélange entre une pâte de ciment et des granulats naturels alors que les autres sont faits à base de pâte pures (sans granulats).

La comparaison des coefficients d'absorption entre 15 minutes et 24 heures d'immersion dans l'eau pour les différents sables recyclés montre que plus de 90% de l'eau qui doit être absorbée à 24 heures est en réalité absorbée pendant les 15 premières minutes.

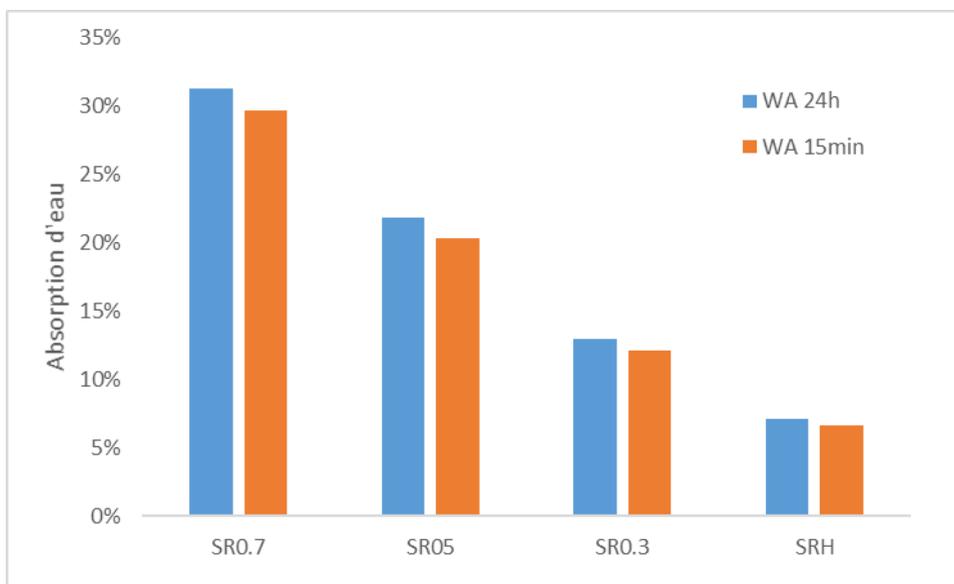


FIGURE 3. Résultats d'absorption d'eau pour les différents échantillons après une immersion de 15 minutes et 24 heures

B. Résultats de maniabilité

Selon (Maimouni *et al.*, 2018) et (Bouarroudj *et al.*, 2019), on peut considérer que lorsque le SR est immergé dans l'eau pendant 24 heures, peu d'échange d'eau se produit entre la pâte de ciment et le SR lors du malaxage et de la mise en place du mortier. L'eau efficace est dans ce cas bien connue. Les auteurs proposent qu'à partir d'essais d'étalement on puisse remonter à l'absorption d'eau à différents états de saturation. La méthodologie proposée consiste à réaliser des mortiers successifs, à partir d'un mortier avec un SR saturé à 24h et une teneur en eau totale de $W_{eff}+WA$, et d'ajouter à ce mélange au fur et à mesure un pourcentage donné d'eau. Une relation peut ainsi être écrite entre l'affaissement et l'eau efficace. Cette dernière est écrite à partir de l'affaissement du mortier fabriqué avec du sable sec et une teneur en eau égal à $W_{eff}+WA$, permettant d'identifier la quantité réelle de l'eau absorbé lorsque le sable est sec

Les résultats d'absorption d'eau ont montré des valeurs très proches entre une saturation à 24 heures et pendant 15 minutes. Ainsi, l'estimation de l'absorption d'eau des sables recyclés utilisés dans un mortier à l'état sec a été réalisée en comparaison avec celui saturé pendant 15 minutes, ce procédé est beaucoup plus simple à utiliser.

La figure 4 présente les différents résultats d'étalement obtenus pour les mortiers avec un SR sec ou saturé pendant 15 minutes. La méthode de (Maimouni *et al.*, 2018) et (Bouarroudj *et al.*, 2019) a été utilisée. Les résultats obtenus montrent que les mêmes quantités d'eau totales sont nécessaires pour obtenir un étalement équivalent, et ce pour les 4 SR utilisés avec les compositions réalisées avec les deux rapports E_{eff}/C .

Ainsi on peut conclure dans cette partie que l'absorption d'eau qui se produit au cours du malaxage et de la préparation du mortier lorsque le sable sec est utilisé est la même que celle qui se produit si le sable est présaturé pendant 15 minutes. Ce qui oriente le choix d'utilisation d'un sable sec directement pour le malaxage d'un mortier imprimable.

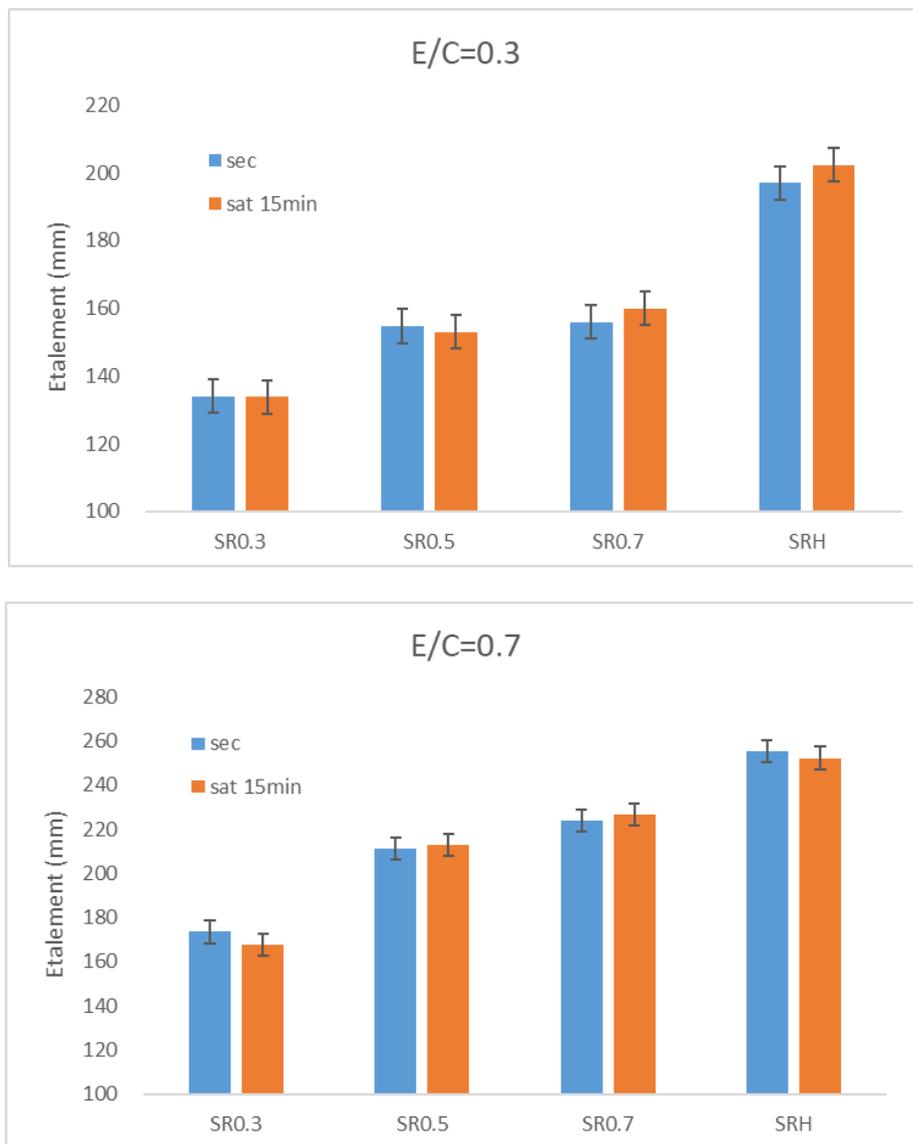


FIGURE 4. Résultats d'étalement obtenus pour les mortiers fabriqués avec un sable recyclé sec ou saturé 15 minutes, en utilisant la même quantité d'eau totale

C. Résistances mécaniques

Afin de vérifier que l'eau efficace est la même entre les mortiers fabriqués avec un sable recyclé sec et saturé pendant 15 minutes, des essais de résistance mécanique à 28 jours ont été réalisés. La figure 5 présente les résistances mécaniques obtenues pour les différents mélanges réalisés. Les résultats obtenus pour SR0.5, SR0.7 et SRH montrent que les résistances à la compression des mortiers fabriqués avec un sable recyclé sec sont proches mais reste plus élevées que celles

obtenues avec un sable recyclé saturé 15 minutes. Ce résultat est semblable à celui obtenu par (Le *et al.*, 2017). Pour le SR0.3 un résultat inverse est obtenu.

Les résultats obtenus dans cette partie montrent que l'eau efficace entre les différents mortiers est proche et ainsi permet de valider la méthode utilisée pour estimer l'absorption d'eau lors de l'utilisation du sable recyclé sec. Ainsi, la différence entre les résistances mécaniques peut-être due principalement à une différence d'adhérence entre la particule et la nouvelle pâte de ciment.

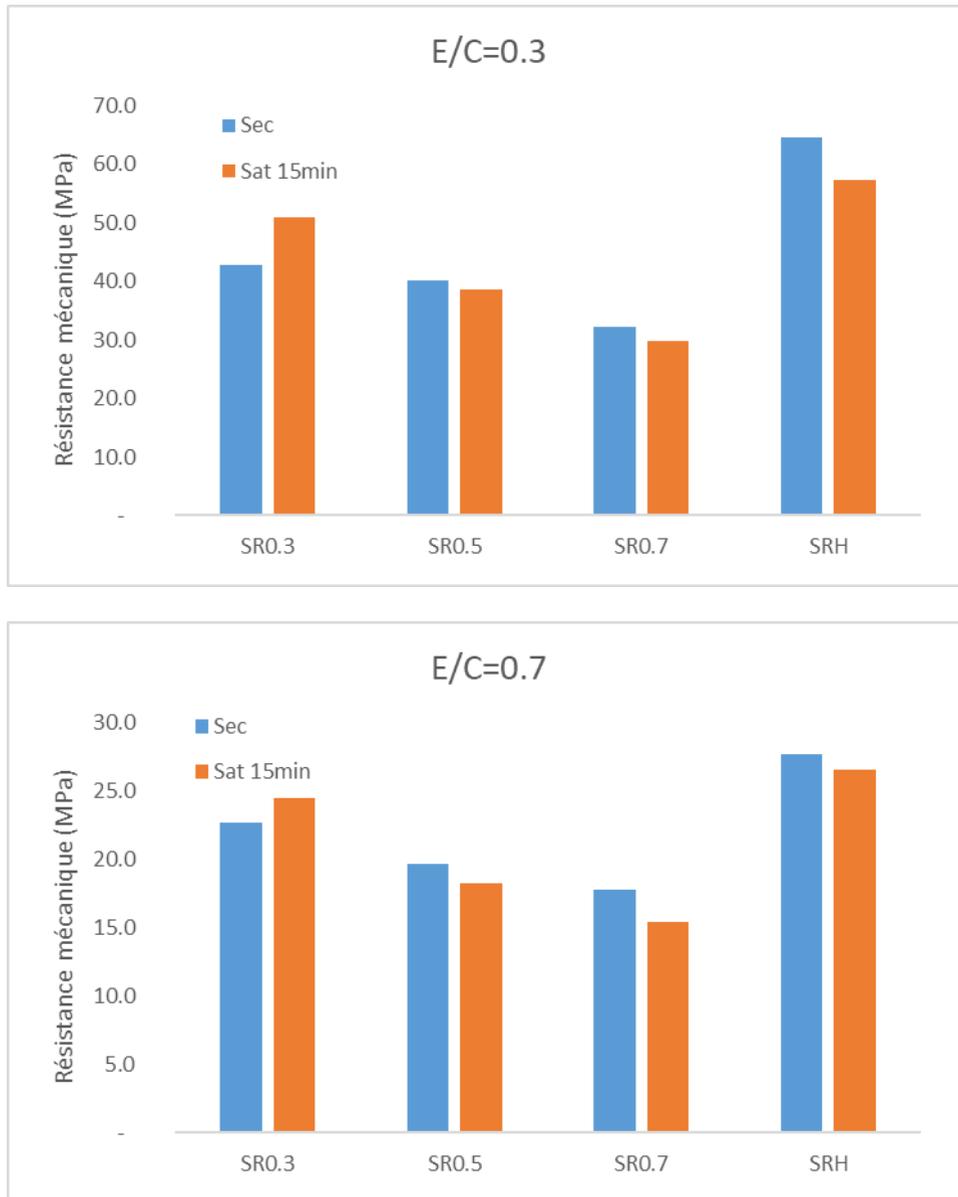


FIGURE 5. Résultats de résistance à la compression pour les mortiers fabriqués avec un sable recyclé sec ou saturé à 15 minutes en utilisant la même quantité d'eau totale.

IV. Conclusion

Dans cette étude, l'objectif est de mettre au point un essai simple pour contrôler l'eau efficace des mortiers pour assurer l'imprimabilité. Pour cela, quatre sables recyclés ont été utilisés, un sable industriel et trois sables fabriqués au laboratoire. Les conclusions obtenues sont :

- Une faible différence d'absorption d'eau des sables recyclée est obtenue entre une immersion dans l'eau pendant 24 heures et une immersion dans l'eau à 15 minutes.
- La comparaison de l'étalement en utilisant un sable sec et pré-saturé à 15 minutes a confirmé la même absorption d'eau pour les deux cas.
- Les résultats de résistance mécanique montrent que le sable recyclé sec donne des résistances mécaniques proches avec celui pré-saturé à 15 minutes. Ce qui permet de confirmer que l'eau efficace a été bien contrôlée pour l'utilisation du sable recyclé sec.

V. Remerciement

Les auteurs remercient le programme Interreg North-West Europe qui finance ces travaux dans le cadre du projet CIRMAP (Circular Economy via customisable furniture with Recycled MAterials for public Places).

REFERENCES

- Barbudo, A. *et al.* (2013) 'Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 59, pp. 93–98. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.06.022.
- Bentz, D. P. (2006) 'Quantitative comparison of real and CEMHYD3D model microstructures using correlation functions', *Cement and Concrete Research*, 36(2), pp. 259–263. doi: 10.1016/j.cemconres.2005.07.003.
- Bouarroudj, M. E. *et al.* (2019) 'Use of a reference limestone fine aggregate to study the fresh and hard behavior of mortar made with recycled fine aggregate', *Materials and structure*.
- Frías, M. and Cabrera, J. (2000) 'Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes', *Cement and Concrete Research*, 30(4), pp. 561–569. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00203-9.
- Khalil, N. *et al.* (2017) 'Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 157(September), pp. 382–391. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109.
- Le, T. *et al.* (2016) 'Fresh behavior of mortar based on recycled sand - Influence of moisture condition', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 106, pp. 35–42. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.071.
- Le, T. *et al.* (2017) 'Hardened behavior of mortar based on recycled aggregate: Influence of saturation state at macro- and microscopic scales', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 141, pp. 479–490. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.035.

Maimouni, H. *et al.* (2018) 'Quantitative assessment of the saturation degree of model fine recycled concrete aggregates immersed in a filler or cement paste', *Construction and Building Materials*, 175, pp. 496–507. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.211.

Roussel, N. (2018) 'Rheological requirements for printable concretes', *Cement and Concrete Research*. Elsevier, (March), pp. 1–10. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.04.005.

Zhao, Z. *et al.* (2015) 'Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars', *Construction and Building Materials*, 81(March 2014), pp. 179–186. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037.