

Comportement à l'état durci des mortiers imprimables à base de sable recyclé

Raghd Al Thib¹, Mohamed ElKarim Bouarroudj¹, 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, Junia, ULR 4515 - LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement, F-59000 Lille, France.

³ IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Centre for Materials and Processes, F-59000 Lille, France.

ABSTRACT L'utilisation des granulats recyclés dans l'élaboration des bétons et mortiers est une solution très attractive pour diminuer l'impact environnemental du secteur de la construction, notamment, la surexploitation des ressources naturelles granulaires et les quantités importantes des déchets de déconstruction. D'autres initiatives sont proposées pour diminuer le coût économique et environnemental du secteur de bâtiment comme l'impression 3D permettant de proposer à la fois un nouveau mode de construction et un procédé de mise en œuvre des bétons. Malgré les avantages de l'impression 3D, l'utilisation de quantités importantes de ciment et de sable reste un inconvénient majeur. L'enjeu ici est d'utiliser des sables recyclés pour les mortiers et bétons imprimables. En effet, le comportement des granulats recyclés et la robustesse des formulations des matériaux sont liés à leur capacité d'absorption importante et la quantité de pâte de ciment adhérente. L'objectif est d'étudier le comportement à l'état durci des mortiers à base de sable recyclé fin pour à la fois caractériser les matériaux et valider la méthodologie de formulation des mortiers imprimables. La démarche consiste à remplacer le volume de sable naturel par un sable recyclé avec un volume de pâte constant. Deux mortiers à base de sable recyclé sont considérés en comparaison avec celui à base de sable naturel. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Interreg CIRMAP, qui s'intéresse à développer des mortiers imprimables à base de granulats recyclés fin par impression 3D pour la fabrication de mobilier urbain. Les résultats montrent l'efficacité de la méthode de formulation utilisée, et l'effet du sable recyclé sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers.

Keywords Granulat de béton recyclé GBR, Sable recyclé fin, Impression 3D, Mortier, Mécanique, Porosité, Absorption d'eau WA.

I. INTRODUCTION

L'impression 3D du béton pourrait révolutionner le secteur de la construction grâce à ses avantages tels que la réduction du temps et des coûts de construction, la conception de nouvelles structures complexes sans coffrage, la diminution des risques d'accidents et l'optimisation de la main d'œuvre qualifiée. Cependant, cette technique utilise de grandes quantités de ciment et de

sable naturel. Par ailleurs, ce développement technologique est en parallèle avec une pénurie d'énergie et des ressources naturelles de plus en plus alarmante. Parmi les alternatives intéressantes, la réutilisation de granulats fins de béton recyclés (les sables recyclés (SR)) issus des déchets de déconstruction est une action privilégiée et attractive pour diminuer l'impact du secteur de bâtiment et travaux publics sur l'environnement. De nombreux travaux de la littérature ont mentionné que l'utilisation de SR ne compromet pas les propriétés mécaniques du mortier avec un remplacement de 30% (Braga et al., 2012) (Vegas et al., 2009). D'autres auteurs, ont observé l'effet significatif de l'utilisation de SR sur les propriétés du mortier en lien avec leur forte absorption d'eau et teneur en pâte de ciment adhérente (Corinaldesi et al., 2002) et (Lee, 2009). Cependant, peu de recherches s'intéressent à la possibilité d'impression 3D, en utilisant des mortiers contenant 100% de sable recyclé (Zou et al., 2021). Ainsi, la recherche sur l'incorporation de sable recyclé dans l'impression 3D est d'une grande importance, car elle peut non seulement améliorer le développement de l'industrie grandissante de la construction en actualisant les outils et les méthodes de construction traditionnelles, mais aussi fournir une voie d'application pour l'utilisation des sables fins recyclés.

Les granulats recyclés sont constitués de granulats naturels et de pâte de ciment adhérente à leur surface. Lors du concassage des déchets de déconstruction et de démolition une quantité importante de fines est produite, dans laquelle se concentre une fraction significative de l'ancienne pâte de ciment. Des études ont montré que la quantité de pâte de ciment dans les granulats recyclés augmente à mesure que la taille des grains diminue (de Juan and Gutiérrez, 2009). Cette pâte de ciment se distingue par une porosité élevée, ce qui est la principale raison de son effet sur les propriétés des granulats recyclés, comme la forte absorption d'eau (WA) et la faible densité (de Juan and Gutiérrez, 2009).

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Interreg CIRMAP qui vise à développer une filière industrielle pour la fabrication de mobilier urbain, mémoriel ou de jardin personnalisé par impression 3D de mortiers à base de granulats fins recyclés. L'objectif final est d'imprimer du mobilier urbain à partir de sables recyclés locaux dans les cinq pays européens partenaires du projet. L'objectif de ce papier est d'étudier la formulation des mortiers imprimables à base de granulats recyclés, et leur comportement à l'état durci. La comparaison des propriétés physiques et mécaniques permet de valider la robustesse de la méthodologie proposée et d'étudier l'effet de cette substitution sur le comportement mécanique du mortier imprimable en 3D.

II. MATERIAUX ET METHODOLOGIE

A. Matériaux

Les matériaux utilisés pour réaliser les mortiers dans cette étude sont :

- Ciment Portland Ordinaire (CPO) (CEM I 52,5 N) produit par l'entreprise Vicat en France, conforme à la norme EN 197-1.
- Un Sable Naturel (SN) de fraction (0/2) mm, provenant de la Loire (Région : Centre-Val de Loire en France).

- Deux Sables Recyclés (SR) de fraction (0/2) mm avec en plus deux échantillons de fraction (2/4) mm, préparés au Centre Terre & Pierre (CTP) et provenant de différents pays européens : SR1 d'Allemagne, SR2 des Pays-Bas.
- Un superplastifiant haut réducteur d'eau CHRYSO Fluid Optima 100 (HRWR), conforme à la norme EN 934-2.
- Adjuvant solide modifiant la viscosité (VMA)

B. Méthodologie

1. Caractérisation des sables :

Les caractéristiques des sables (distribution granulométrique (NF EN 12192-1), densité absolue ρ_a , porosité P , densité réelle ρ , absorption d'eau WA et perte de masse au feu LOI) ont été étudiées au laboratoire pour une première étude comparative des sables recyclés proposés dans le cadre du projet.

La perte de masse au feu LOI a été mesurée entre 60°C (pour éviter la détérioration des hydrates encore présents dans la pâte de ciment) et 475°C.

Les sables recyclés se distinguent par un coefficient d'absorption d'eau élevé à cause de la teneur en pâte de ciment adhérente. Deux méthodes ont été utilisées, la méthode IFSTTAR N°78 (IFSTTAR, 2011) et la méthode par extrapolation (Zhao et al., 2013). Dans ce travail, nous avons divisé l'échantillon de SR en différentes classes granulaires pour déterminer le coefficient d'absorption d'eau selon la méthode IFSTTAR N°78 et la perte de masse au feu pour les fractions [(2/4) mm, (1/2) mm, (0,5/1)mm]. Ensuite, la perte de masse au feu pour la fraction fine (0/0,5) mm a été mesurée et par la méthode d'extrapolation l'absorption de cette fraction fine a été déterminée. Finalement, le coefficient d'absorption d'eau total WA a été calculé en fonction des proportions respectives de chaque classe granulaire. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude de deux sables recyclés (SR1, SR2) et un sable naturel SN, Ces sables ont des fractions inférieures de 2 mm afin d'éviter les blocages qui peuvent se produire au niveau de la buse d'extrusion (de diamètre 2 cm) ou dans la pompe.

2. Procédure de fabrication du mortier imprimable en 3D :

La méthode de formulation utilisée, consiste à remplacer le volume réel du SN qui prend en compte la porosité des particules (enveloppe volumique) par la même enveloppe volumique pour les SR (Bouarroudj et al., 2019). Ensuite, le pourcentage de superplastifiant a été ajusté pour obtenir la même maniabilité initiale que celle du mortier de sable naturel. La maniabilité est ici évaluée à partir de la mesure de l'étalement à la table à chocs après 15 coups selon la norme EN-459-2 ce qui signifie que les deux mortiers ont le même rapport eau efficace/ciment (E_{eff}/C).

La quantité totale d'eau utilisée (E_T) est égale à la quantité d'eau efficace (E_{eff}) avec 80% de l'eau adsorbée (80% WA). Selon la méthode IFSTTAR N°78 et la méthode par extrapolation, ce coefficient WA est déterminé après 24 heures d'immersion dans l'eau.

Les compositions ont été testées pour vérifier l'imprimabilité des mortiers d'abord par un pistolet à l'échelle du laboratoire, et ensuite par un robot ou une imprimante 3D à une échelle réelle plus grande. Dans ce travail, les impressions à échelle réelle sont réalisées avec un robot Universal Robot UR10 et une pompe MAI 2PUMP PICTOR. La buse est cylindrique, de diamètre 20mm et une vitesse d'impression constante de 100 mm/s a été utilisée pour tous les corps d'épreuve. A chaque début d'impression, un « cordon d'approche » est imprimé avec la même vitesse nominale d'impression et le débit de la pompe est réglé de manière à obtenir un cordon de 5cm \pm 1cm de largeur.

Des éprouvettes (40x40x160) mm³ ont été confectionnées ensuite en utilisant trois mortiers, deux à base de sables recyclés (SR1, SR2) et un à base de sable naturel (SN). Une cure humide (par immersion dans l'eau) a été utilisée pour la conservation des éprouvettes pour 2 et 28 jours à 20 °C (NF EN 196-1. 2016)

3. Comportement à l'état durci des mortiers imprimables en 3D :

3.1. Porosité accessible à l'eau (ϵ) :

La porosité accessible à l'eau des mortiers à l'état durci a été déterminée en utilisant le protocole de la norme NF P18-459 (NF P18-459, 2010). Trois éprouvettes cubiques (40x40x40) mm³ de chaque mélange ont été séchées à 60°C à l'étuve jusqu'à stabilité de masse, puis refroidies pendant trois heures dans un dessiccateur contenant du gel de silice avant de mesurer la masse sèche (M_{sec}). Ensuite les éprouvettes sont placées sous vide au moyen d'une pompe à vide pour éliminer l'air contenu dans les pores, et après 24 h les éprouvettes ont été immergées dans l'eau pendant 48 h. Finalement, une pesée hydrostatique est réalisée (M_{eau}), suivie d'une pesée dans l'air (M_{air}).

La porosité accessible à l'eau (ϵ) est donnée par l'équation suivante (équation (1)) :

$$\epsilon = [(M_{air} - M_{sec}) / (M_{air} - M_{eau})] \times 100\% \quad (1)$$

Afin de vérifier la pertinence de la démarche de la formulation, la porosité de la pâte de ciment a été calculée en prenant en compte l'hypothèse d'une porosité totale accessible à l'eau (ϵ) égale à la somme de la porosité totale de la pâte de ciment dans le mortier (ϵ_P), et la porosité totale du sable (ϵ_s), en utilisant les équations (2) et (3) suivantes :

$$\epsilon = \epsilon_P + \epsilon_s \quad (2)$$

$$\epsilon = (P_p \times \Phi_p) + (P_s \times \Phi_s) \quad (3)$$

Où: (ϵ) représente la porosité du mortier imprimable, (P_p) représente la porosité de la pâte de ciment, (Φ_p) représente la fraction volumique de la pâte de ciment, (P_s) représente la porosité du sable, (Φ_s) représente la fraction volumique du sable.

Puisque la pâte de ciment est la même dans les mortiers imprimables avec SN et SR (le même rapport E_{eff}/C et la même maniabilité initiale), la porosité totale de cette pâte (ϵ_p) doit être la même.

3.2. Comportement mécanique :

Une série d'essais mécaniques a été réalisée afin d'étudier l'effet du remplacement du sable naturel SN par un sable recyclé SR sur la résistance mécanique des mortiers. Ces essais ont été réalisés selon la norme française NF EN 196-1, sur des éprouvettes (40x40x160) mm³ préparées avec des mortiers imprimables à base de sable naturel (MSN) ou de sable recyclé (MSR). Les éprouvettes ont été testées après différents temps de cure (2, 28) jours, pour déterminer la résistance mécanique à la flexion et à la compression.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Commentaire [EdM1]: ???

A. Caractéristiques des sables :

La figure 1 montre la distribution des trois sables de fraction (0/2) mm. Nous remarquons que le SR1 contient plus de fines (0/0,25) mm en comparaison avec le sable SR2 avec un écart d'environ 15%. Cette différence peut être due à une différence dans la méthode de concassage ou la nature de l'ancienne pâte de ciment adhérente.

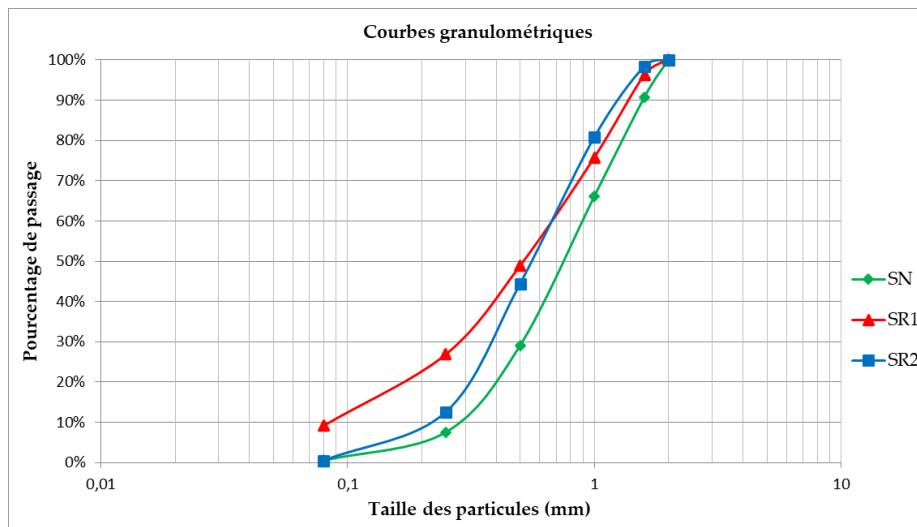


FIGURE 1. Les courbes granulométriques des sables SN, SR1 , SR2.

Le tableau 1 montre les résultats des caractéristiques physiques pour les trois sables. On note une différence notable du coefficient d'absorption d'eau WA entre le sable SR1 et SR2, en lien

également avec la porosité et la perte de masse au feu LOI. Cela s'explique par la quantité de pâte de ciment adhérente qui est plus importante pour le sable SR1 que le sable SR2.

Tableau 1. Les caractéristiques physiques des sables

Type de sable	ρ_a (g/cm ³)	WA (%)	LOI (%)	P (%)	ρ (g/cm ³)
SN	2,62	0,2	0	0,52	2,6
SR1	2,6	7,13	3,91	15,64	2,19
SR2	2,5	5,84	2,18	12,74	2,18

B. Formulation et imprimabilité des mortiers:

En utilisant la méthodologie de remplacement volumique du sable naturel, la vérification de la maniabilité initiale de la composition imprimable de chaque mortier a été déterminée.

Le tableau 2 montre les compositions des mortiers imprimables en 3D. La quantité ajustée de superplastifiant est la même pour les deux mortiers à base de sable recyclés en prenant en compte la formulation du mortier en ajoutant 80 % de l'eau adsorbée au sable sec.

Tableau 2. Les compositions des mortiers imprimables en 3D (kg/m³).

Type de mortier	Sable	C	E _{eff}	WA	E _r	HRWR	VMA
MSN	1128	905	281	0	281	12,22	1,81
MSR1	930	905	281	65,1	333	13,58	1,81
MSR2	924	905	281	53,9	324	13,58	1,81

La figure 2. illustre les tests d'imprimabilité manuelle des mortiers par un pistolet à l'échelle réduite. Cela a permis de vérifier l'extrudabilité des trois mortiers avant une impression 3D à une échelle réelle.

Les cylindres imprimés au pistolet (D = 150mm, H = 160mm, largeur de couche = 10mm), montrent une bonne qualité d'extrusion des mortiers. Le mortier sort facilement de la buse du pistolet sous l'application d'une pression manuelle modérée.

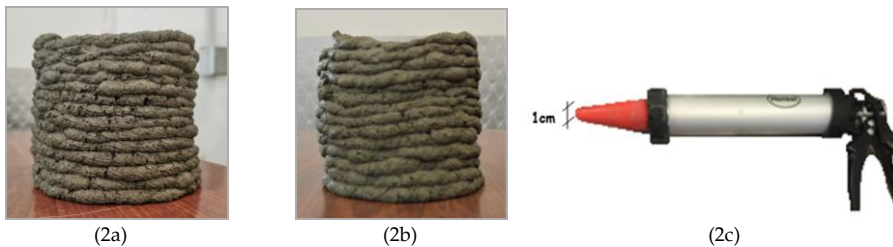


FIGURE 2. (2a) Cylindre imprimé avec MSN, (2b) Cylindre imprimé avec MSR1, (2c) Pistolet utilisé pour l'impression du mortier

La figure 3. présente les échantillons imprimés à grande échelle, en utilisant les mortiers à base de SN, SR1, SR2, selon les compositions du tableau 2. Ce résultat montre une imprimabilité

efficace avec une extrudabilité et constructibilité intéressante des mortiers à base de sable recyclés et permet de confirmer la pertinence de la démarche de formulation.

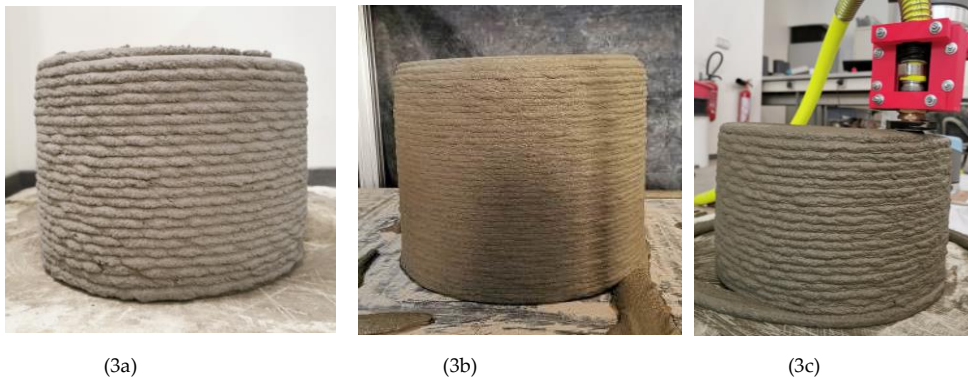


FIGURE 3. (3a) Cylindre imprimé avec MSN, (3b) Cylindre imprimé avec MSR1, (3c) Cylindre imprimé avec MSR2.

C. Porosité accessible à l'eau :

La figure 4. présente une comparaison de la porosité des trois mortiers à base de SN et des deux sables recyclés SR1 et SR2 après 2 et 28 jours de cure.

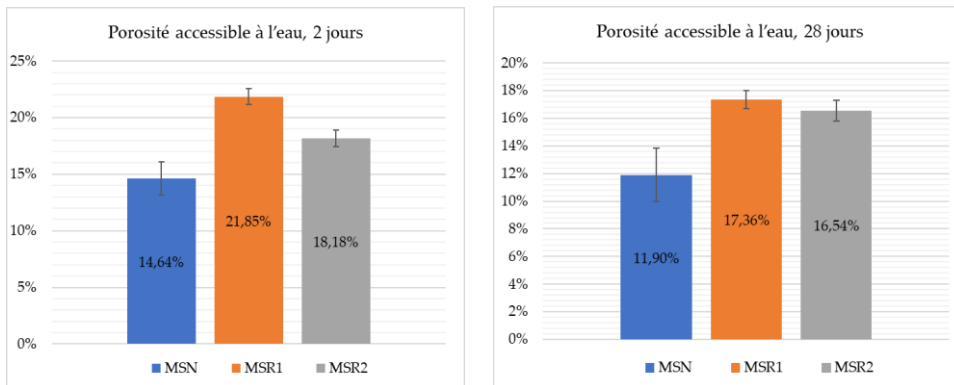


FIGURE 4. Porosité accessible à l'eau (ε) des mortiers imprimables en 3D.

Nous remarquons que la porosité du mortier à base de SR1 est toujours plus élevée que dans le cas du mortier à base de SN ou SR2 . Cela peut être expliqué par la différence de la porosité des sables SR1 et SN ou SR2.

La porosité de la pâte de ciment a été calculée à partir de la porosité totale, de la porosité des sables et de la fraction volumique de la pâte de ciment et du sable (Equation 3). Les résultats sont reportés dans le tableau 3.

Tableau 3. Les porosités totales du mortier, du sable, et de la pâte de ciment.

Type de mortier	ϵ	ϵ_s	ϵ_p
MSN	11,9 %	0,22%	11,68 %
MSR1	17,36 %	6,21%	11,15 %
MSR2	16,54 %	5,03%	11,51 %

Il est à noter que les porosités des pâtes de ciment des deux mortiers sont très proches (différence d'environ 0.5%). Cette différence est couverte par l'écart type du résultat de la porosité totale du mortier ϵ (figure 4). Par conséquent, nous pouvons considérer que ce résultat confirme la porosité constante de la pâte de ciment dans les mortiers imprimables avec (SN, SR1, et SR2), et la pertinence de la méthode de formulation utilisée.

En effet, la différence de la porosité totale des mortiers est due à la différence de la porosité des sables. Un écart entre la porosité de SR1 et celle de SN est d'environ 15% (tableau 1), nous donne un écart entre la porosité du mortier fabriqué avec SR1 et celle de SN est d'environ 6% (tableau 3).

D. Comportement mécanique :

Sur la figure 5, sont présentées les résistances en flexion et en compression des trois mortiers pour 2 et 28 jours.

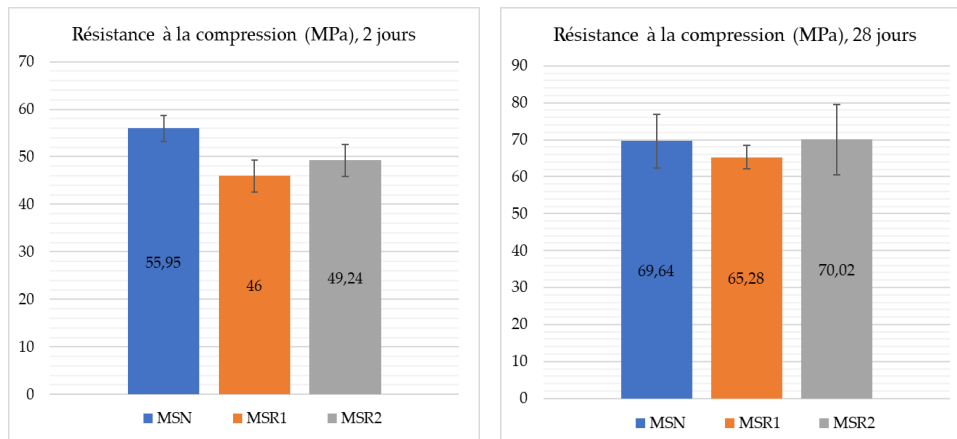


FIGURE 5. Résistance mécanique à la compression pour les mortiers fabriqués avec SN, SR1 et SR2.

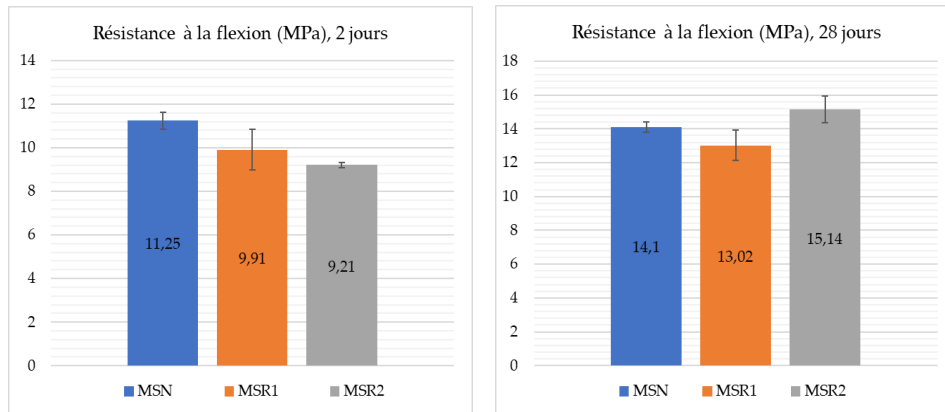


FIGURE 6. Résistance mécanique à la flexion pour les mortiers fabriqués avec SN, SR1 et SR2.

Les résistances mécaniques à la compression (Figure 5) et en flexion (Figure 6) montrent que le mortier fabriqué avec le SN donne une résistance (à l'âge de deux jours) plus élevée par rapport au mortier fabriqué avec les SR1 et SR2. Cependant, à l'âge de 28 jours la résistance mécanique des mortiers fabriqués avec le SN ou SR sont très proches. Le mortier à base de sable recyclé montre une résistance mécanique quasi-équivalente au mortier à base de sable naturel. Les faibles baisses de résistance observées peuvent être dues à la porosité et l'éventuelle double zone de transition interfaciale (ITZ) qui se forme dans les mélanges MSR.

IV. CONCLUSION

Cette étude expérimentale vise à comparer le comportement à l'état durci des mortiers imprimables à base de trois différents sables, un sable naturel et deux sables recyclés et de valider la méthodologie de formulation utilisée.

Il en ressort de cette étude plusieurs conclusions :

- La méthode de remplacement de l'enveloppe volumique du sable naturel par un sable recyclé a montré sa robustesse avec une imprimabilité efficace et une porosité de pâte constante.
- Les résultats de la résistance mécanique montrent que le mortier imprimable avec du sable recyclé a une résistance mécanique très proche de celle du mortier imprimable avec du sable naturel à l'âge de 28 jours.
- La porosité accessible à l'eau de mortier fabriqué avec le sable recyclé est liée à la porosité de ce sable.

V. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le " European Regional Development Fund (ERDF)" pour le financement du programme de recherche Interreg North West Europe CIRMAP (No : NWE 1062).

REFERENCES

- Bouarroudj, M.E., Remond, S., Michel, F., Zhao, Z., Bulteel, D., Courard, L., 2019. Use of a reference limestone fine aggregate to study the fresh and hard behavior of mortar made with recycled fine aggregate. *Mater. Struct.* 52, 18. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1325-1>
- Braga, M., de Brito, J., Veiga, R., 2012. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Constr. Build. Mater.* 36, 960–968. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.031>
- Corinaldesi, V., Giuggiolini, M., Moriconi, G., 2002. Use of rubble from building demolition in mortars. *Waste Manag.* 22, 893–899. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00087-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00087-9)
- De Juan, M.S., Gutiérrez, P.A., 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* 23, 872–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>
- Lee, S.-T., 2009. Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack. *Waste Manag.* 29, 2385–2391. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.04.002>
- Vegas, I., Azkarate, I., Juarrero, A., Frías, M., 2009. Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón. *Mater. Constr.* 59, 5–18. <https://doi.org/10.3989/mc.2009.44207>
- Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., Xu, W., 2013. Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates. *J. Sustain. Cem.-Based Mater.* 2, 186–203. <https://doi.org/10.1080/21650373.2013.812942>
- Zou, S., Xiao, J., Ding, T., Duan, Z., Zhang, Q., 2021. Printability and advantages of 3D printing mortar with 100% recycled sand. *Constr. Build. Mater.* 273, 121699. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121699>
- IFSTTAR. Test Methode No.78, Essais sur les granulats dans le béton : mesure de l'absorption totale d'eau du sable concassé, 2011.
- NF EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments -Partie 1 : Détermination des résistances ; 2016.
- EN B. 1097-6. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau ; 2014.
- NF P18-459 . Béton - essai pour béton durci - essai de porosité et de masse volumique. 2010.
- NF EN 12192-1. Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Analyse granulométrique - Partie 1 : méthode d'essai applicable aux composants secs des mortiers prêts à l'emploi. 2002.