

ELABORATION D'ENCRE CIMENTAIRES IMPRIMABLES EN 3D A BASE DE SABLE DE BETON RECYCLE – PROJET CIRMAP

M. TALEB¹, D. BULTEEL¹, L. COURARD², J. HUBERT², S. REMOND³

¹IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Centre of Materials and Processes, F-59000 Lille, France
²Université de Liège, Quartier Polytech 1, Allée de la découverte 9, B-4000 Liège, Belgique
³Univ Orléans, Univ Tours, INSA CVL, LaMé, EA 7494, France

Contexte Général

CIRMAP (Circular Economy via customisable furniture with Recycled Materials for public Places) est un projet Interreg North West Europe qui regroupe 5 pays partenaires : La France, l'Allemagne, les Pays-Bas, la Belgique et l'Angleterre. Le but du projet est de réaliser des impressions 3D de mobiliers urbains avec des encres cimentaires formulées à base de sables recyclés comme substitut aux ressources naturelles afin de valoriser les déchets de construction et de démolition. Le projet s'inscrit donc dans une démarche écologique et économique en valorisant les sables de béton recyclés afin de ralentir l'épuisement des ressources naturelles et d'éviter la mise en décharge.

Caractérisation des sables recyclés

Tradecowall → Sable recyclé belge → Coefficient d'absorption d'eau « WA24 » → Loss on ignition « LOI » (Perte de masse suite à un traitement thermique de 4 h à 475°C) → Helfaut → Sable recyclé français

| Fraction i (mm) | Tradecowall | | | Helfaut | | |
|-----------------|------------------|-------------------|---------------------------|------------------|-------------------|---------------------------|
| | LOI (% massique) | WA24 (% massique) | Proportion x (% massique) | LOI (% massique) | WA24 (% massique) | Proportion x (% massique) |
| 2 - 4 | 2,15 | 6,31 | - | - | - | - |
| 1 - 2 | 1,00 | 4,92 | 6,2 | 1,56 | 10,3 | 10,2 |
| 0,5 - 1 | 1,65 | 5,34 | 9,2 | 1,41 | 8 | 19,5 |
| 0,25 - 0,5 | 1,78 | 5,74 | 24,4 | 0,74 | 4,4 | 37,1 |
| 0,063 - 0,25 | 1,15 | 5 | 58,6 | 2,15 | 9,1 | 20,2 |
| < 0,063 | - | - | 1,6 | 8,03 | 31,36 | 13 |

Moyennes des valeurs obtenues par la méthode IFSTAR et la norme NF EN 1097-6

Valeurs obtenues par extrapolation*

Tradecowall = 5,13%

Helfaut = 10,2%

$WA24_{global} = \sum_i WA24_i \times x_i$ (Fraction [0-2mm])

*Méthode de Zhao et al. (2013)

Formulation d'encres cimentaires à base de sables recyclés [0-2 mm]

- Substitution du volume de sable naturel dans une formulation imprimable par du sable recyclé afin d'obtenir une encre cimentaire avec 100% de substitution.
- Le sable recyclé absorbe beaucoup plus d'eau que le sable naturel, le coefficient d'absorption d'eau est donc pris en compte dans la formulation.

| Composants (pour 50L Mortier) | Sable naturel (Bouloonnais) | Tradecowall | Helfaut |
|--|-----------------------------|--------------|--------------|
| Ciment Vicat CEM I 52.5 N | 45,25 Kg | 45,25 Kg | 45,25 Kg |
| Sable recyclé | 56,40 Kg | 49,80 Kg | 53,65 Kg |
| E_{eau}/C | 0,29 | 0,29 | 0,32 |
| Eau d'absorption | 0 | 2,55 L | 5,47 L |
| Eau totale | 13,20 L | 15,67 L | 19,95 L |
| Superplastifiant Chryso®Fluid Optima 100 | 2,5% M_c * | 2,5% M_c * | 1,4% M_c * |
| Viscosant Chryso Belitex® Addichap | 0,2% M_c * | 0,2% M_c * | 0,2% M_c * |

* M_c = Masse de ciment

Impression à petite échelle

- Les essais d'imprimabilité à l'échelle du laboratoire avant passage à l'impression grande échelle:
 - $t_0 + 6$ min : un cylindre (diamètre env. 6 - 8 cm) de 3 - 4 couches de hauteur est imprimé.
 - $t_0 + 10$ min et toutes les 5 min suivantes (jusqu'à ce que le mortier ne soit plus imprimable) : un muret de 4 couches de hauteur est imprimé.
- Les tests d'imprimabilité sont réalisés avec un pistolet manuel équipé d'une buse de 1 cm de diamètre.
- Critères d'imprimabilité:
 - Mortier imprimable pendant env. 20-30 minutes pour être extrudable et constructible.
 - Le mortier doit présenter un bon aspect de surface après impression, sans fissurations.

| Nom du sable recyclé | Après malaxage | 10 min | 20 min | 30 min |
|----------------------|----------------|--------|--------|--------|
| Tradecowall | | | | |
| Helfaut | | | | |

Impression à grande échelle

Préparation de 50 L de mortier → Évaluation de l'imprimabilité sur l'imprimante 3D à l'échelle pilote

45 cm

60 cm

Cylindre imprimé avec du sable naturel

Lettre « C » du mot « CIRMAP » imprimée avec du Helfaut

65 cm

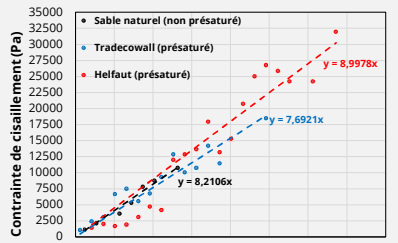
Lettre « M » du mot « CIRMAP » imprimée avec du Tradecowall

Imprimante 3D de l'IMT Nord Europe (Douai - France)

Caractérisation à l'état frais

- Les formulations de mortier pour l'impression 3D sont caractérisées à l'état frais par le biais de deux tests : Le fall cône et le test d'étalement à la table à choc.

- L'essai du fall cône (NF EN ISO 17892-6):



- L'essai d'étalement (NF EN 12350-5):



| Sable | Etat du sable | Hauteur après retrait du moule (mm) | Diamètre _{retrait} après 15 chocs (mm) | Diamètre _{mo} après 25 chocs (mm) |
|-------------|-----------------------|-------------------------------------|---|--|
| Naturel | Pas de pré-saturation | non mesurée | 162,09 | 176,39 |
| Tradecowall | Avec pré-saturation | 46,33 | 148,81 | 163,83 |
| Helfaut | Avec pré-saturation | 41,85 | 171,63 | 187,31 |

Les valeurs du **taux de structuration "A_{thick}"** (pente de la courbe de contrainte de cisaillement) ainsi que celles des **étalements** sont proches de celles de la formulation de base avec du sable naturel → Validation des propriétés à l'état frais des formulations avec les sables recyclés.

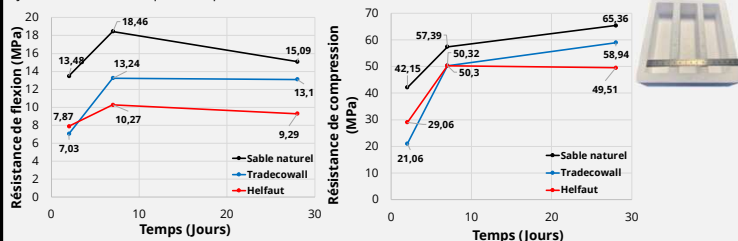
Conclusions / Perspectives

- Conclusions:**
 - Une capacité d'imprimer avec des encres cimentaires contenant des sables recyclés avec un remplacement total du sable naturel avec des caractéristiques restantes suffisantes.
- Perspective:**
 - Étudier la durabilité des mortiers imprimables conçus avec les différents sables recyclés.

Caractérisation à l'état durci

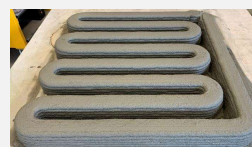
Essais sur des éprouvettes moulées (Méthode dérivée de la norme NF EN 190-1)

3 échantillons prismatiques de mortier (4 x 4 x 16 cm) sont coulés pour chaque formulation et testés à 2, 7 et 28 jours en flexion ainsi qu'en compression.

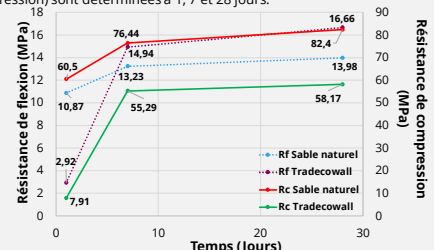


Essais sur des éprouvettes imprimées issues d'impression 3D à grande échelle

Des éprouvettes de mortier sont découpées à la main à l'aide d'une spatule métallique avant durcissement sur la forme zigzag. Une fois durcies, ces éprouvettes sont découpées en 4x4x16 cm puis rectifiées. Les propriétés mécaniques (résistances de flexion et de compression) sont déterminées à 1, 7 et 28 jours.



Forme zigzag imprimée avec du sable Tradecowall



Remerciements

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