

Utilisation de granulats recyclés : recherches à l'ULiège

Julien HUBERT, Yeakleang MUY et Luc COURARD
Université de Liège

Objectif du projet SeRaMCo: produire des éléments en béton préfabriqué à base de granulats recyclés avec le plus haut taux de substitution possible



**Secondary Raw
Materials for
Concrete
precast products**

SERAMCO

- ▶ **Influence du procédé de production**
- ▶ **Caractérisation et durabilité des bétons recyclés**
- ▶ **Projet pilote belge**

CIRMAP

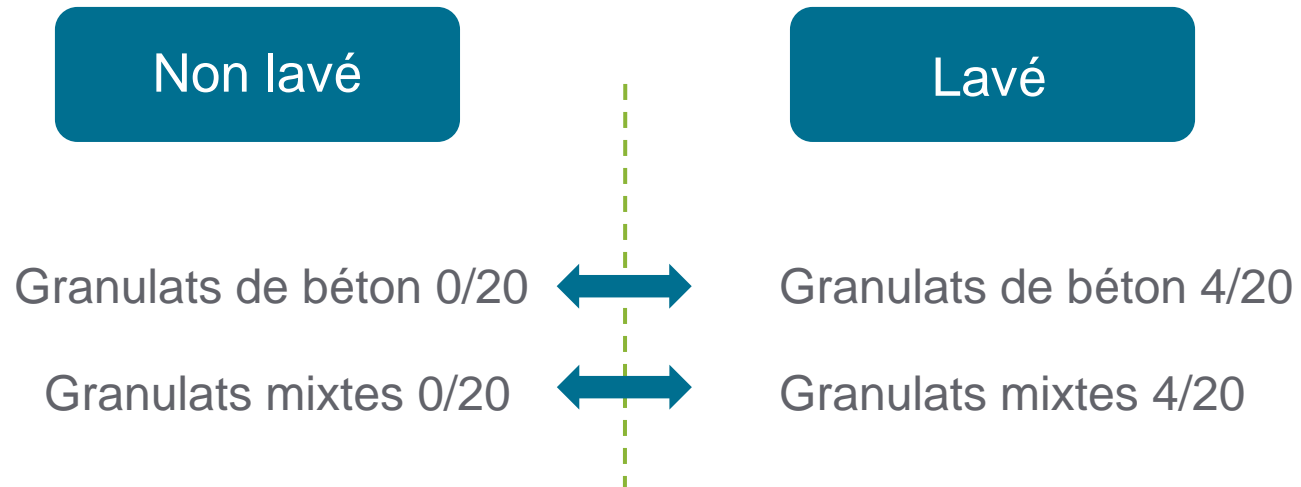
- ▶ Design d'une encre cimentaire
- ▶ Caractérisation mécanique et évaluation de la durabilité
- ▶ Influence du mode de mise en œuvre
Projet pilote belge

INFLUENCE DU LAVAGE SUR LA QUALITÉ DES GRANULATS

Effets anticipés :

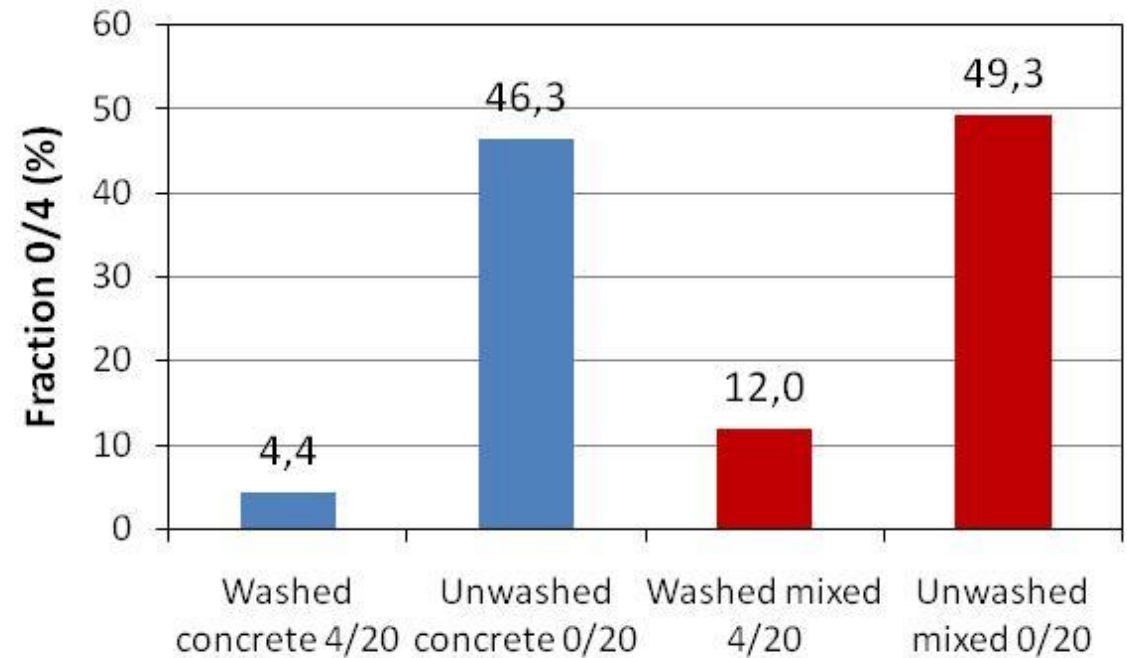
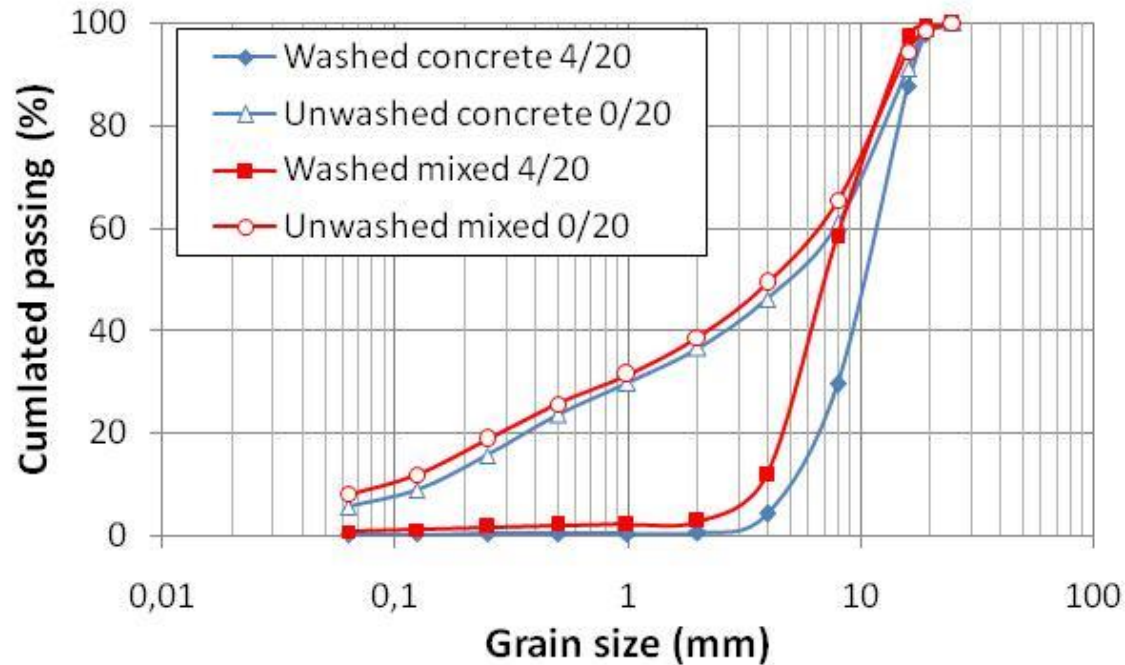
- ▶ Courbe granulométrique plus restreinte
- ▶ Diminution de la teneur en particules fines
- ▶ Diminution de la quantité d'éléments indésirables (plâtre, argiles, etc.)
- ▶ Meilleure résistance à la fragmentation

Méthodologie :



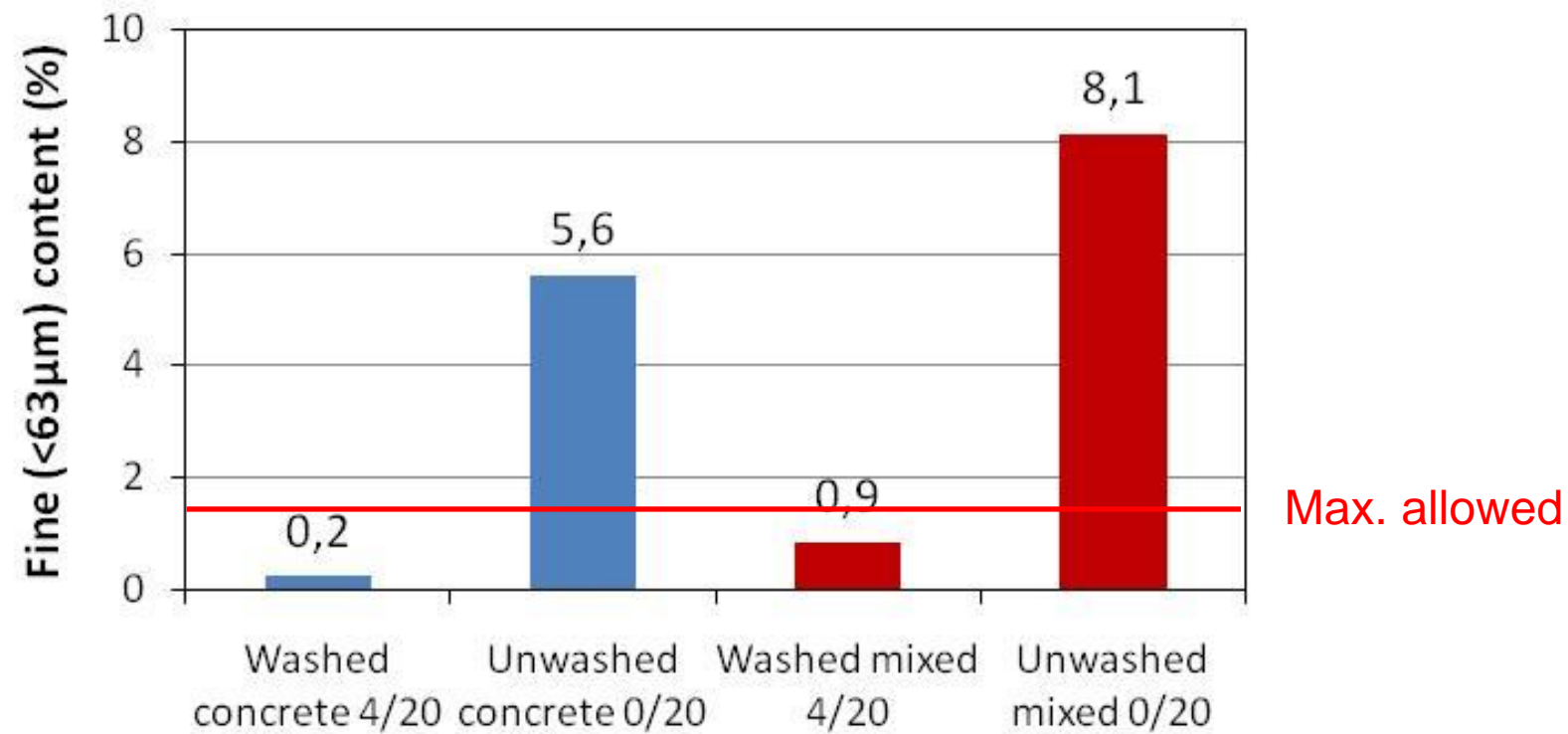
COURBES GRANULOMÉTRIQUES

La fraction 0/4 représente presque 50% de la composition des granulats non lavés
Le lavage diminue significativement la fraction « sableuse » des granulats



TENEUR EN PARTICULES FINES

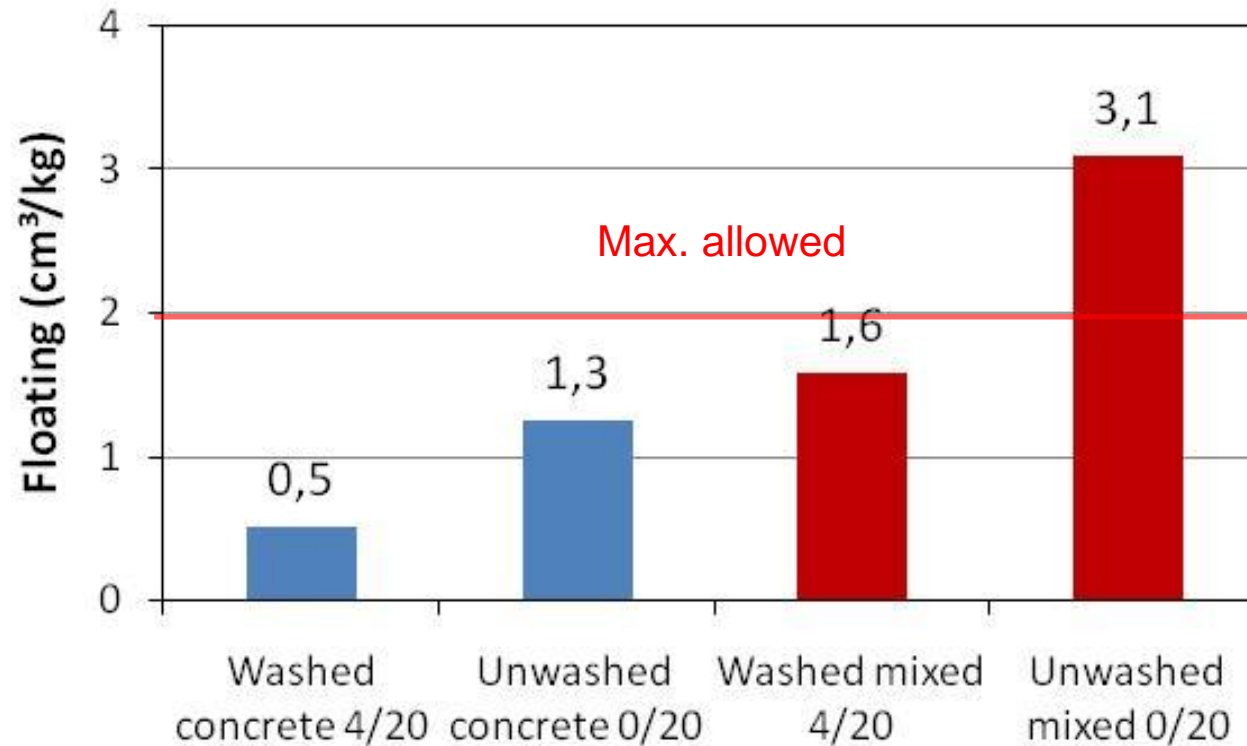
La teneur en particules fines ($< 63 \mu\text{m}$) est significativement réduite par le lavage
Les granulats lavés respectent les réglementations pour un usage dans le béton



TENEUR EN ÉLÉMENTS FLOTTANT

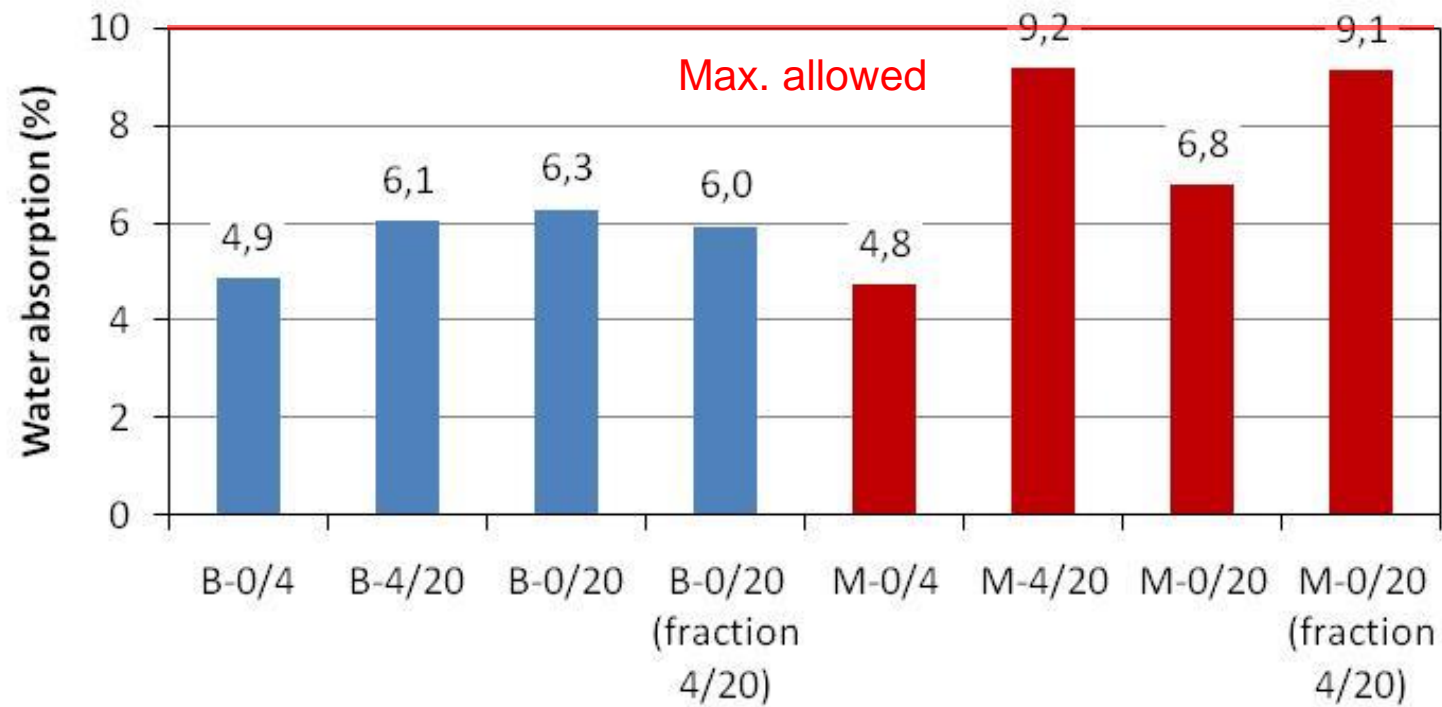
La teneur en éléments flottants (bois, plâtre, argile, etc.) est réduite de 50%

Le lavage est nécessaire pour que les granulats mixtes respectent les réglementations



L'absorption d'eau n'est pas ou peu influencée par le lavage

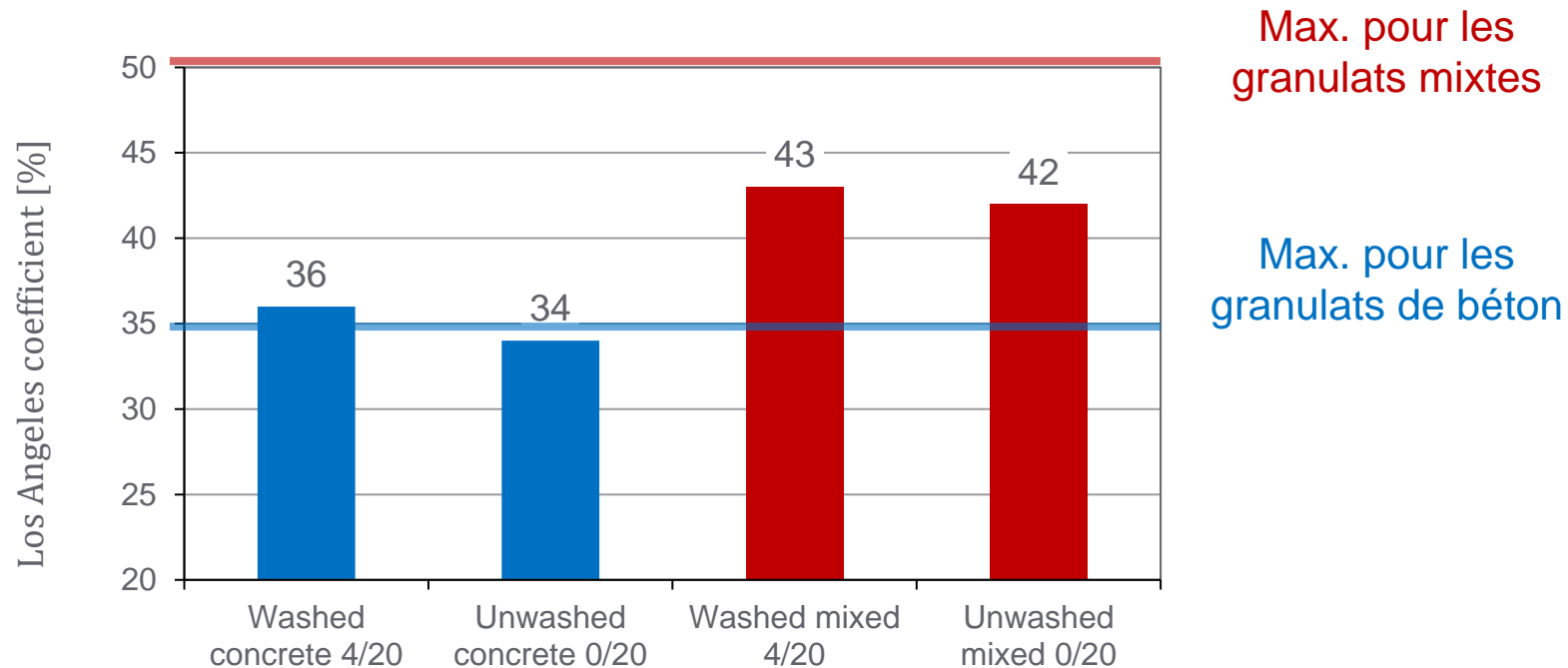
Les granulats recyclés lavés ou non rencontrent les réglementations



RÉSISTANCE À LA FRAGMENTATION

Le coefficient de Los Angeles (LA) définit la résistance à la fragmentation d'un granulat.

- ▶ Il s'agit du pourcentage de la masse de la prise d'essai passant au tamis d'ouverture 1.6 mm après un essai. Un pourcentage élevé dénote une mauvaise résistance aux chocs et au frottement
- ▶ Les granulats de béton présentent une meilleure résistance à la fragmentation que les granulats mixtes
- ▶ Le lavage n'a pas ou peu d'effet sur le coefficient de Los Angeles



Méthodologie : production de granulats recyclés 0/25**Percussion**

6,5 kW (40% de la puissance max)

Mâchoires

Ouverture : 22 mm

Granulats recyclés produits sur base de béton produit en laboratoire

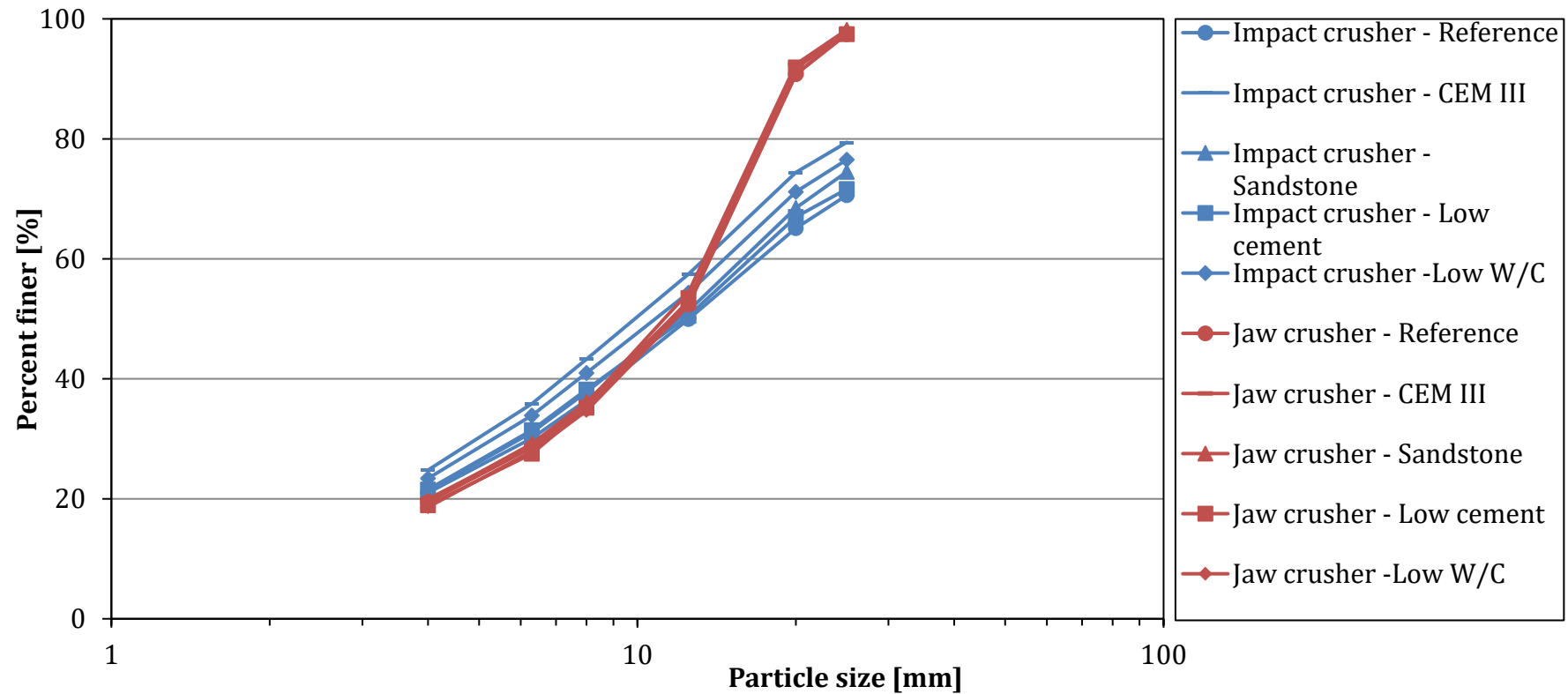
- 5 compositions différentes ont été envisagées :

	Reference	CEMIII	Sandstone	Low Cement	Low W/C
Aggregates type	Limestone	Limestone	Sandstone	Limestone	Limestone
Cement type	CEMI 52.5	CEMIII 52.5	CEMI 52.5	CEMI 52.5	CEMI 52.5
Cement quantity (kg/m³)	400	400	400	320	452
Cement paste volume (dm³/m³)	351	358	351	282	351
W/C	0.56	0.56	0.56	0.56	0.46

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

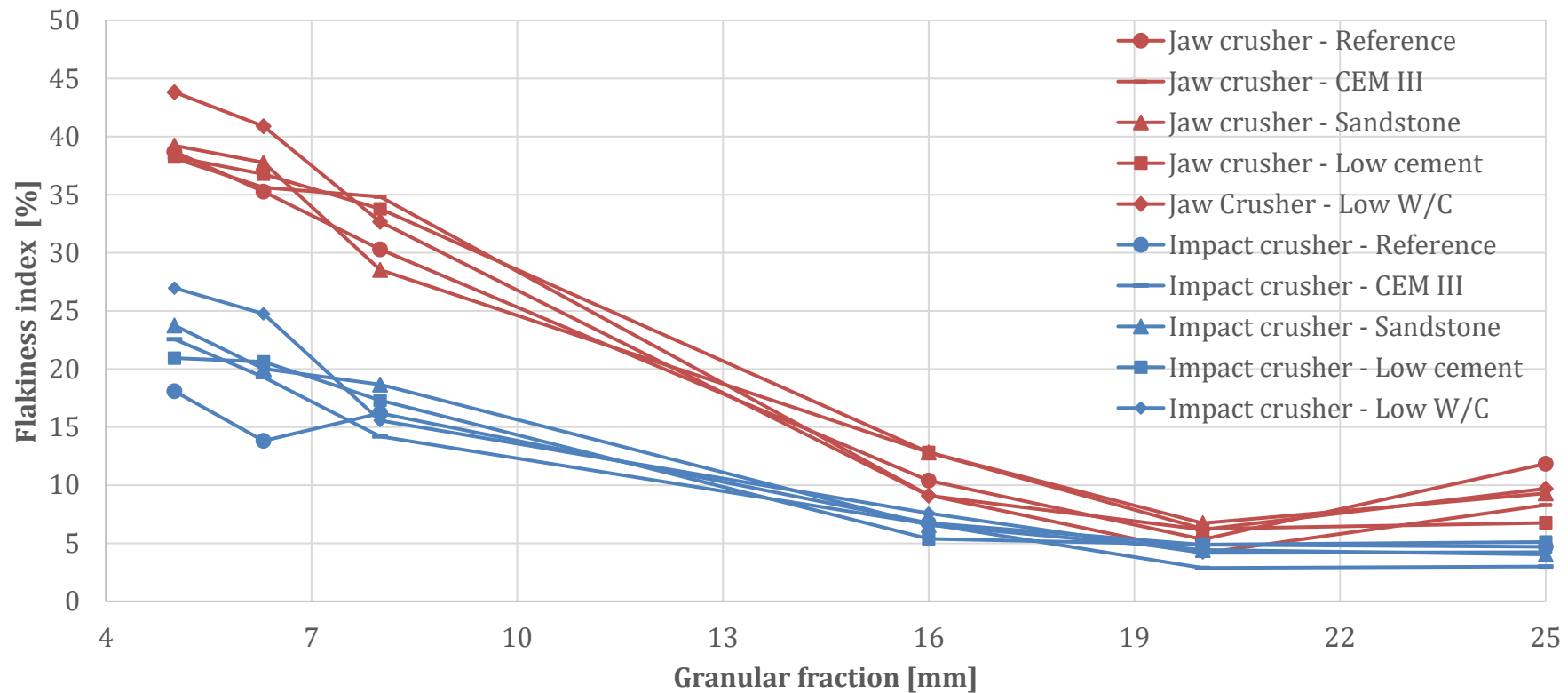
Le concasseur à mâchoire produit des granulats présentant une courbe granulométrique plus restreinte.

Peu ou pas d'influence de la composition du béton sur la courbe granulométrique

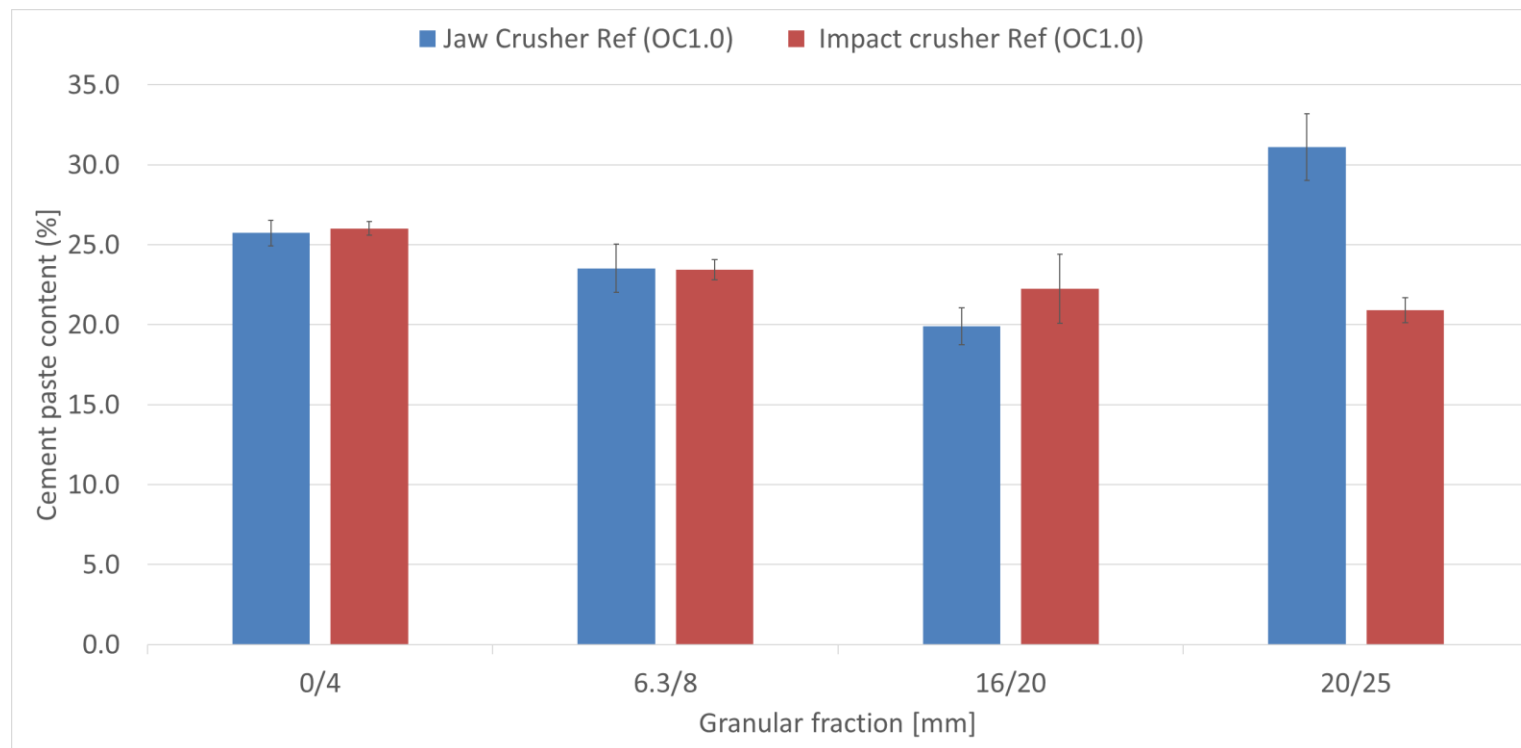


Le coefficient d'applatissage diminue lorsque la fraction granulaire augmente et le concasseur à percussion produit des granulats plus sphériques.

Présence d'un minimum au voisinage du D_{max} des granulats d'origine



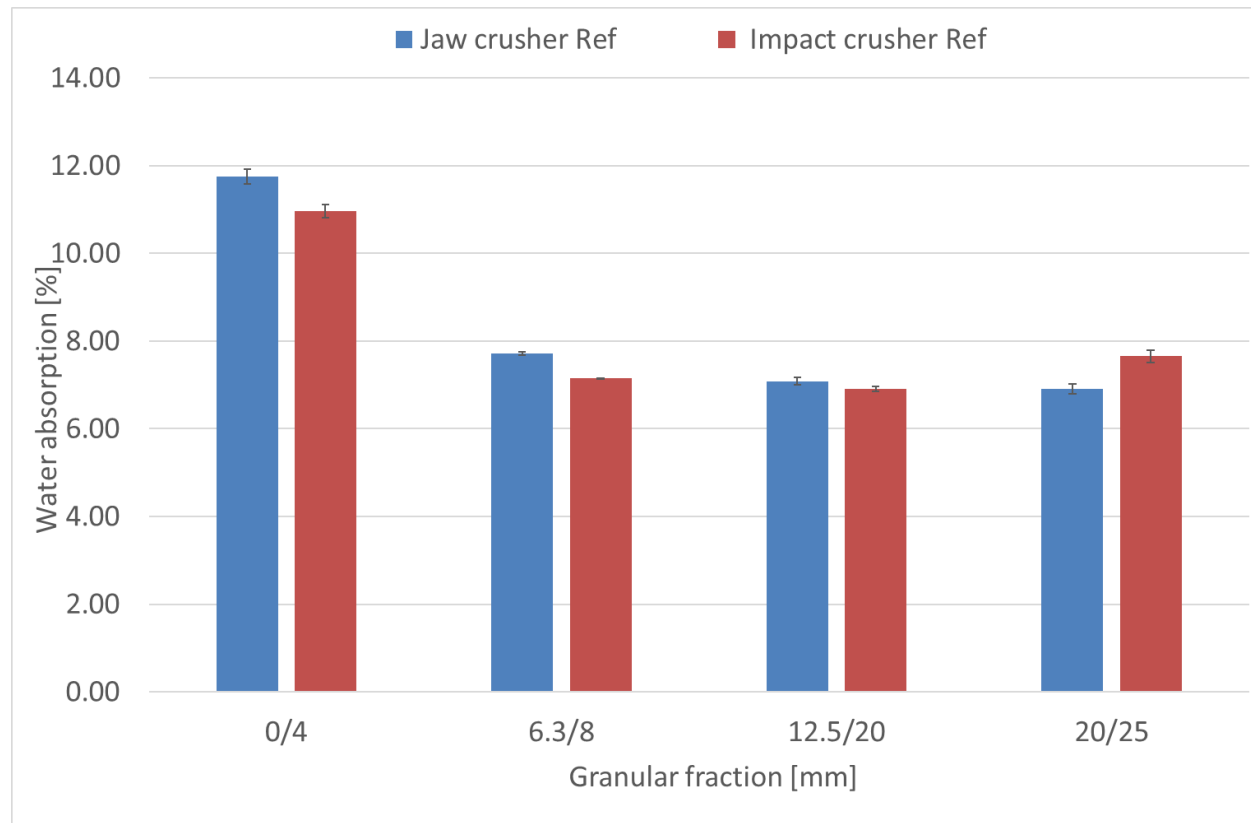
Diminution de la teneur en pate de ciment lorsque la fraction granulaire augmente
Pas d'influence de la méthode de concassage pour les compositions de béton étudiées



Exception : fraction 20/25

Diminution de l'absorption d'eau lorsque la fraction granulaire augmente : bonne corrélation avec la teneur en pate de ciment

Pas d'influence de la méthode de concassage pour les compositions de béton étudiées



	Jaw crusher	Impact crusher
(a) Running power (kW)	1,8-2,0	6,5-6,6
(b) Mean net power (kW)	1,9-2,1	0,5-0,8
(c) Mean crushing duration (s)	200	252
(d) Crushed mass of material per hour (t/h)	2,0-2,3	1,6-1,7
(e) Net specific energy consumption (kWh/t) (b/d)	0,9-1,0	0,30-0,50
(f) Total specific energy consumption (kWh/t) ((a+b)/d)	1,8-1,9	4,1-4,5
(g) Percentage of energy consumed for crushing (=b/(a+b))	~50	~10

CONCLUSION : TRAITEMENT PAR VOIE HUMIDE

Par rapport aux effets anticipés:

- ▶ Courbe granulometrique plus restreinte
- ▶ Diminution de la teneur en particules fines
- ▶ Diminution de la quantité d'éléments indésirables (bois, argiles, plâtre, etc.)
- ▶ Augmentation de la résistance à l'abrasion

A noter également :

- ▶ Pas d'influence sur l'absorption d'eau des granulats

Validité par rapport aux réglementations

- ▶ NBN EN 206 et NBN B 15-001



	B-4/20	B-0/20	M-4/20	M-0/20
FL (cm³/kg)	0.51	1.25	1.58	3.10
Rc (%)	81.43	86.78	61.05	63.04
Ru (%)	10.60	5.47	11.80	9.80
Rb (%)	7.53	6.24	24.89	25.42
Ra (%)	0.01	0.18	0.00	0.00
XRg (%)	0.02	0.018	1.23	0.32
f (%)	0.2	5.6	0.9	8.1
LA	36	34	43	42

CONCLUSION : TYPE DE CONCASSEUR

	Percussion	Mâchoires
Morphologie	(+)	
Courbe granulométrique	(-)	(+)
Teneur en fine	(-)	(+)
Teneur en pate de ciment	-	-
Absorption d'eau	-	-
Consommation énergétique	(-)	(+)
Durée de concassage	(-)	(+)

SERAMCO

- ▶ Influence du procédé de production
- ▶ **Caractérisation et durabilité des bétons recyclés**
- ▶ Projet pilote belge

CIRMAP

- ▶ Design d'une encre cimentaire
- ▶ Caractérisation mécanique et évaluation de la durabilité
- ▶ Projet pilote belge

Pour chaque type de granulats, trois taux de substitution ont été envisagés afin de pouvoir quantifier l'influence des granulats recyclés sur les propriétés des bétons

Concrete mixes		Test series n°3 - CEM I 52 R LA							
		REF - 0 %	Granulat de béton recyclé				Granulat recyclé mixte		
		N100	B100	B75	B40	M100	M75	M40	
Eau	[kg]	180	180	180	180	180	180	180	
Eau de gâchage	[kg]	9	50	40	25	53	41	26	
Ciment	[kg]	400	400	400	400	400	400	400	
E/C efficace	[-]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	
E/C	[-]	0,47	0,57	0,55	0,51	0,58	0,55	0,51	
Sable 0/2	[kg]	615	615	615	615	615	615	615	
Granulat naturel 2/6	[kg]	273	-	273	273	-	273	273	
Granulat naturel 6/14	[kg]	909	-	-	454	-	-	454	
Granulat recyclé 2/6	[kg]	-	237	-	-	216	-	-	
Granulat recyclé 6/14	[kg]	-	791	791	395	723	723	362	
Taux de substitution	[-]	0%	100%	77%	38%	100%	77%	38%	
Superplastifiant	[%]	0,5%	0,5%	1%	1%	1%	1%	1%	

RÉSULTATS DES TESTS DE CARACTÉRISATION

Les bétons produits à base de granulats recyclés respectent la majorité des critères d'une classe d'environnement EE4 (pluie, gel, soumis à des agents de déverglaçage)

Cibles R_c : 50-55 MPaW/C \leq 0,45Ciment \geq 340 kg/m³Absorption d'eau \leq 6,5%

Résultats		REF - 0 %	Granulat de béton recycle			Granulat recyclé mixte		
		N100	B100	B75	B40	M100	M75	M40
Ciment	[kg]	400	400	400	400	400	400	400
E/C efficace	[-]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
E/C	[-]	0,47	0,57	0,55	0,51	0,58	0,55	0,51
E/C mesuré	[-]	0,41	0,44	0,41	0,44	0,42	0,41	0,44
Test d'affaissement au cone d'Abrams cone (EN12350-2)	[-]	S4(21cm)	S3(10cm)	S4(18cm)	S4(21cm)	S3(10cm)	S4(18cm)	S4(17cm)
Masse volumique à l'état frais	[kg/m ³]	2344	2254	2319	2229	2299	2261	2326
Résistance en compression à 28 jours	[MPa]	47,5	42,5	74,3	72,4	59,0	69,6	75,8
Absorption d'eau	[%]	5,2	9,1	5,6	5,9	7,1	6,0	5,5
Masse volumique	[kg/m ³]	2280	2051	2195	2282	2071	2195	2234
Perte de masse – cycles de gel-dégel à 28 jours	[kg/m ²]	0,67	5,28	1,73	1,77	2,61	2,54	1,87

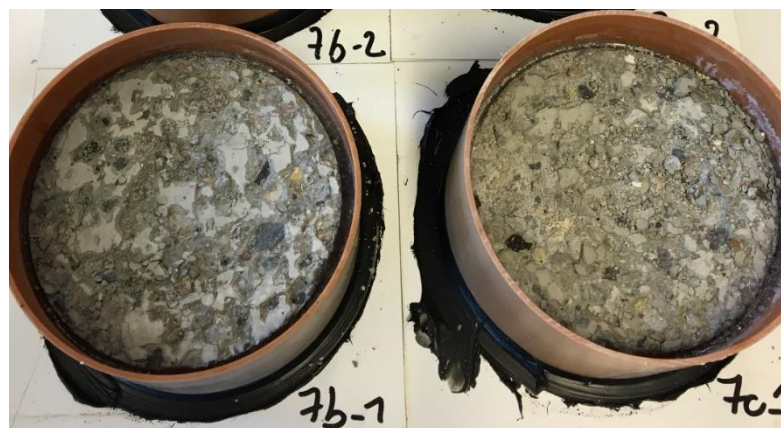
Résultats des essais de cycles gel-dégel à 28 jours

- ▶ La surface des échantillons produit à base de granulats recyclés est fortement endommagée

N100 (Ref)
0,72 kg/m²
0,43 kg/m²



B75
1,27 kg/m²



B40
2,15 kg/m²

M75
1,96 kg/m²



Production de béton à haut pourcentage en granulats recyclés:

- ▶ Résistance mécanique
- ▶ Absorption d'eau
- ▶ Durabilité (gel-dégel)

⇒ **Difficilement applicable aux environnements les plus agressifs mais il est tout à fait admissible de les utiliser pour bétons structuraux dans des pourcentages excédant ceux recommandés par NBN EN 206 et NBN B 15-001**

SERAMCO

- ▶ Influence du procédé de production
- ▶ Caractérisation et durabilité des bétons recyclés
- ▶ **Projet pilote belge**

CIRMAP

- ▶ Design d'une encre cimentaire
- ▶ Caractérisation mécanique et évaluation de la durabilité
- ▶ **Projet pilote belge**

SITE PILOTE BELGE : PARKOUR PARK DE SERAING





Objectif du projet CIRMAP: Concevoir et produire des éléments de mobilier urbain en béton imprimé fabriqué à base de granulats recyclés

THEMATIC PRIORITY



RESOURCE AND
MATERIALS EFFICIENCY



SERAMCO

- ▶ Influence du procédé de production
- ▶ Caractérisation et durabilité des bétons recyclés
- ▶ Projet pilote belge

CIRMAP

- ▶ **Design d'une encre cimentaire**
- ▶ **Caractérisation mécanique et évaluation de la durabilité**
- ▶ **Projet pilote belge**

Extrudabilité



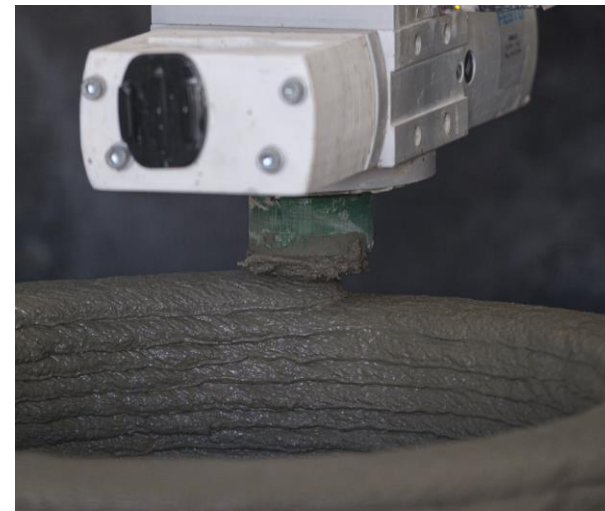
Constructibilité



Fluide et maniable



Ferme et cohésif



CARACTÉRISATION À L'ÉTAT FRAIS

Test d'extrusion au pistolet :

- ▶ Toutes les 5 minutes jusqu'à obstruction du pistolet



- ▶ Le test est considéré un succès si :
 - Le mix est correctement malaxé (pas de ségrégation) → le mix contient trop d'eau
 - L'encre cimentaire reste extrudable pendant au moins 30 minutes
 - Au minimum 4 couches peuvent être superposées sans affaissement
 - La surface du cordon est continue et ne présente pas ou peu de déchirures

Test d'extrusion au pistolet :

Formulation	RFA 0/2 Tradecowall [kg/m ³]	Vicat cement Performat CEM I 52.5N [kg/m ³]	W _{eff} /C	%SP (SP/C)	%VMA (VMA/C)	Comments regarding the mortar
#1	995.6	905	0.30	2.20%	0.2%	Mediocre blending efficiency Extrudable and buildable, considerable amount of cracks Becomes gradually more viscous and cracked Printable up to 25 min
#2			0.30	2.50%	0.2%	Mediocre blending efficiency (better than #1) Extrudable and buildable, less cracked than #1 Becomes gradually more viscous and cracked Printable up to 35 min
#3			0.30	2.40%	0.2%	Mediocre blending efficiency Good extrudability and buildability, surface aspect similar to #1 Becomes gradually more viscous and cracked Printable up to 35 min
#4			0.30	2.40%	0.3%	Good blending efficiency Good extrudability and buildability, more cracks than #3 Becomes gradually more viscous and cracked Printable up to 25-30 min
#5			0.31	2.00%	0.2%	Good blending efficiency Good extrudability and buildability, more cracked than #3 Becomes gradually more viscous and cracked Printable up to 25 min
#6			0.29	2.50%	0.2%	Good blending efficiency Good extrudability and buildability (slightly too fluid), a few cracks (acceptable) Becomes gradually more viscous and cracked Printable up to 30 min
#7			0.29	2.70%	0.2%	Good blending efficiency More fluid than #6 right after blending but buildable. Same surface aspect as #6 Becomes gradually more viscous and cracked Printable up to 50 min

OK

CARACTÉRISATION À L'ÉTAT FRAIS

Test d'impression à l'échelle laboratoire :

- ▶ Gâchée de 50 L et impression de formes simples

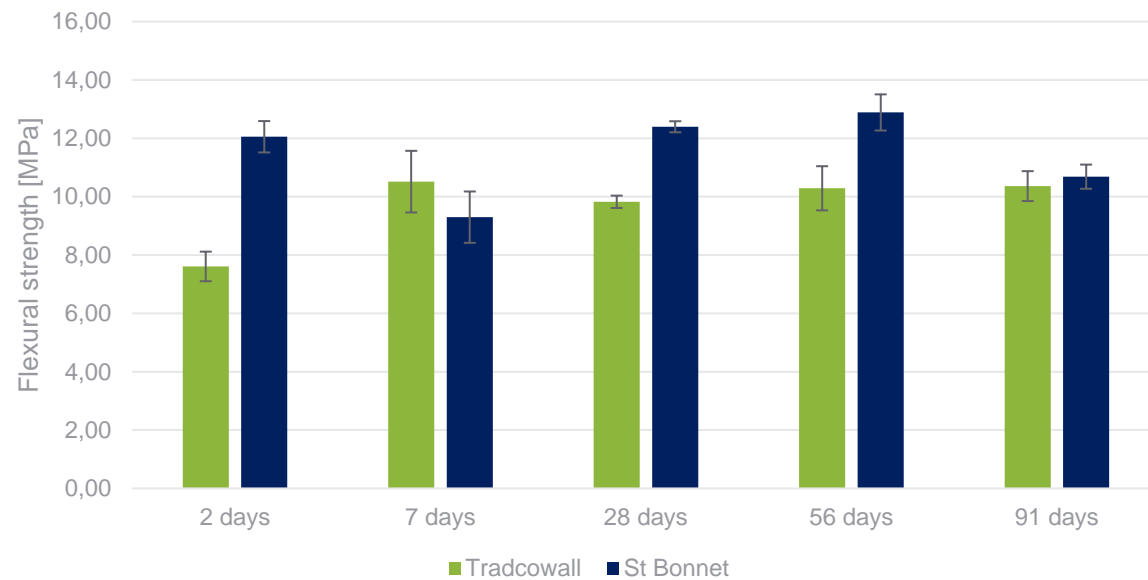


CARACTÉRISATION MÉCANIQUE

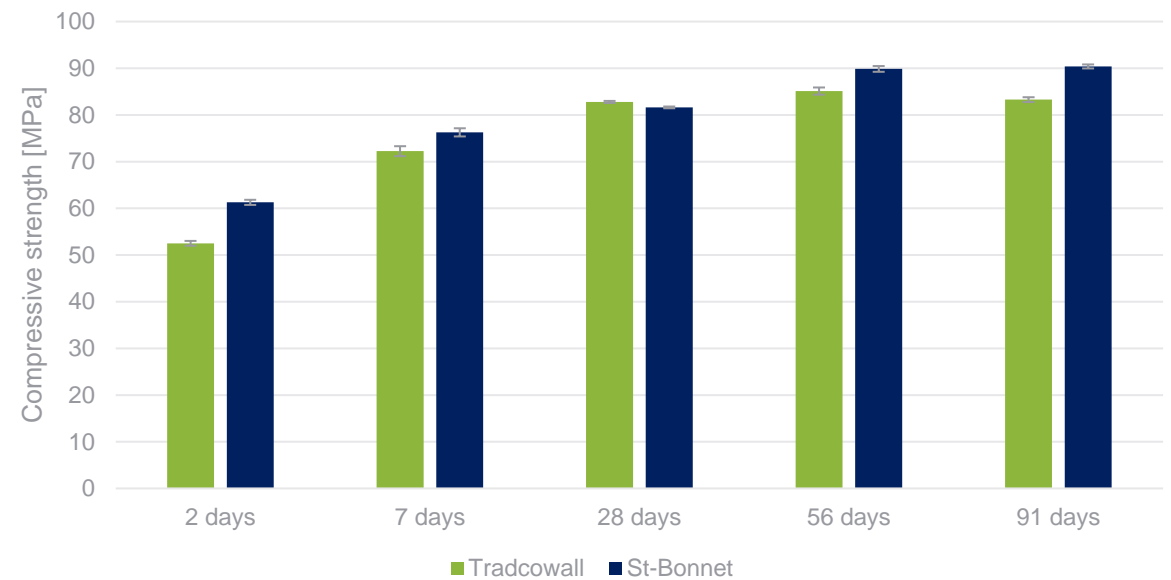
Effet du sable sur les propriétés mécaniques de l'encre cimentaire:

- Mix de référence avec un sable naturel conçu pour avoir la même rhéologie

Flexural strength (Tradcowall & St Bonnet)

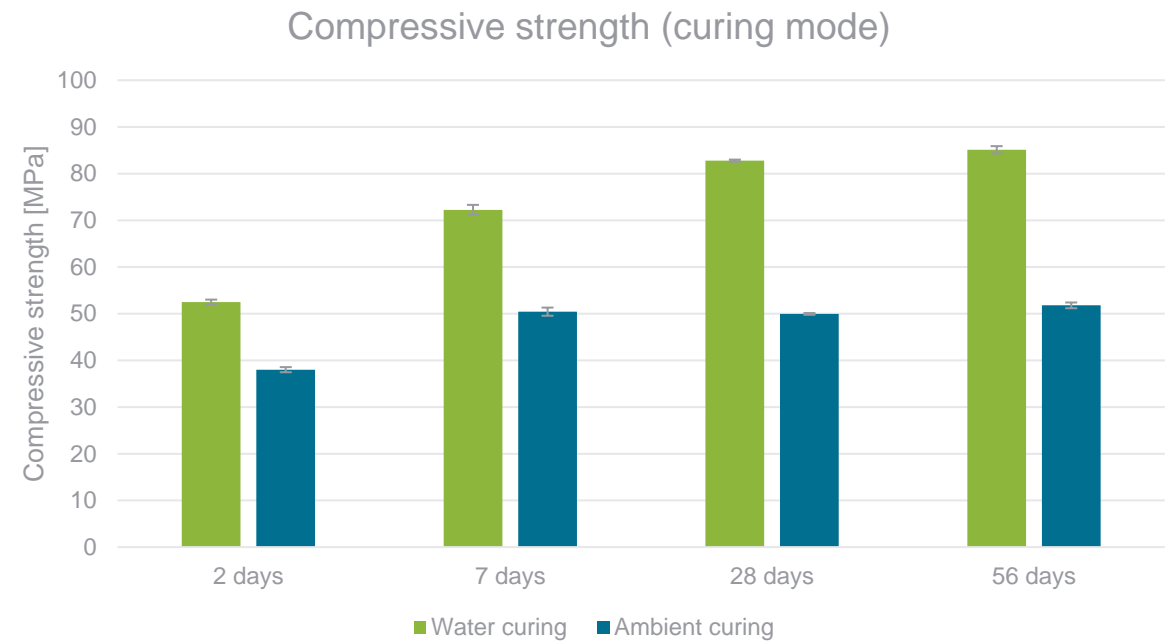
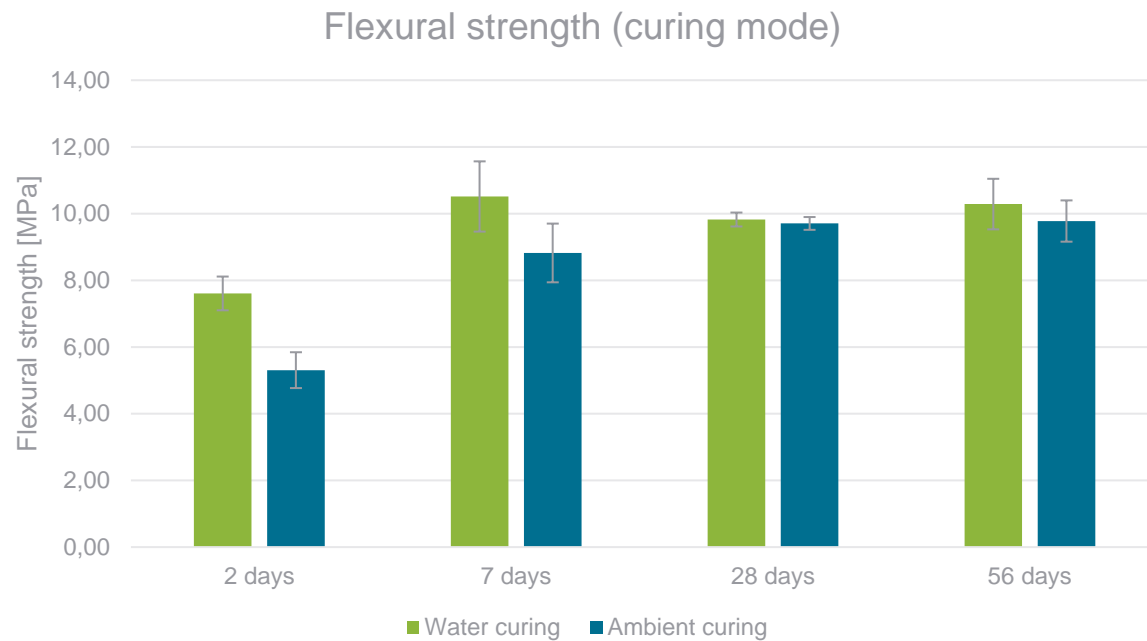


Compressive strength (Tradcowall & St-Bonnet)



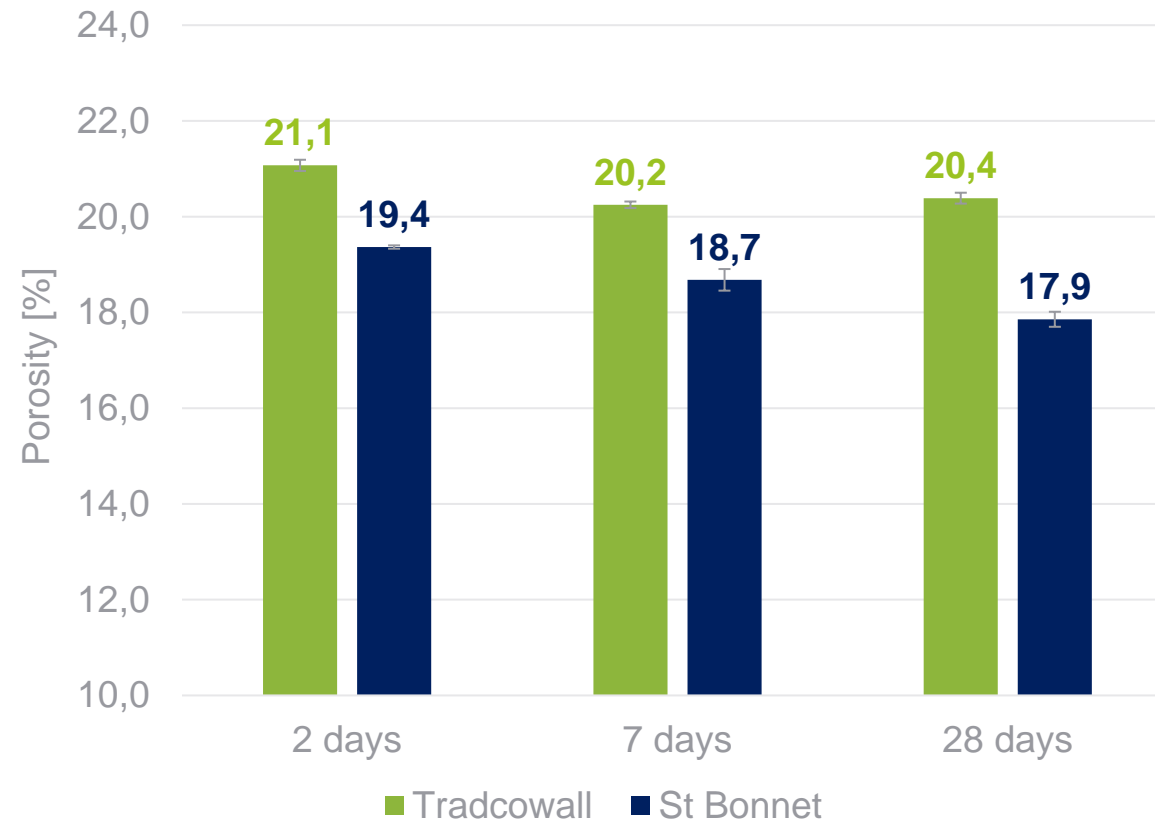
Effet de la cure sur les propriétés mécaniques de l'encre cimentaire:

- Cure en condition « ambiante » afin de simuler une impression sur site



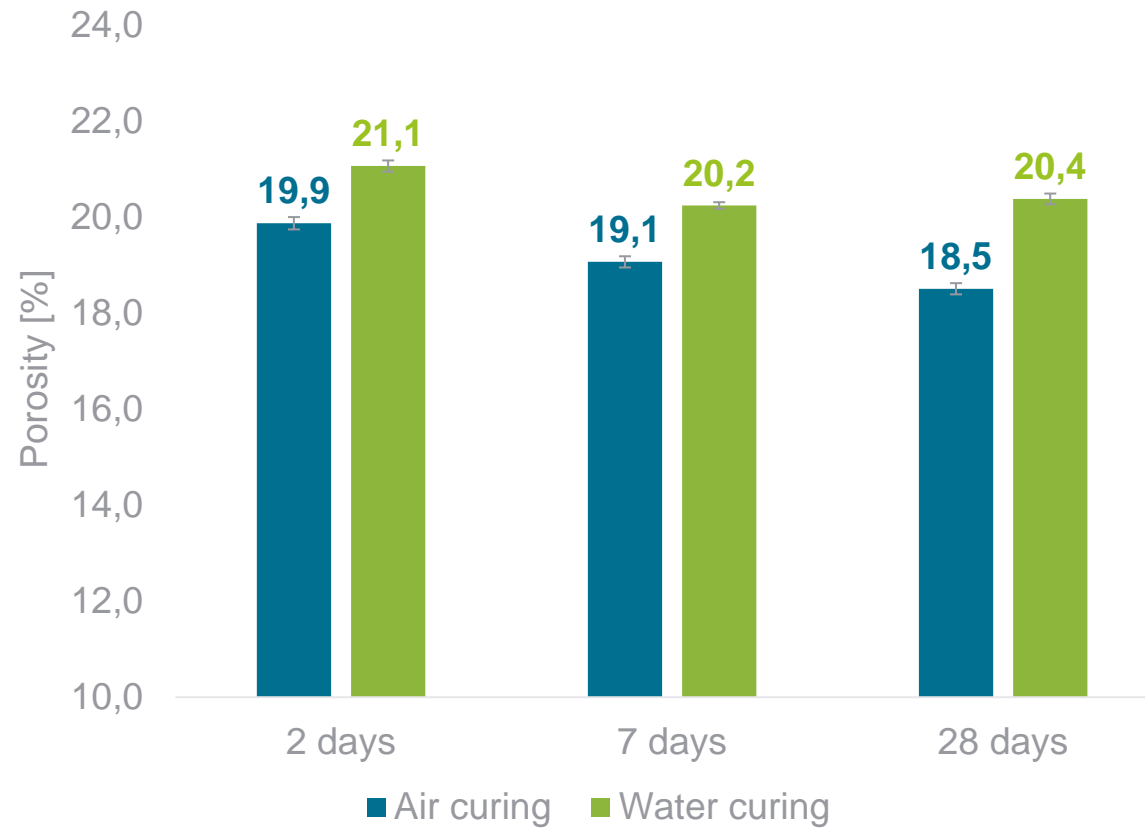
Effet du sable sur la microstructure:

- Mix de référence avec un sable naturel conçu pour avoir la même rhéologie



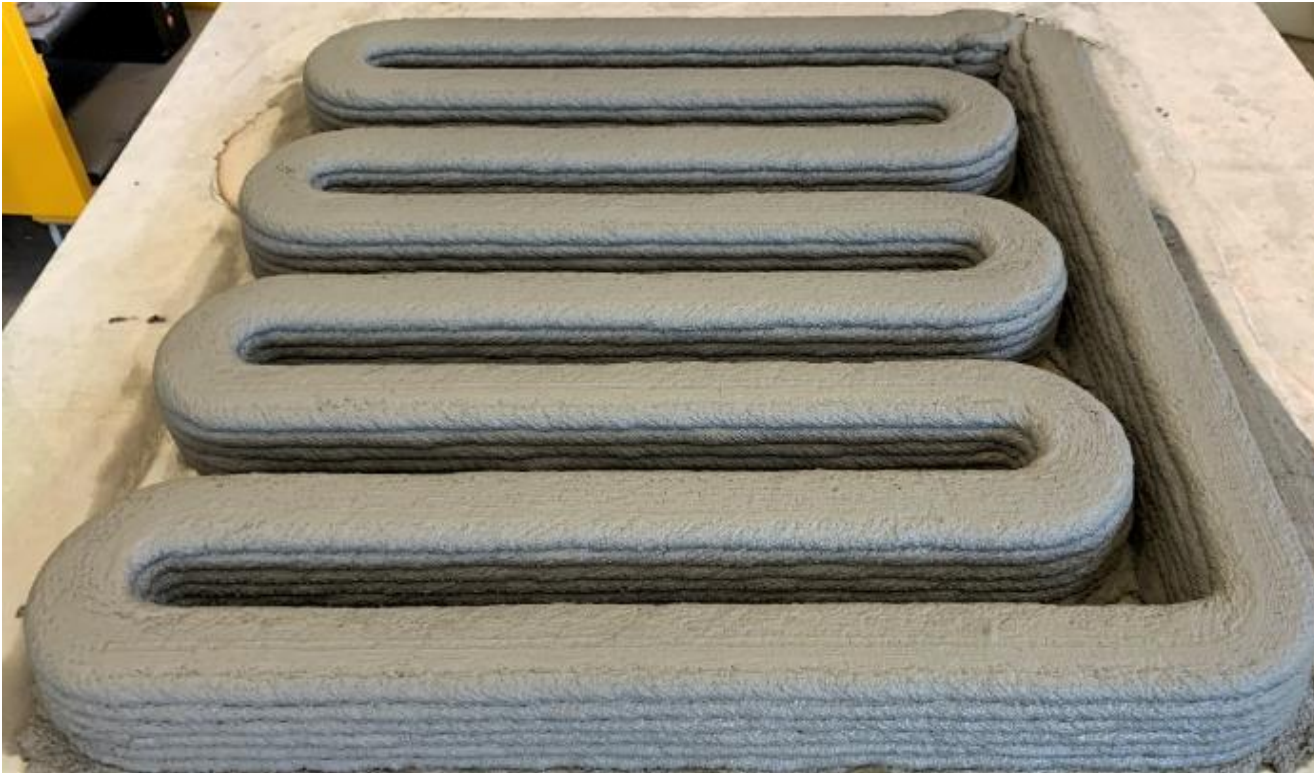
Effet de la cure sur la microstructure:

- Cure en condition « ambiante » afin de simuler une impression sur site

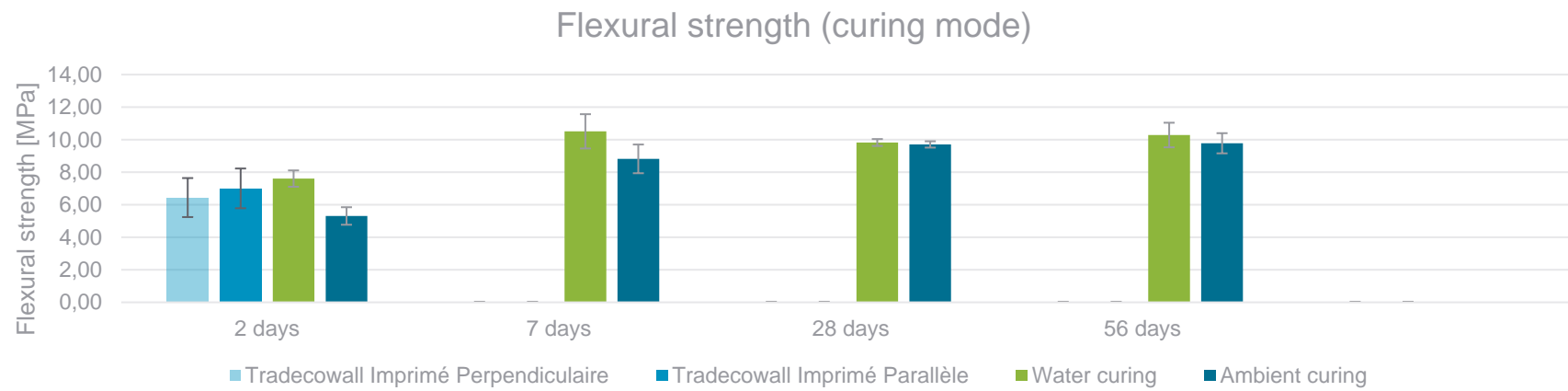
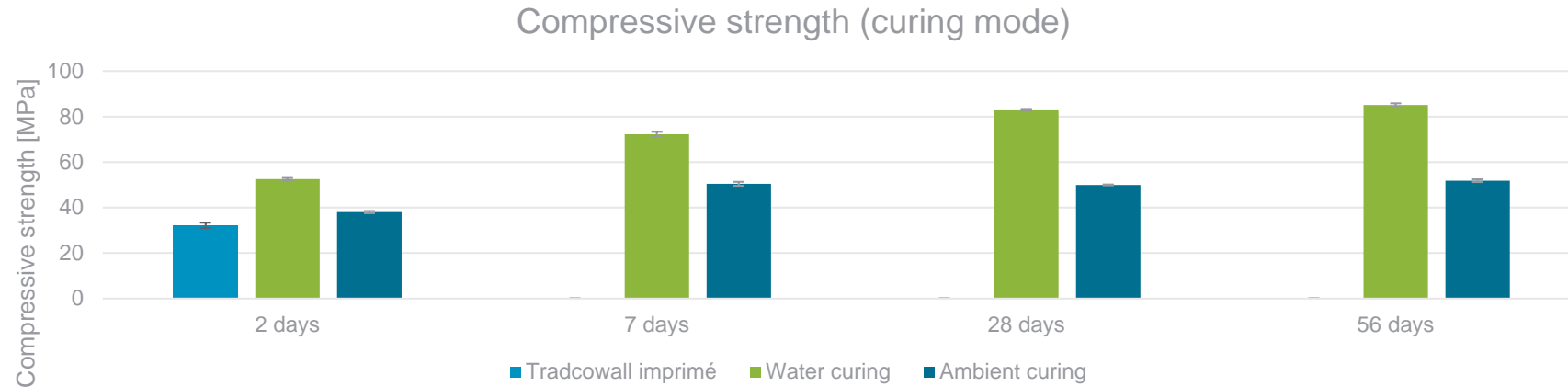


INFLUENCE DU MODE DE MISE EN OEUVRE

Impression d'éléments en « S » afin d'en extraire des barrettes 4*4*16cm pour caractérisation mécanique :



Premiers résultats – tests en cours:



Workshop étudiant :

2021 G1	2021 G2	2021 G3	2022 G1	2022 G2
				

Julien Hubert

Ingénieur de recherche

Université de Liège

☎ + 32 4 366 92 24

✉ julien.hubert@uliege.be



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

