

Performances mécaniques et durabilité d'un béton contenant des mâchefers d'incinération carbonatés

Imad Eddine Kanjo, Luc Courard.

NoMaD 2025, Nantes, 14 Novembre 2025.

Consommation

- Sable et granulats naturels: 2.2 milliards tonnes.
- 3^{ème} ressource la plus utilisée après l'air et l'eau.

Production:

- Déchets d'ordures ménagères: 230 millions tonnes.
 - Mâchefers d'incinération ménagères: 18 millions tonnes.



Lots des sables et de granulats



Lots de déchets ménagères

Solution innovante de traitement

Traitement

Carbonatation accélérée pour minimiser la durée de traitement tout en capturant le CO₂ dans les mâchefers.

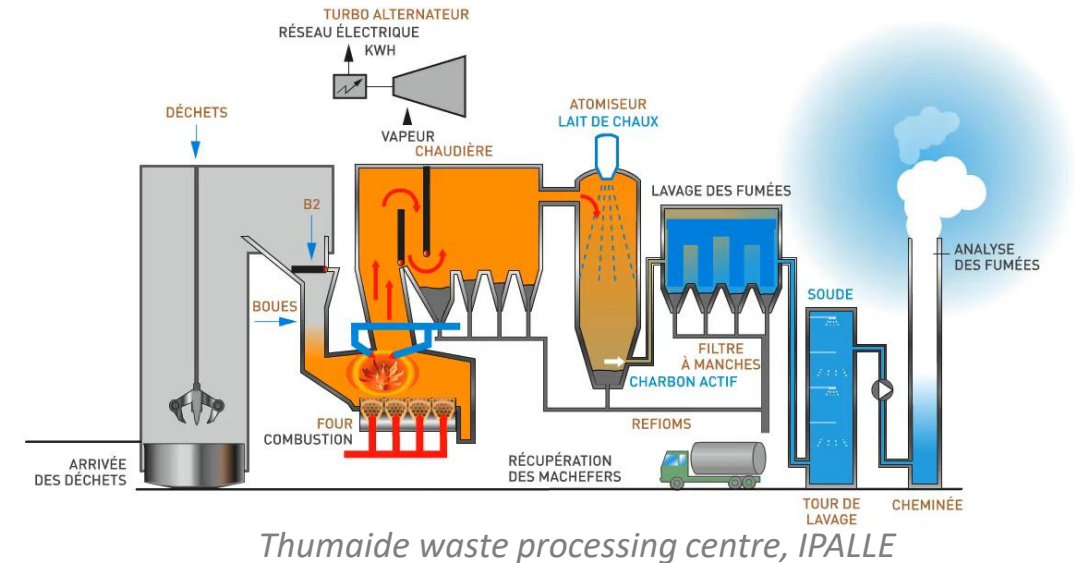
Formulations de béton

Bétons optimisés en maximisant le taux de substitution.

→ Objectif : Remplacer les granulats et sable naturels par des mâchefers carbonatés

Process d'incinération

- Sous-produits de l'incinération des déchets résiduels.
- Granulométrie similaire aux sables et granulats naturels.
- Faible densité et grande absorption d'eau par rapport aux sables et granulats naturels



Propriétés physiques et chimiques

MSWI BA (mm)	Densité (kg/m ³)	Absorption d'eau (wt.%)
Granulats (4/20)	1860-2680	7.2-15
Sable (0.063/4)	2150-2850	2.2-17.3

Principaux oxydes	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Moyenne (%)	37	22	10	8

Utilisation

Substitution partielle ou totale des granulats et du sable pour:

- Fondations routière
- Pavés en béton
- Blocs de béton



Blocs de béton



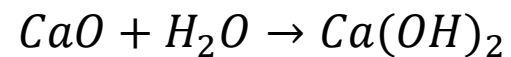
Pavés en béton



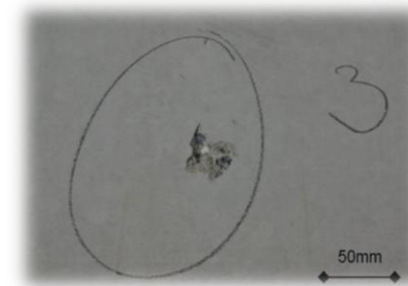
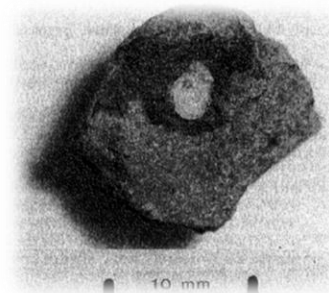
Fondations routières

Risques potentiels

- Lixiviation.
- Gonflement des nodules de chaux.



Molécule	CaO	H ₂ O	Ca(OH) ₂
Volume molaire (cm ³ /mole)	16.8		33.1



Maturation vs Carbonatation statique accélérée

Maturation:

- ✗ Durée de traitement : 18 semaines.
- ✗ Inefficace dans certains cas.
- ✗ Dépendant des conditions météorologiques

Carbonatation accélérée:

- ✓ Durée de traitement: 1-7 jours
- ✓ Séquestration du CO₂
- ✓ Conditions contrôlables



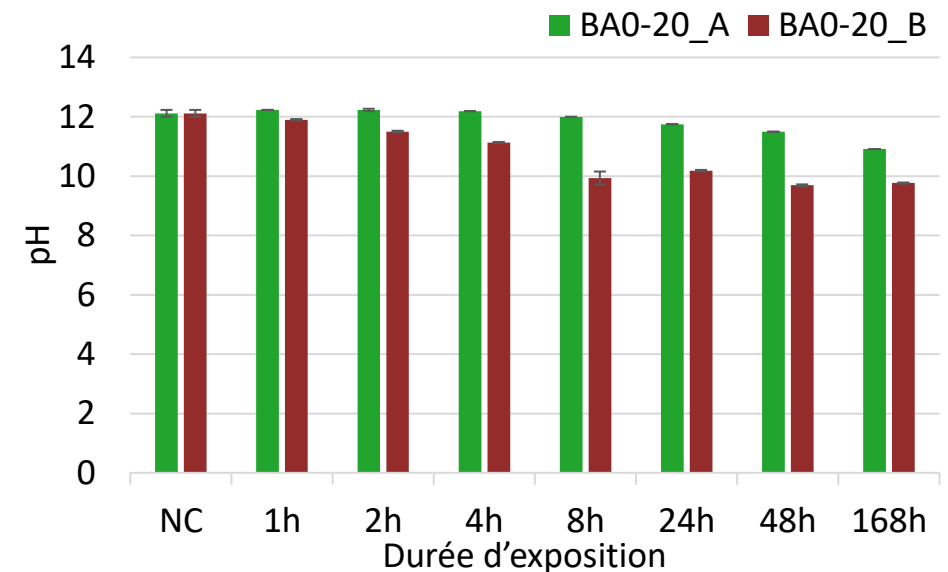
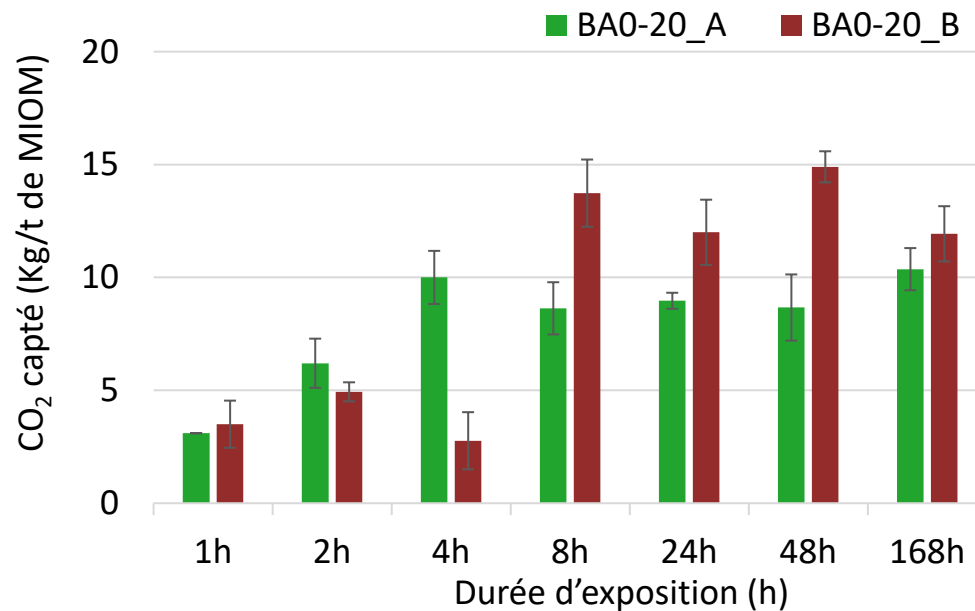
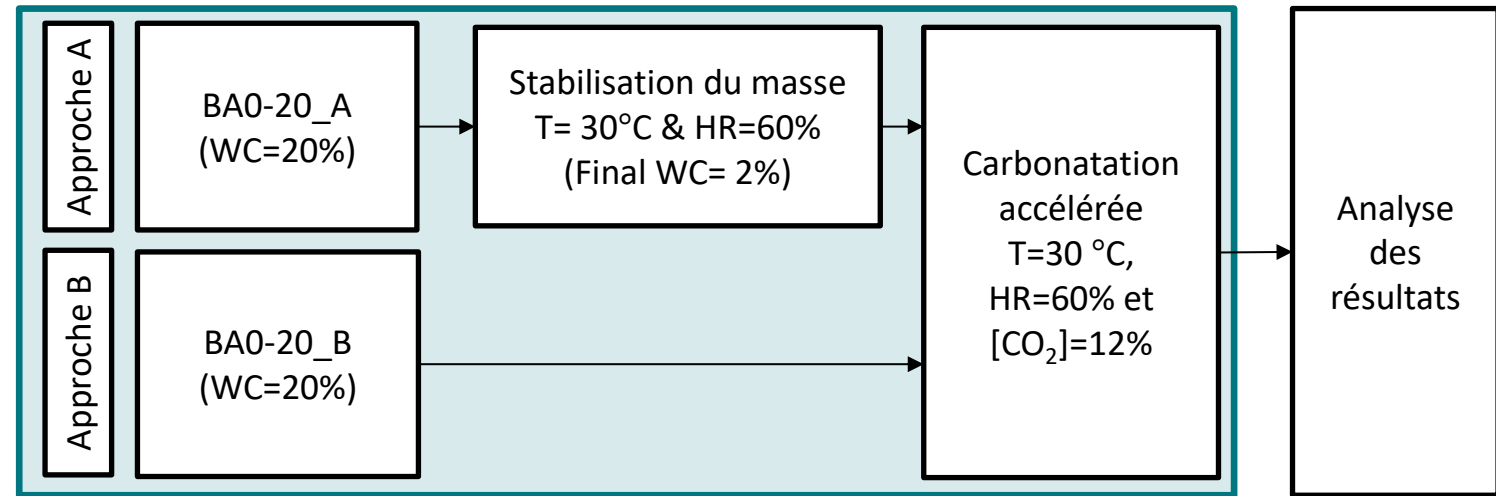
Cellule de maturation



Chambre de carbonatation statique

Paramètres étudiés:

- Granulométrie : 0/20 mm.
- Durée d'exposition : 1, 2, 4, 8, 24, 48 et 168 h.
- Teneur en eau (WC) : 2 et 20%.

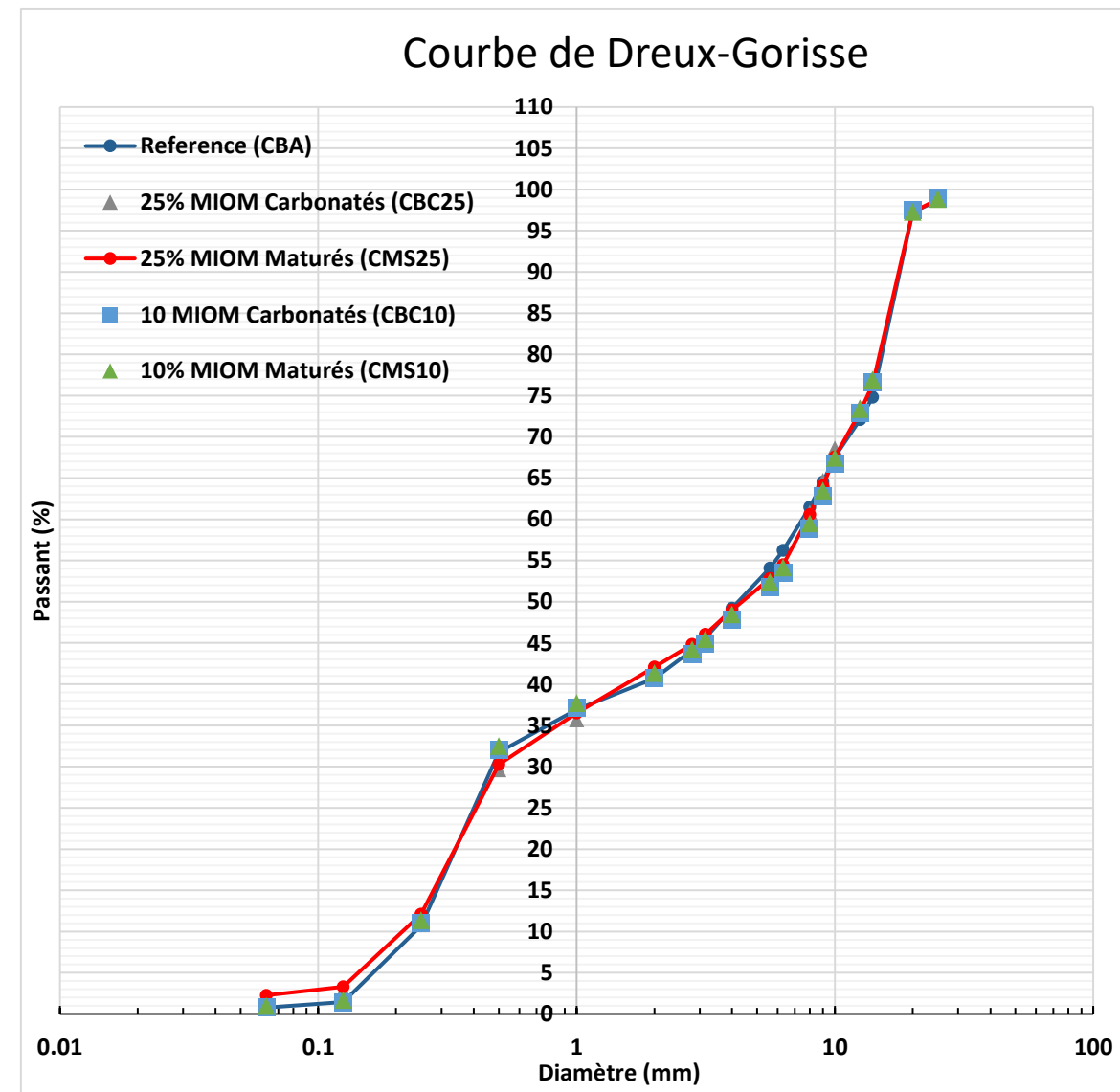


- Diminution de durée de traitement (18 semaines => 24 heures).
- Amélioration des propriétés physiques des MIOM.
- Captage du 15 ± 3 kg du CO_2 /t de MIOM

	Masse volumique réelle (kg/m^3)	Absorption d'eau (%)	Teneur en fines (%)	QUALIROUTES (Béton maigre)
MIOM carbonatés 0/2	2160	6.7	9.3	<10
MIOM maturés 0/2	1770	10.7	9.8	<10
MIOM carbonatés 2/6	2380	1.5	3.1	<4
MIOM maturés 2/6	2060	6.1	7.2	<4
MIOM carbonatés 6/20	2550	1.6	2.3	<4
MIOM maturés 6/20	2348	3.1	3.3	<4

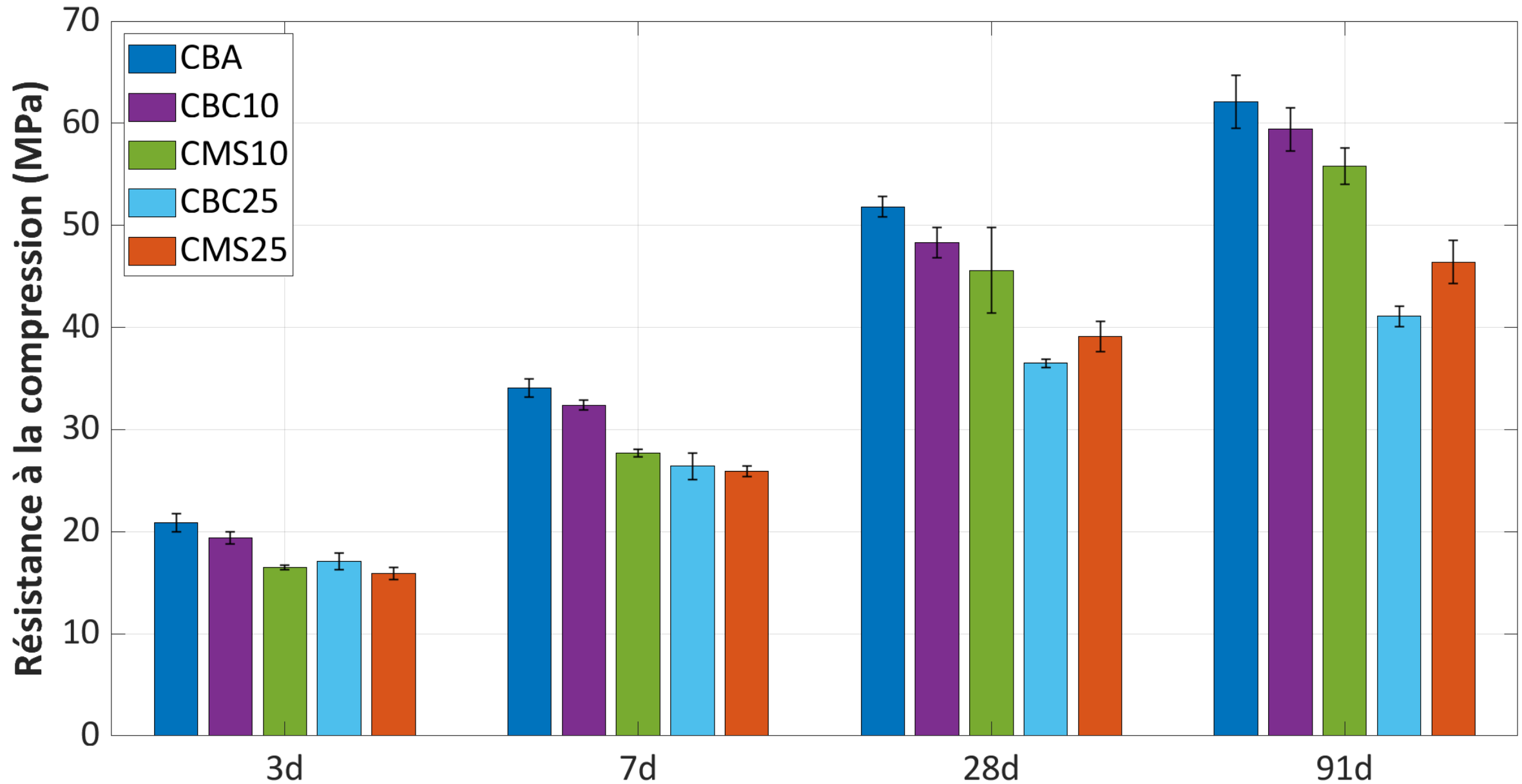
	MIOM carbonatés	MIOM maturés	Littérature	QUALIROUTES (Béton maigre)
Résistance à l'usure MDE (wt.%)	24	21	18-31	<25
Résistance au gel/dégel MS (wt.%)	20	19	15-25	<25

Formulations	Réf. (CBA)	CBC10	CBS10	CBC25	CBS25
CEM III/A 42.5N	350	350	350	350	350
Sable escaut 0/2	120	122	122	105	105
Sable béton 0/4	685	650	650	509	509
Calcaire 2/6	207	142	142	0	0
Calcaire 6/20	828	690	690	708	708
MIOM carbonatés 0/2	0	0	0	143	0
MIOM carbonatés 2/6	0	0	0	126	0
MIOM carbonatés 6/20	0	158	0	118	0
MIOM maturés 0/2	0	0	0	0	117
MIOM maturés 2/6	0	0	0	0	109
MIOM maturés 6/20	0	0	156	0	109
Superplastifiant	2.60	2.80	2.86	2.95	2.77
Eau	179	180	183	194	196
E_{eff}/C	0.49	0,49	0,49	0.49	0.49



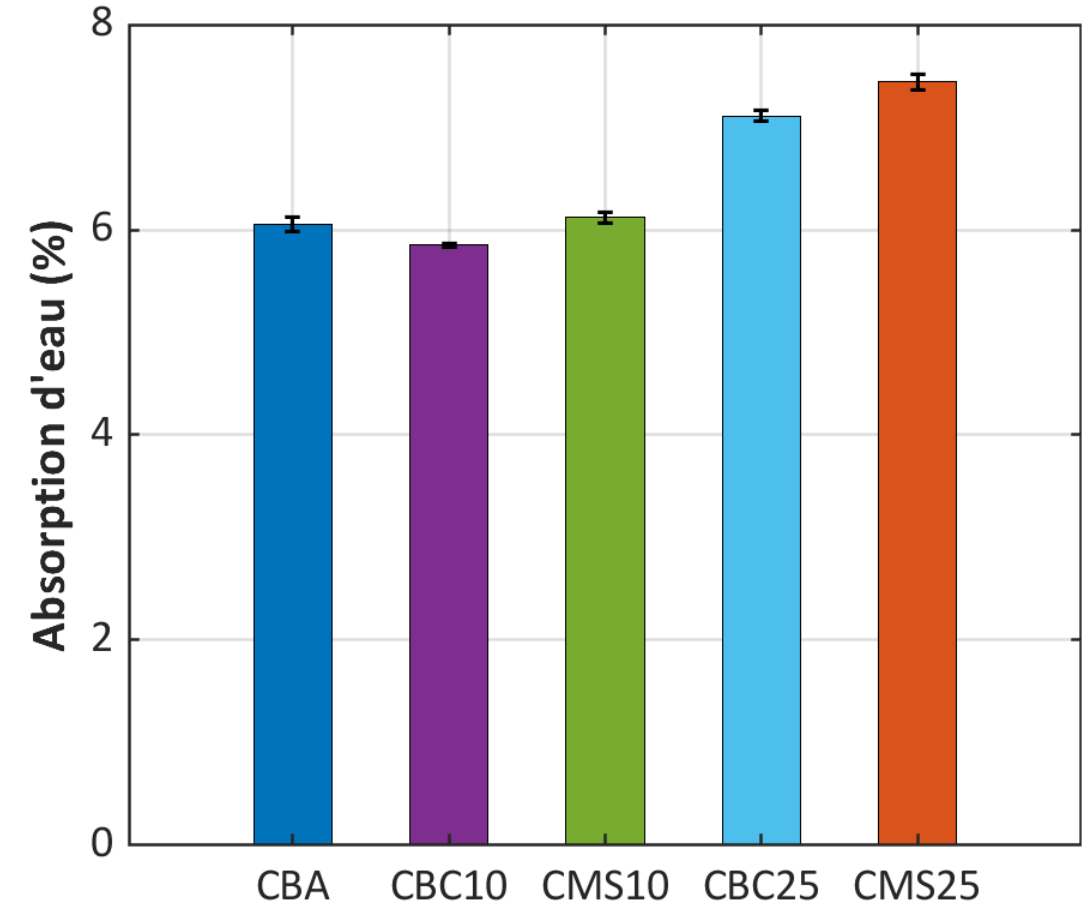
Résultats d'essais				
Composition	Masse volumique [kg/m ³]	Affaissement [mm]	Etagement [mm]	Teneur en air [%]
Référence (CBA)	2367	175	535	3
10% MIOM carbonatés (CBC10)	2322	150	465	2.2
10% MIOM maturés (CMS10)	2310	200	585	1.8
25% MIOM carbonatés (CBC25)	2272	207	470	4.7
25% MIOM maturés (CMS25)	2200	170	490	5.8





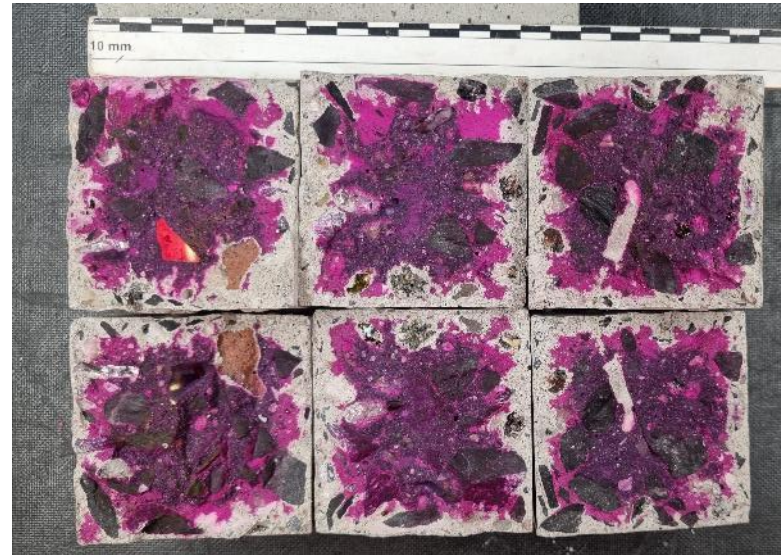
Résultats d'essais				
Composition	WAI [%]	Profondeur de la carbonatation (mm)		
		7j	28j	70j
CBA	6.05	1.89	3.58	6.00
CBC10	5.85	1.86	3.71	6.72
CMS10	6.12	1.26	3.26	6.04
CBC25	7.11	3.44	6.89	14.40
CMS25	7.44	5.26	9.53	16.35

Diffusion des ions chlorés			
Composition	C_s [%]	D_{nss} [m^2/s]	R^2
Référence (CBA)	0.68	$3.10 \pm 1.13 \times 10^{-12}$	0.98-0.99
10% MIOM carbonatés (CBC10)	0.47	$1.9 \pm 0.1 \times 10^{-12}$	0.99-0.99
10% MIOM maturés (CMS10)	0.37	$3.8 \pm 0.7 \times 10^{-12}$	0.97-0.97
25% MIOM carbonatés (CBC25)	0.61	$5.70 \pm 0.85 \times 10^{-12}$	0.98-0.99
25% MIOM maturés (CMS25)	0.66	$4.85 \pm 2.7 \times 10^{-12}$	0.97-0.99





CBA



CMS10



CMS25

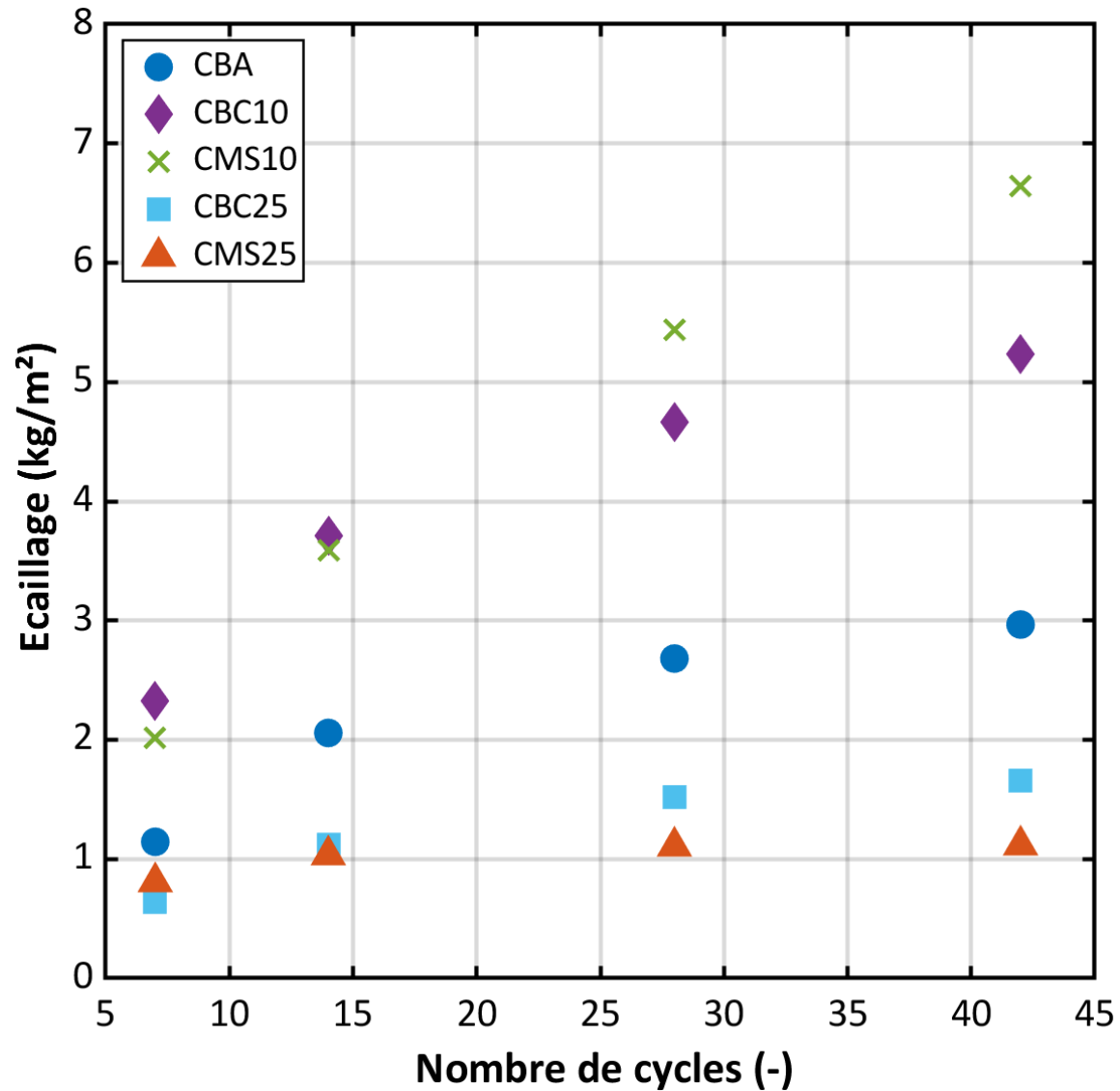


CBC10

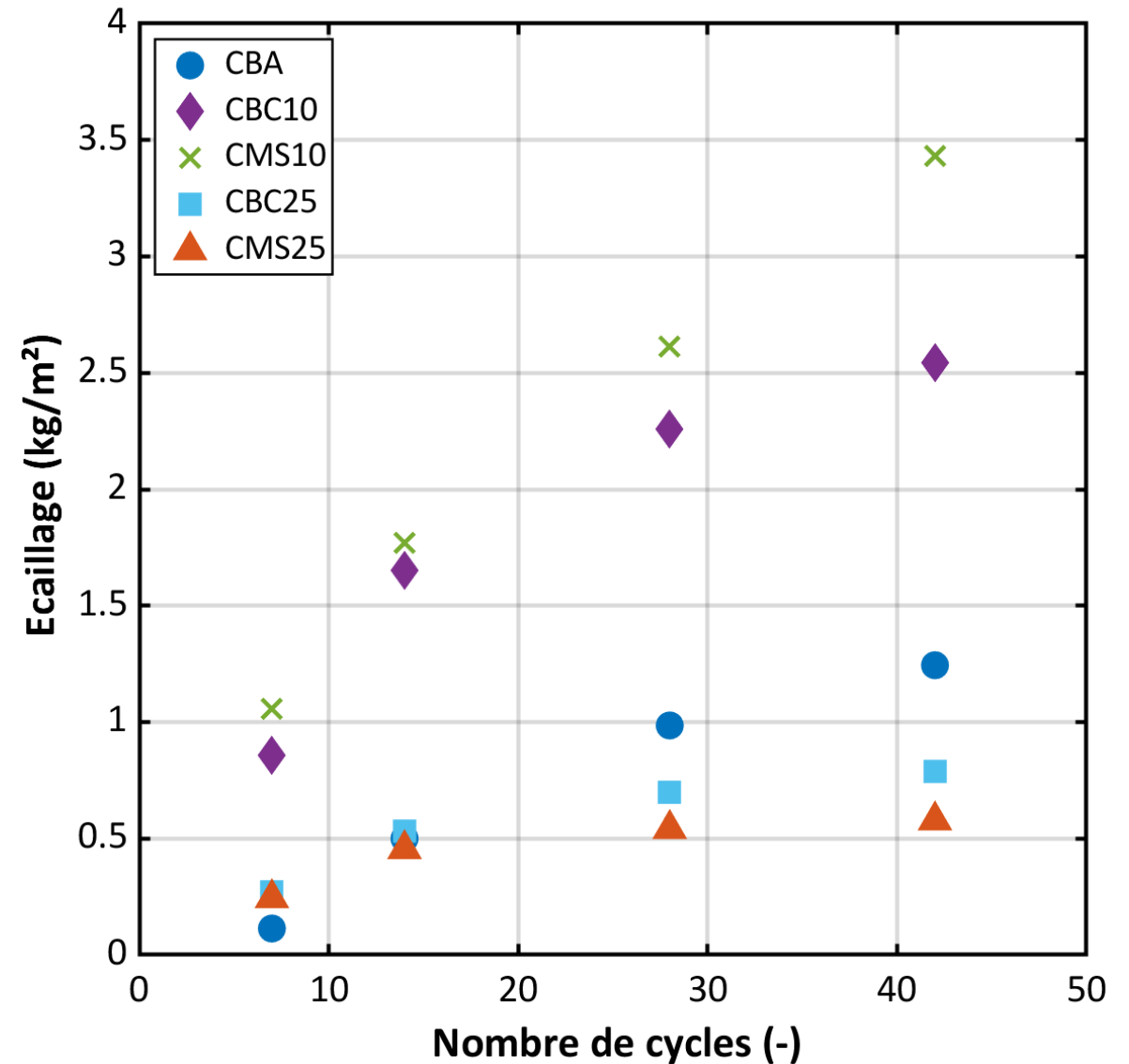


CBC25

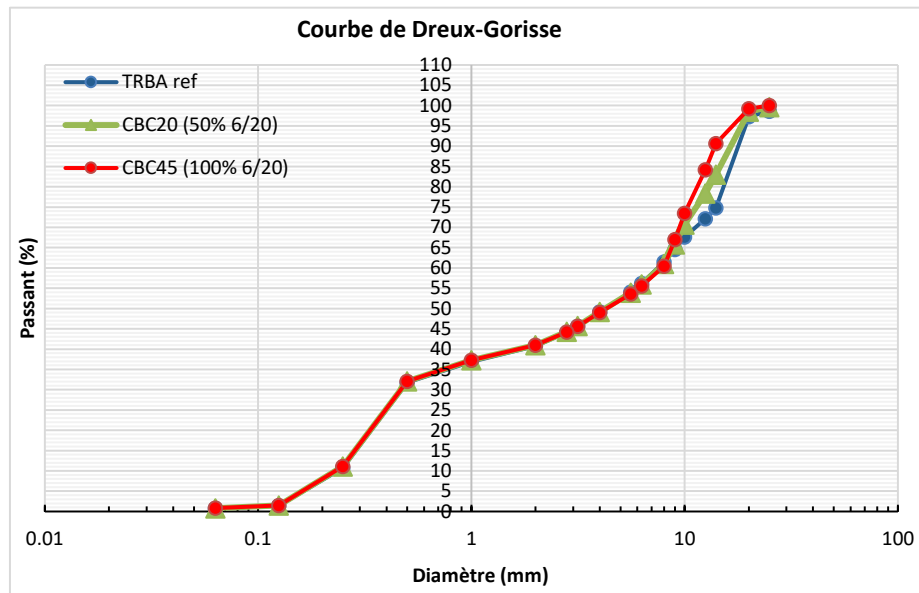
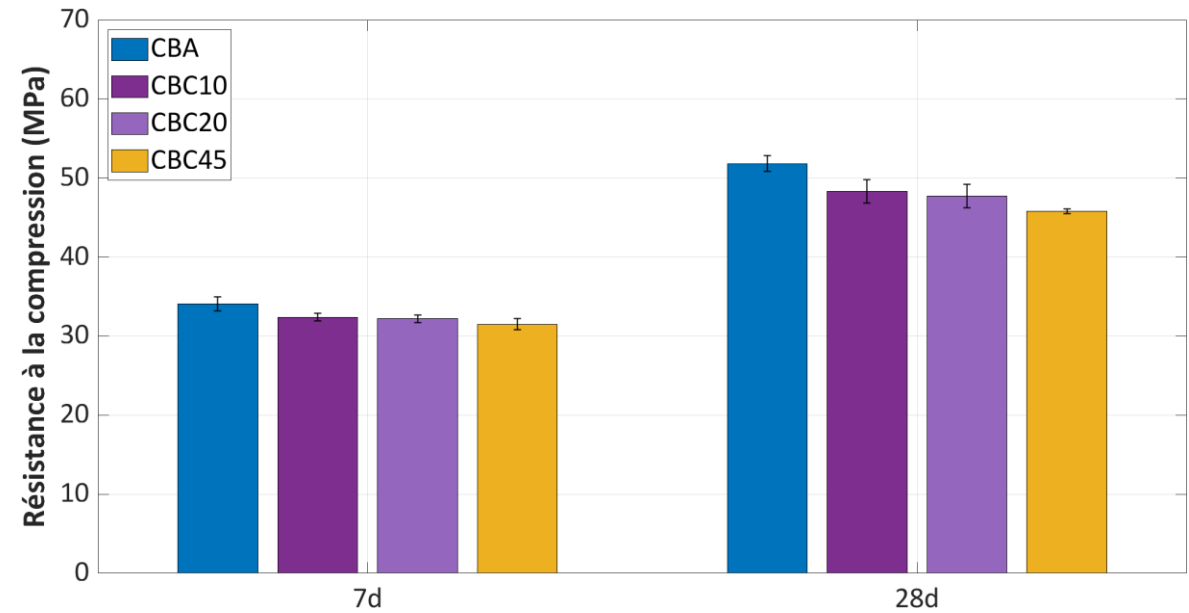
Surface non-sciée



Surface sciée



	Réf	CBC20	CBC45
CEM III/A 42.5N	350	350	350
Sable escaut 0/2	120	122	122
Sable béton 0/4	685	648	650
Calcaire 2/6	207	194	195
Calcaire 6/20	828	397	0
MIOM carbonatés 6/20	0	359	710
Superplastifiant	2,48	1,85	3,09
Eau	179	182	185
E_{eff}/C	0,49	0,49	0,49



Résultats d'essais			
Composition	Rc 7j (MPa)	Rc 28j (MPa)	WAI (%)
Référence (CBA)	34.1	51.8	5.97
CBC10 (20% 6/20)	32.4	48.3	5.85
CBC20 (50% 6/20)	32.2	47.7	6.52
CBC45 (100% 6/20)	31.5	45.8	7.02

- La carbonatation par voie humide (approche B) est plus efficace en termes de captation du carbone et de stabilisation du pH.
- Les MIOM utilisés, qu'ils soient issus de la carbonatation accélérée ou de la maturation traditionnelle, donnent des résultats similaires.
- Les formules CBC10 et CMS10 sont compatibles avec la classe de résistance C30/37 et le type d'exposition XC4 et XS1.
- Un remplacement à 100 % des granulats 6/20 par des MIOM carbonatés n'affecte pas significativement la résistance en compression.

Analyses supplémentaires

- Évaluer l'effet de la carbonatation accélérée sur la lixiviation des métaux lourds.

Fabrication de béton prêt à l'emploi

- Adapter les formulations aux contraintes industrielles.
- Étudier l'effet des MIOM sur la lixiviation du béton.

Développement d'autres types de bétons

- Concevoir et évaluer des blocs, pavés et bordures intégrant des MIOM carbonatés.

Bilan environnemental

- Évaluer l'impact de l'utilisation des MIOM carbonatés sur l'empreinte carbone des produits finis.





Merci pour votre attention !

Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre du projet de recherche **Remind CARBOC**, intitulé:
« Captage et stockage du CO₂ par carbonatation de mâchefers et de béton à teneur réduite en ciment »

