

Etude de la carbonatation des granulats de béton recyclé altéré par la réaction alcali-silice

S. Grigoletto, P. L. Delaforge, L. Courard

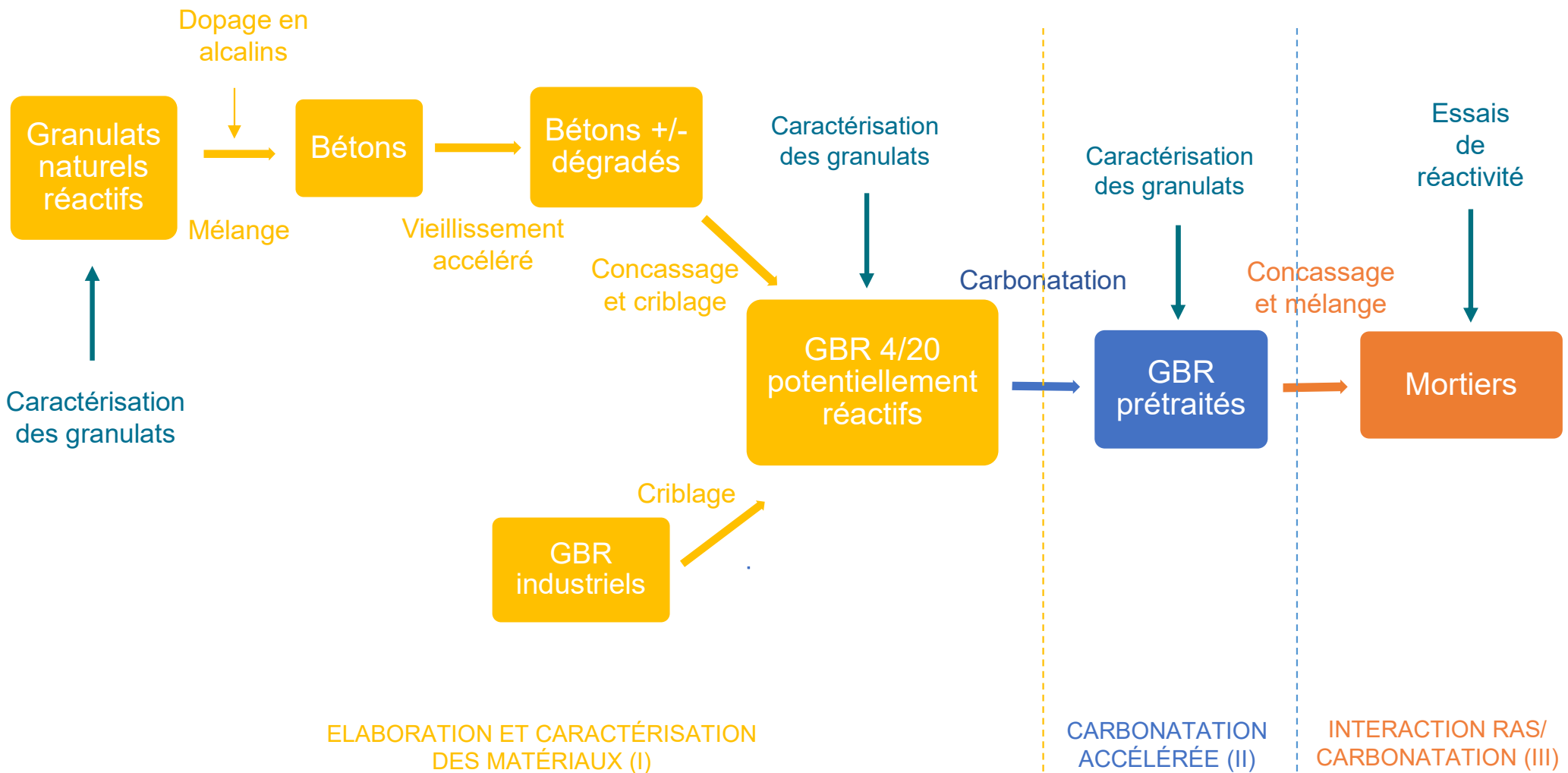
Urban and Environmental Engineering, University of Liège, Belgium

Nouveaux Matériaux et Durabilité 2022

16 – 17 Novembre 2022 – Montpellier, France

- Recyclage du béton = enjeu majeur pour l'industrie de la construction
- Utilisation de granulats de béton recyclé (GBR) limitée (performances mécaniques et durabilité ↓)
- Potentielle réaction alcali-silice (RAS) secondaire dans le nouveau béton
- Mais RAS secondaire complexe car nombreux facteurs:
 - Réactivité des granulats d'origine
 - Degré d'expansion de la RAS primaire
 - Procédure de production des GBR
 - Exposition de nouvelles faces

- Quantité importante d'additions minérales pour empêcher la RAS dans le cas de GBR réactifs (*Zhu et al. 2021, Thomas et al. 2019*)
- Plusieurs méthodes pour améliorer les performances des GBR, notamment la carbonatation
- Formation de CaCO_3 lors de la carbonatation, d'où
 - ↓ absorption d'eau et propriétés de transport
 - ↓ pH et quantité d'hydroxides alcalins } → Formation de gel expansif empêchée



Matériaux

- Ciment Portland (CEM I 52.5 N – 0,68% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$)
 - Tests de réactivité (confection des échantillons de mortier)
 - Fabrication des GBR au laboratoire
- 3 types de granulats:
 - Granulats naturels réactifs
 - GBR industriels
 - GBR potentiellement réactifs fabriqués au laboratoire

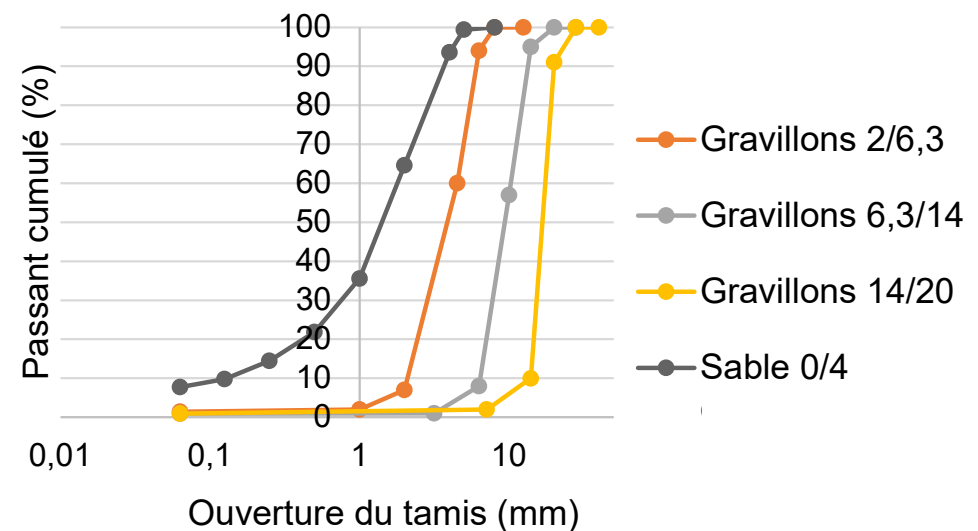
Granulat naturel réactif

- Concassé calcaire siliceux du Tournaisis

- Caractéristiques:

	Masse volumique réelle (kg/m ³)	WAI ₂₄ (%)
Sable (0/4)	2677	0,3
Gravillons (2/7 - 7/14 - 14/20)	2660	0,5

- Potentiellement réactifs
- Utilisés pour la fabrication de GBR 4/20 potentiellement réactifs ET comme référence



GBR industriels

- Provenant d'une entreprise belge de construction
- Mix de déchets de démolition et de restes de béton (max 5% d'impuretés – type A)
- Réutilisé par l'entreprise, après concassage et criblage
- Au laboratoire: tamisage à sec pour récupérer la fraction 4/20 mm

• Caractéristiques:

	Masse volumique réelle (kg/m ³)	WAI ₂₄ (%)
GBR industriels 4/20 mm	2320	5,37

- A priori, réactivité aux alcalins non problématique

GBR potentiellement réactifs fabriqués au laboratoire

- Fabrication du béton d'origine (BO)

		Dopé (kg/m ³)	Non dopé (kg/m ³)
Ciment CEM I 52,5		395	395
NaOH		3	-
Eau		204	207
Sable naturel réactif 0/4		657	657
Granulats naturels réactifs	2/6,3	173	173
	6,3/14	423	423
	14/20	518	518
Plastifiant RHEOBUILD 1100 Con.30%		1	1

1,25% Na₂O_{éq}
(NF P18-594)

Eprouvettes 7x7x28 cm³

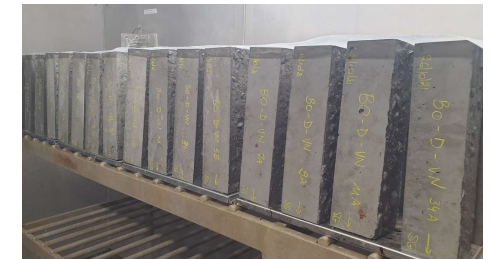
E/C = 0,52

S2/F2

Rc (28j) = 46 MPa

- Vieillessement du BO

En chambre climatique: 100% HR - 20°C et 38°C

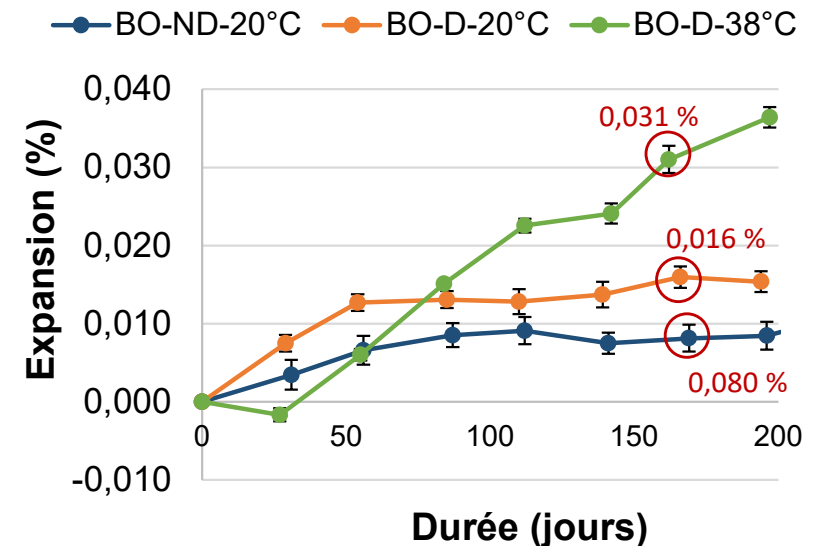


GBR potentiellement réactifs fabriqués au laboratoire

- Concassage du BO fabriqué au labo

- Âge: +/- 6 mois
- ≠ degrés d'avancement de la RAS
- Fendage à la presse hydraulique
- Concasseur à mâchoires (3x)
- Criblage

⇒ Obtention de granulats 4/20 mm



	Teneur en alcalis (% Na ₂ O _{eq})	Température de stockage (°C)	Expansion après 6 mois (%)	GBR obtenus
BO-ND-20°C	0,68	20	0,080	GBR-T-ND-20°C
BO-D-20°C	1,25	20	0,016	GBR-T-D-20°C
BO-D-38°C	1,25	38	0,031	GBR-T-D-38°C

Caractérisation des granulats recyclés

- Absorption d'eau et masse volumique: EN 1097-6
 - Granulats saturés dans l'eau (24h)
 - Détection de l'état saturé surface sèche en utilisant un courant d'air chaud et un cône
- Teneur en pâte de ciment
Dissolution par acide salicylique (*Z. Zhao, 2013*)

Carbonatation des granulats

- Matériel: 2 incubateurs étanches
- Conditions:
 - Essai statique
 - Pression atmosphérique
 - $[\text{CO}_2] = 20\%$
 - $T^\circ = 39^\circ\text{C}$
 - 60% HR
 - 11 jours
- Préparation avant essai (\rightarrow masse constante)
- Appliqué à la fraction 4/20 mm, disposée en couches de 25 mm



Carbonatation des granulats - évaluation

- Prise de masse (%) =
$$\frac{\text{masse finale} + \text{masse perte d'eau} - \text{masse initiale}}{\text{masse initiale}}$$
- Analyse thermogravimétrique
 - Analyseur thermique NETZSCH STA 449C
 - Montée en t° de 20 à 1000°C à 10°C/min, balayage à l'azote
 - Difficultés:
 - Overlap entre pics des C-S-H et de l'ettringite
 - Décarbonatation du CaCO₃ < granulats calcaires

→ Considération de la quantité de Portlandite:

$$\% \text{Ca(OH)}_2 = \Delta \text{Ca(OH)}_2 \text{ (ATG)} \times \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Essai de réactivité sur mortier (NF P18-594)

- Essai de screening, rapide
- Mesure des variations de longueur avant et après cure en autoclave

$$\varepsilon_i (\%) = \frac{L_{1i} - L_{0i}}{L_0} \quad \text{avec } L_0 = 140 \text{ mm}$$

- Limite d'expansion = 0,15%

Dimensions	40 x 40 x 160 mm ³
Traitement initial	24h à HR = 90% - 20°C + 24h dans l'eau à 20°C
Conservation	Traitement à l'autoclave (5h à 127°C et 1,5 bars)
Granulats	0,16/5 mm
Durée totale	4j

Rapport C/G	0,5	1,25
Sable (g)	1200	720
Ciment CEM I 52,5 (g)	600	900
Eau de gâchage sodée (ml)	300	450

4% Na₂O_{éq} par rapport
à la masse de ciment

Concassage du GBR 4/20 mm

- Concasseur à mâchoires (1x)
- Criblage

⇒ Obtention de sable 0,16/5 mm suivant la distribution imposée



Particularités liées au GBR

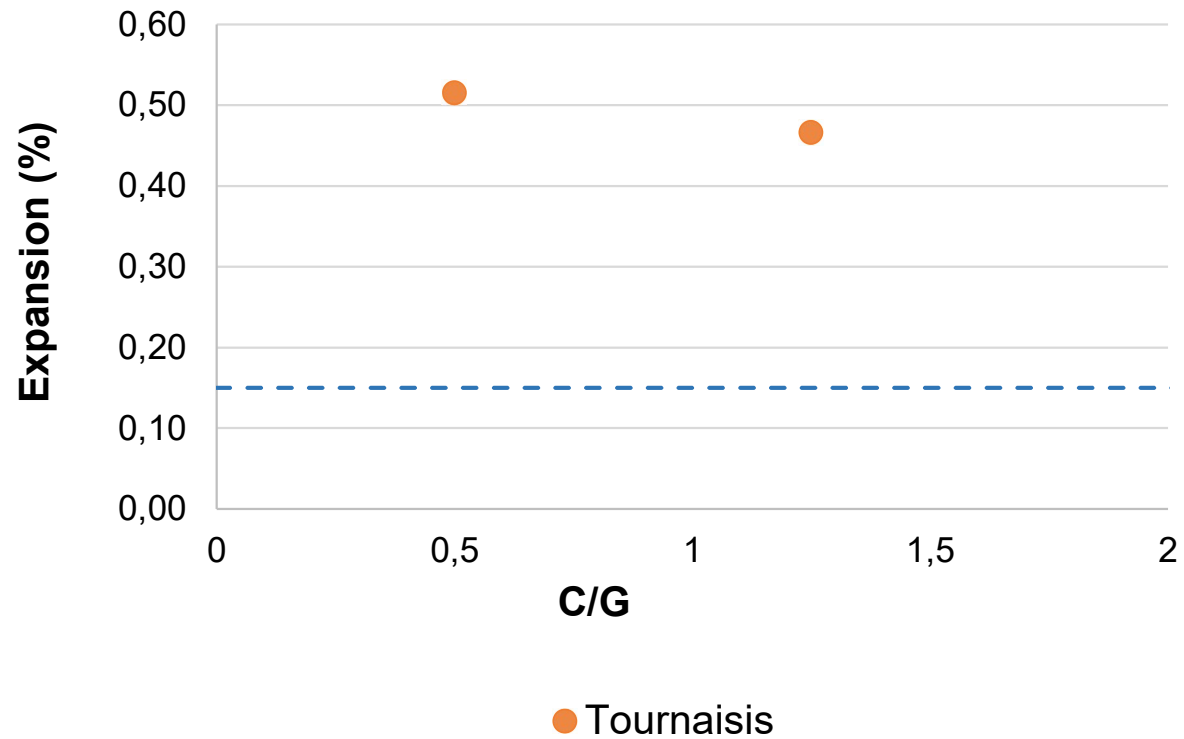
- Absorption d'eau → pré-saturation (*PN Recybéton, 2015*)
- Lixiviation des alcalis → lavage léger (*Adams, 2012*) + 1 lavage intensif
- GBR re-concassés + finement → modifications des propriétés chimiques et physiques → minimisation des pertes
- Dopage des GBR fabriqués au laboratoire → pris en compte

Caractérisation des sables – influence de la carbonatation

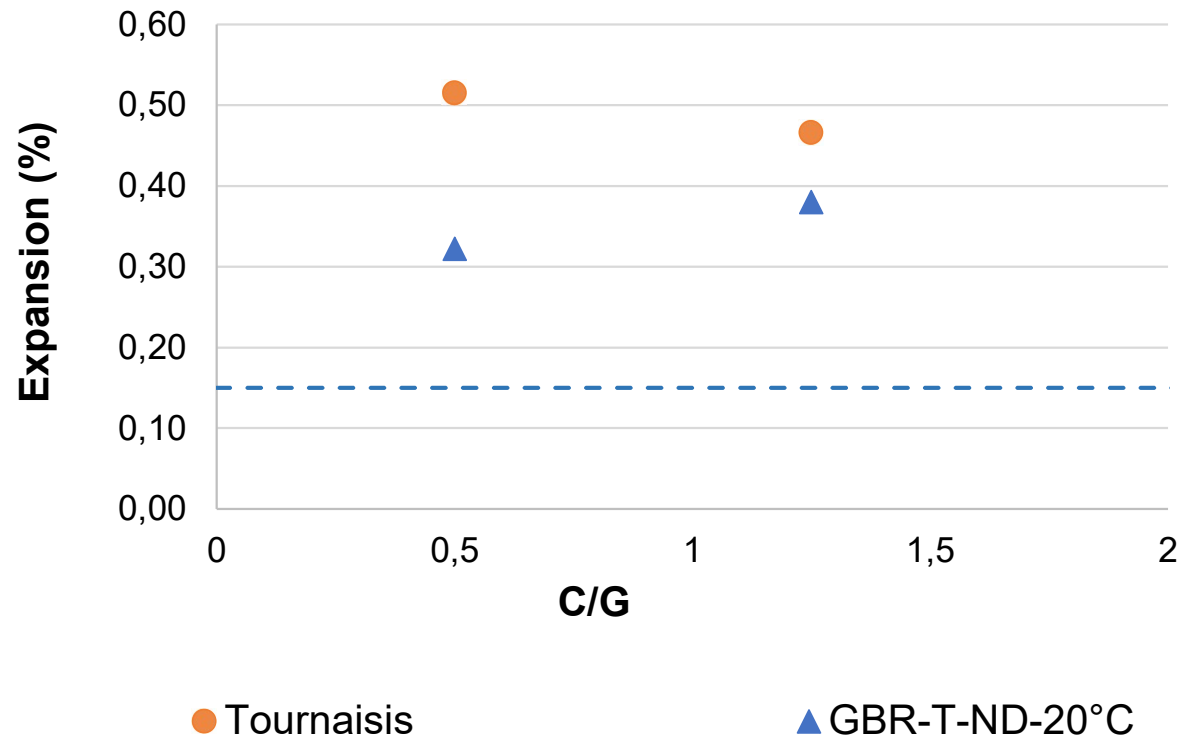
Type de granulats concassés	Pré-traitement des GBR	WAI ₂₄ (%)	% variation WAI ₂₄ (%)	Masse vol. réelle (kg/m ³)	% variation masse vol. réelle (%)	Teneur en pâte de ciment (%)	% variation teneur en pâte de ciment (%)	Gain de masse (%)	Teneur en Portlandite (%)
GBR-T-ND-20°C	NC	5,28		2500		9,03			1,80
	C	5,61	6,25	2455	-1,8	8,81	-2,4	0,91	0,98
GBR-T-D-20°C	NC	5,47		2470		8,78			2,05
	C	5,06	-7,5	2503	1,3	5,35	-39	1,18	*
GBR-T-D-38°C	NC	6,91		2415		13,70			2,65
	C	5,21	-20,3	2478	2,6	6,99	-49,0	1,66	*
GBR-Industriels	NC	5,11		2489		6,98			0,41
	C	4,95	-3,1	2485	0,2	6,09	-12,7	0,32	*

* Indélectable

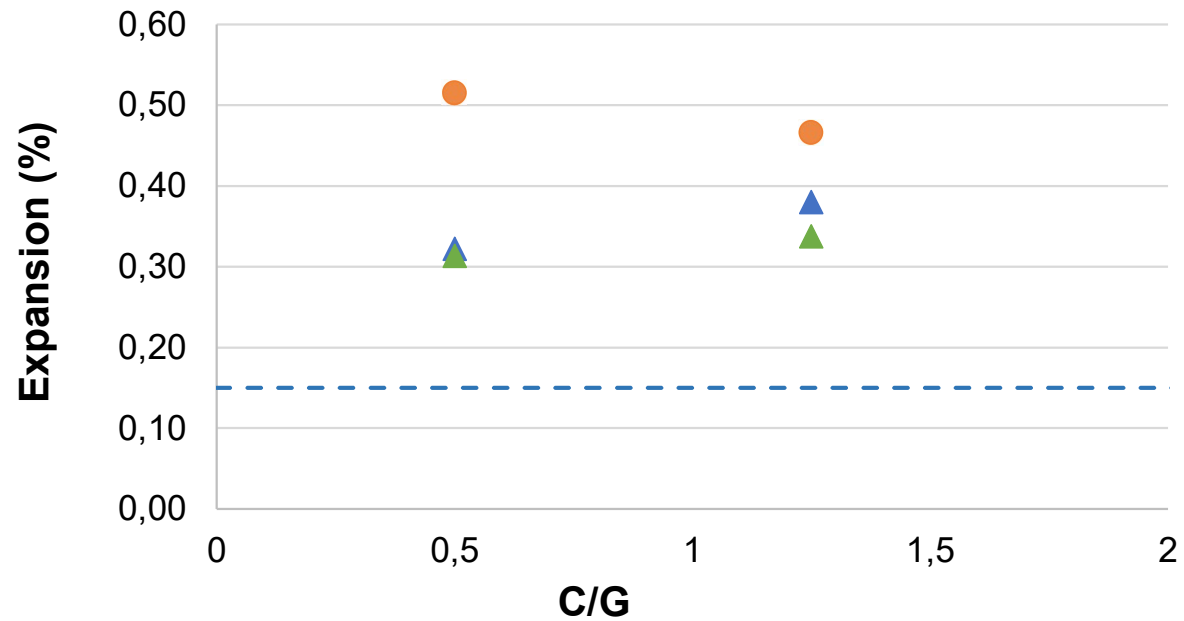
Essais de réactivité sur mortiers (NF P18-594)



Essais de réactivité sur mortiers (NF P18-594)



Essais de réactivité sur mortiers (NF P18-594)

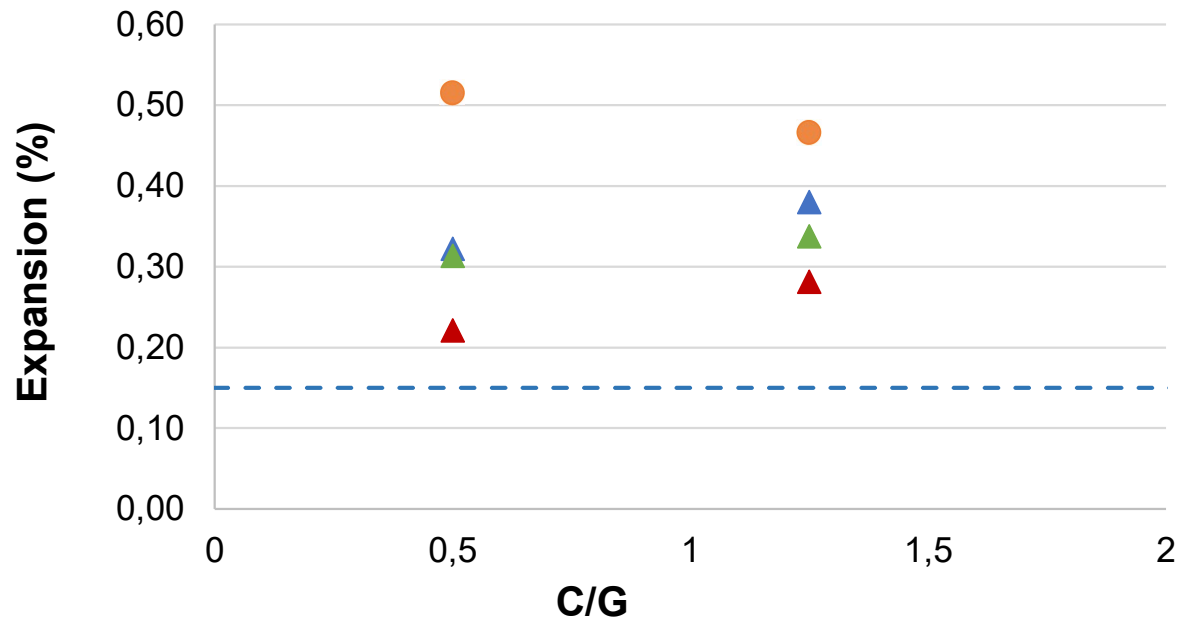


● Tournaisis

▲ GBR-T-ND-20°C

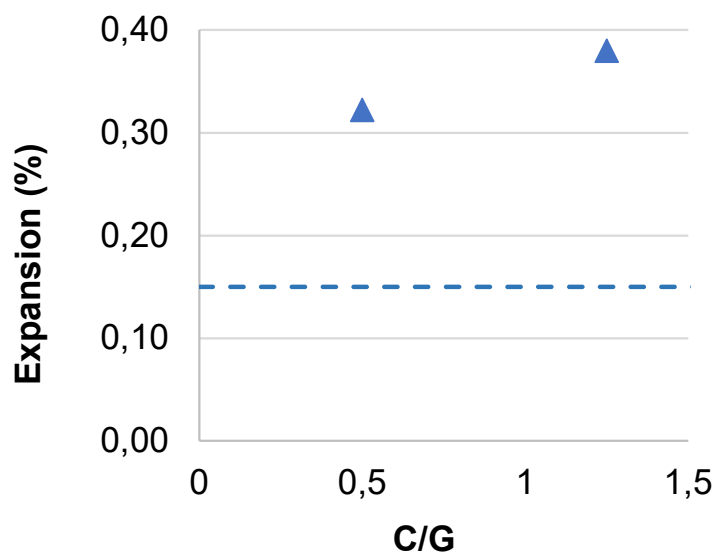
▲ GBR-T-ND-20°C - lavé

Essais de réactivité sur mortiers (NF P18-594)

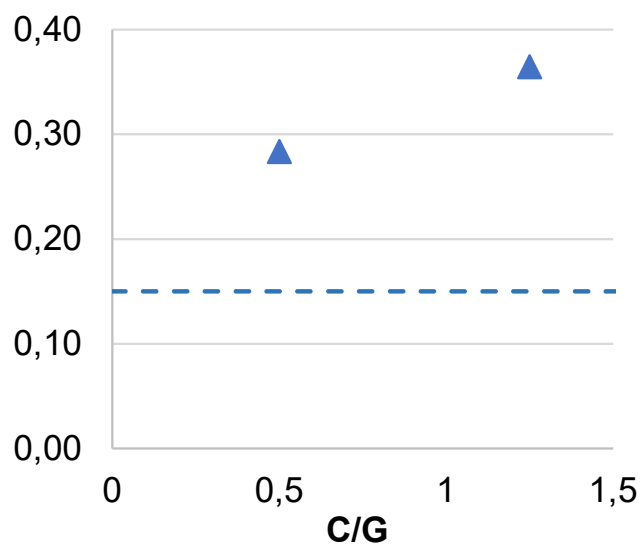


● Tournaisis ▲ GBR-T-ND-20°C ▲ GBR-T-ND-20°C - lavé ▲ GBR-T-ND-20°C - C

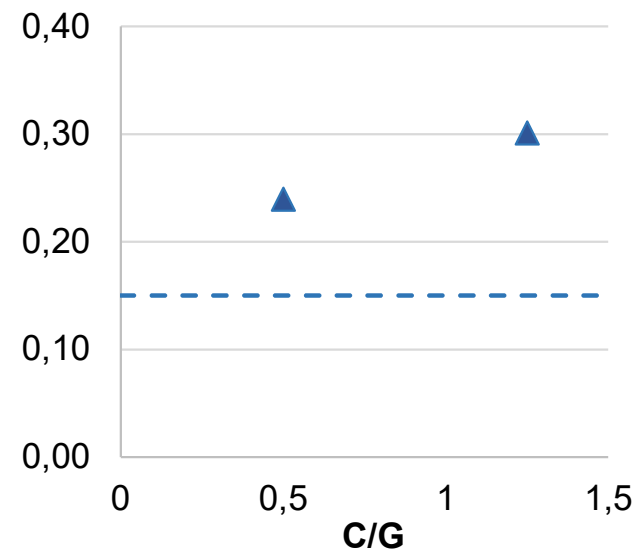
Essais de réactivité sur mortiers (NF P18-594)



▲ GBR-T-ND-20°C



▲ GBR-T-D-20°C



▲ GBR-T-D-38°C

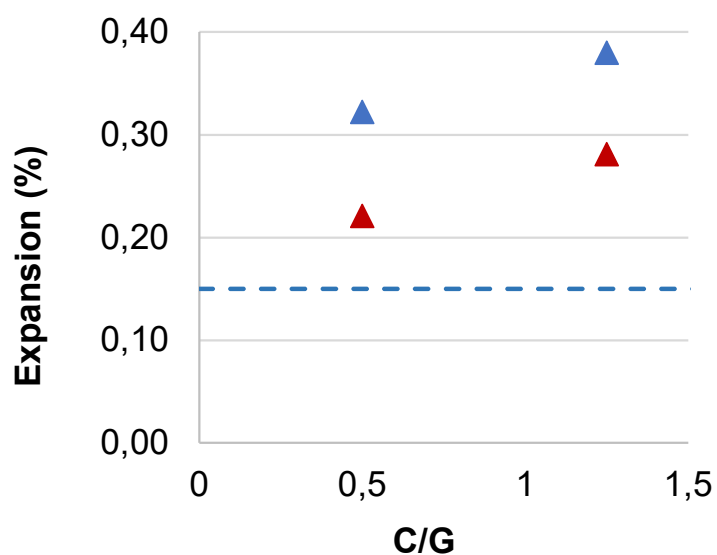
Expansion du
béton d'origine

0,008 %

0,016 %

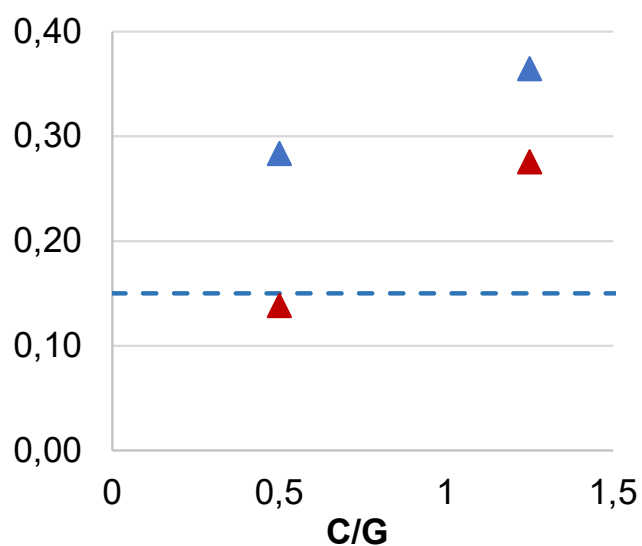
0,031 %

Essais de réactivité sur mortiers (NF P18-594)



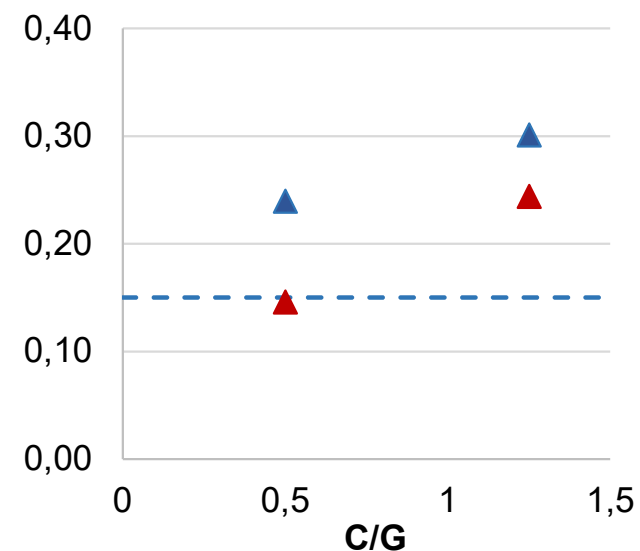
▲ GBR-T-ND-20°C ▲ GBR-T-ND-20°C - C

Expansion du
béton d'origine 0,008 %



▲ GBR-T-D-20°C ▲ GBR-T-D-20°C-C

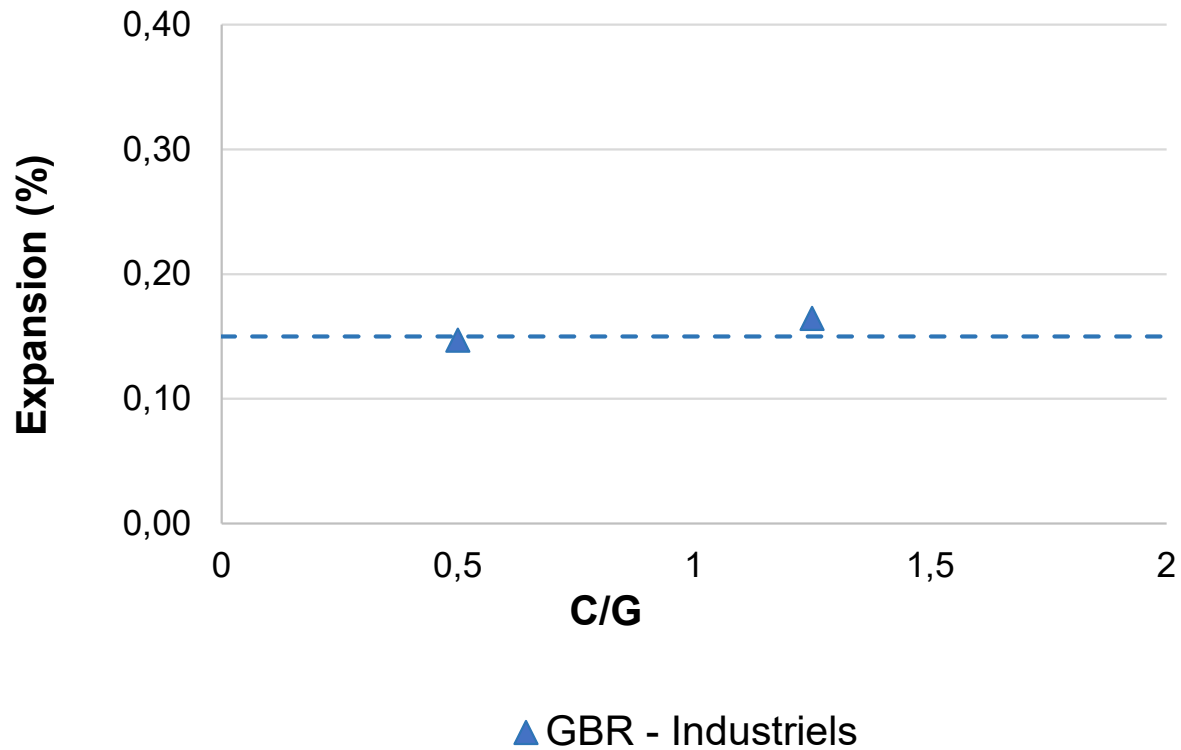
0,016 %



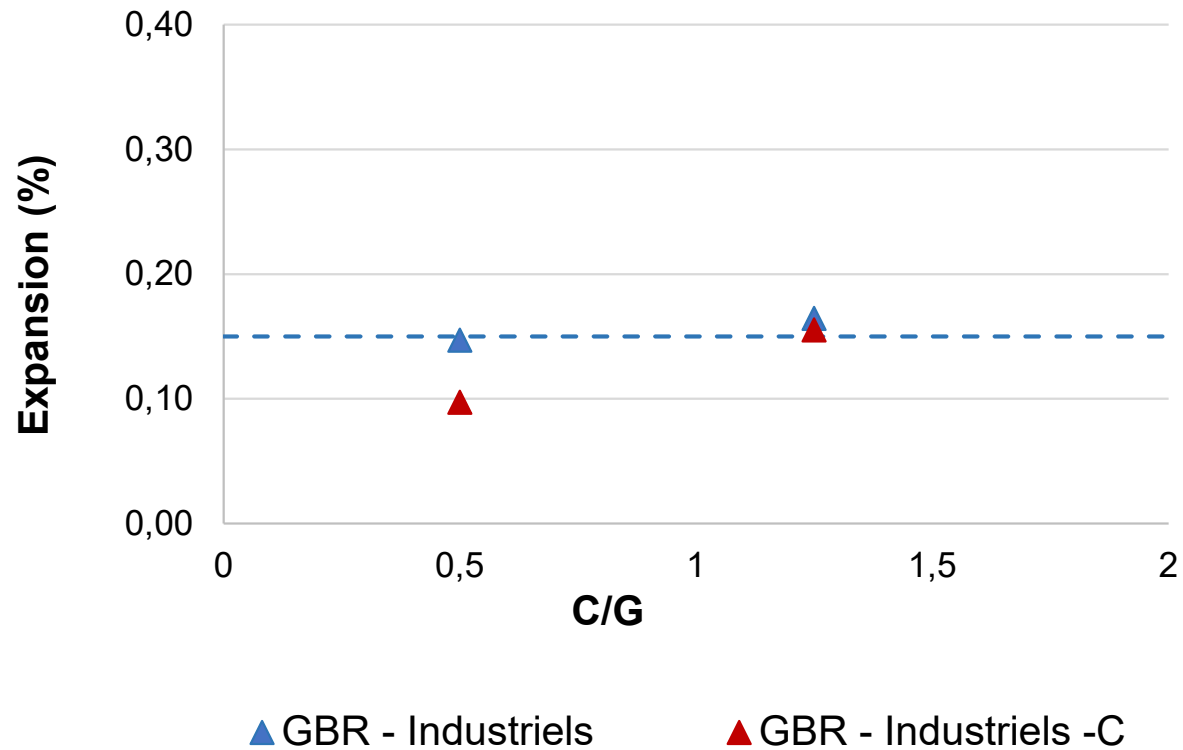
▲ GBR-T-D-38°C ▲ GBR-T-D-38°C-C

0,031 %

Essais de réactivité sur mortier (NF P18-594)



Essais de réactivité sur mortier (NF P18-594)



- Expansion des GBR $<$ GN d'origine, mais $>$ 0,15% (avec effet pessimum)
- Degré d'avancement élevé de la RAS primaire entraîne un gonflement secondaire + faible
- GBR – Industriels classés PR-EP (à la limite)
- Lavage des GBR peu efficace
- Gonflement des GBR réactifs significativement réduit par la carbonatation, mais pas suffisant → à combiner avec additions minérales
- Essais sur béton à réaliser pour confirmer les résultats obtenus.

Merci pour votre attention!