



**HAL**  
open science

## Projet National FastCarb – Propriétés de bétons contenant des granulats de béton recyclés carbonatés

Thomas Pernin, Laetitia Robbiano, Amor Ben Fraj, Harifidy Ranaivomanana, Fanny Geffray, Gabriel Pham, Xavier Guillot, Ouali Amiri, Jonathan Mai-Nhu, Patrick Rougeau

### ► To cite this version:

Thomas Pernin, Laetitia Robbiano, Amor Ben Fraj, Harifidy Ranaivomanana, Fanny Geffray, et al..  
Projet National FastCarb – Propriétés de bétons contenant des granulats de béton recyclés carbonatés.  
Academic Journal of Civil Engineering, 2022, Fastcarb 2022, 40 (3), pp.93-104. 10.26168/ajce.40.3.8 .  
hal-04603957

**HAL Id: hal-04603957**

**<https://hal.science/hal-04603957v1>**

Submitted on 7 Jun 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

# Projet National FastCarb – Propriétés des bétons contenant des granulats de béton recyclés carbonatés

Thomas Pernin<sup>1</sup>, Laetitia Robbiano<sup>2</sup>, Amor Ben Fraj<sup>3</sup>, Harifidy Ranaivomanana<sup>4</sup>, Gabriel Pham<sup>5</sup>, Fanny Geffray<sup>6</sup>, Xavier Guillot<sup>5</sup>, Ouali Amiri<sup>4</sup>, Jonathan Mai-Nhu<sup>1</sup>, Patrick Rougeau<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cerib, 1 Rue des Longs Réages, 28233 epernon, France

<sup>2</sup> Cemex France, 18 Rue du Verseau, 94150 Rungis, France

<sup>3</sup> Cerema, Univ Gustave Eiffel, UMR MCD, F-77171 Sourdun, France

<sup>4</sup> Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44600 Saint-Nazaire, France

<sup>5</sup> Holcim, 14-16 Boulevard Garibaldi, 92130 Issy-les-Moulineaux, France

<sup>6</sup> SigmaBéton, 4 Rue Aristide Bergès, 38080 L'Isle d'Abeau, France

**RESUME** Les travaux menés dans le cadre du projet national FastCarb ont porté notamment sur l'influence de l'utilisation des granulats recyclés carbonatés sur la fabrication des bétons, leur microstructure et leurs propriétés d'usage (comportement à l'état frais, résistance mécanique, durabilité). Les résultats montrent que les granulats recyclés carbonatés ont un comportement très similaire à celui des granulats recyclés non carbonatés. Les granulats recyclés carbonatés peuvent être utilisés dans les bétons selon les mêmes règles de l'art que celles définies dans les textes normatifs actuels (NF EN 206/CN notamment), elles-mêmes issues des recommandations du projet national RECYBETON.

**Mots-clefs** Béton, Recyclage, Granulats recyclés carbonatés, Durabilité.

## I. INTRODUCTION

Afin de limiter l'impact environnemental des bétons et de favoriser le recyclage et l'économie circulaire dans le domaine de la construction, de nombreuses recherches se sont ouvertes sur ces thématiques, dont la carbonatation des granulats de béton recyclé fait partie. Les études ont montré que ce procédé pouvait améliorer significativement les propriétés des granulats recyclés, pouvant potentiellement faciliter leur usage dans les bétons [1-3].

Au-delà d'une approche uniquement laboratoire, le Projet National Fastcarb s'est construit sur deux volets, l'un amont en laboratoire, sur la compréhension et l'optimisation du procédé de carbonatation et l'autre orienté vers l'aval. Les objectifs de la partie aval, sont de concevoir et de mettre en œuvre un procédé de carbonatation accélérée à échelle préindustrielle, puis de vérifier que les bétons fabriqués à l'aide des granulats carbonatés conservent les mêmes niveaux de performance. Dans un premier temps, des bétons C25/30 et C45/55 ont été réalisés en laboratoire

avec les granulats traités (sable et gravillon) selon les process de carbonatation développés dans deux cimenteries : Val d’Azergues et Créchy.

Des essais comparatifs ont été menés sur les granulats recyclés carbonatés et non carbonatés, pour différents taux d’incorporation. L’objectif de l’étude est de mesurer l’impact de la carbonatation des granulats recyclés sur les principales propriétés des bétons : comportement à l’état frais, performances mécaniques et durabilité. Concernant la durabilité, il s’agit de statuer sur l’influence éventuelle de la carbonatation des granulats sur les propriétés de transfert intervenant dans les phénomènes de corrosion des armatures de béton armé.

Dans un deuxième temps, l’impact de l’incorporation des granulats recyclés carbonatés sur les propriétés des bétons à l’échelle 1 a été étudié. Différents produits préfabriqués (blocs, bordures, escaliers) et des parties d’ouvrages coulées in-situ (voiles structurels) ont été réalisés. L’objectif est de vérifier la faisabilité d’utiliser en situation réelle ces granulats et de préciser les éventuelles différences de comportement avec les granulats recyclés non carbonatés.

## II. PRODUCTION DES BETONS CONTENANT DES GRANULATS DE BETON RECYCLES CARBONATES ET METHODES DE CARACTERISATION

### A. Constituants

Dans le cadre du projet national FastCarb, quatorze compositions de béton ont été définies pour l’étude de l’impact de la carbonatation des granulats sur les propriétés mécaniques et de durabilité. Les constituants employés sont les suivants :

- Ciment : CEM II/A-LL 42,5 R CE CP2 NF – Usine de Val d’Azergues (Lafarge Holcim)
- Adjuvants : Superplasiifiant : Isoflow 857, Extenseur de rhéologie : Isoflow 7230 (Cemex admixtures)
- Granulats Naturels :
  - 0/4 SCL Saint-Bonnet (LafargeHolcim) (NS dans la nomenclature béton) ;
  - 4/11 SCL Saint-Bonnet (LafargeHolcim) (NG dans la nomenclature béton) ;
  - 11/22 SCL Saint-Bonnet (LafargeHolcim) (NG dans la nomenclature béton).
- Granulats Recyclés :
  - 0/4 concassé Saint-Fons dépôt (LafargeHolcim) (RS dans la nomenclature béton) ;
  - 4/16 concassé Saint-Fons dépôt (LafargeHolcim) (RG dans la nomenclature béton) ;
- Granulats Recyclés Carbonatés 1 : Process Val d’Azergues (LafargeHolcim) – Lit fluidisé.
  - 0/4 concassé carbonaté à Val d’Azergues (CRS1 dans la nomenclature béton) ;
  - 4/16 concassé carbonaté à Val d’Azergues (CRG1 dans la nomenclature béton).
- Granulats Recyclés Carbonatés 2 : Créchy (Vicat) – Tambour tournant
  - 0/4 concassé carbonaté à Créchy (CRS2 dans la nomenclature béton) ;
  - 4/16 concassé carbonaté à Créchy (CRG2 dans la nomenclature béton).

### B. Bétons étudiés dans le projet national FastCarb

Quatorze bétons ont été formulés de manière à distinguer deux familles de bétons à étudier, comprenant chacune sept compositions différentes selon leur squelette granulaire et le taux de substitution volumique retenu :

- Une famille C25/30, avec des substitutions allant de 20% à 40% en sable et de 50% à 100% en gravillons ;
- Une famille C45/55, avec substitution uniquement du gravillon, de 50% à 100%.

Les dosages en liant et les rapports  $E_{eff}/Liant_{eq}$  des bétons répondent aux exigences des classes d'exposition XC4/XF1 (tableau NA.F.1) de la norme NF EN 206/CN.

A l'exception des granulats, les 14 bétons sont analogues du point de vue des autres constituants (même ciment de type CEM II/A, addition calcaire, eau efficace). L'adjuvant a nécessité un recalage du dosage à chaque formulation pour tenir les objectifs d'ouvrabilité malgré la variabilité de l'absorption d'eau des granulats recyclés.

Les consistances visées ont été les mêmes pour l'ensemble des bétons : S4.

Les caractéristiques des compositions sont données dans les tableaux 1 pour les C25/30 et 2 pour les C45/55 ci-dessous.

**Tableau 1. Composition des 7 bétons C25/30 (proportions massiques)**

Composition	Formule C25/30						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
0/4 SAINT BONNET DE MURE	844	571	607	592	411	444	420
0/4 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Non carbonaté	-	143	-	-	274	-	-
0/4 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté LH	-	-	152	-	-	296	-
0/4 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté Vicat	-	-	-	148	-	-	280
4/11.2 SAINT BONNET DE MURE	213	107	106	106	-	-	-
11.2/22.4 SAINT BONNET DE MURE	731	363	358	358	-	-	-
4/16 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Non carbonaté	-	471	-	-	870	-	-
4/16 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté LH	-	-	464	-	-	882	-
4/16 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté Vicat	-	-	-	464	-	-	873
CEM II/A-LL 42,5R VAL D'AZERGUES	320	320	320	320	320	320	320
Isoflow 857	0,15%	-	-	-	-	-	-
Isoflow 7230	0,60%	1,20%	0,65%	0,65%	1,20%	0,90%	0,90%
Chryso CHR	-	0,40%	0,40%	0,40%	0,50%	0,50%	0,50%
G/S	1,12	1,32	1,22	1,25	1,27	1,19	1,25
Eau efficace	177	177	177	177	177	177	177
Eau efficace/Ciment	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55

**Tableau 2. Compositions des 7 bétons C45/55 (proportions massiques)**

Composition	Formule C45/55						
	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
0/4 SAINT BONNET DE MURE	748	710	708	708	712	712	712
0/4 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Non carbonaté	-	-	-	-	-	-	-
0/4 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté LH	-	-	-	-	-	-	-
0/4 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté Vicat	-	-	-	-	-	-	-
4/11.2 SAINT BONNET DE MURE	206	94	94	94	-	-	-
11.2/22.4 SAINT BONNET DE MURE	776	380	379	379	-	-	-
4/16 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Non carbonaté	-	473	-	-	877	-	-
4/16 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté LH	-	-	478	-	-	877	-
4/16 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté Vicat	-	-	-	469	-	-	877
CEM II/A-LL 42,5R VAL D'AZERGUES	450	450	450	450	450	450	450
Isoflow 857	0,40%	0,40%	0,50%	0,70%	0,95%	0,90%	0,85%
Isoflow 7230	0,40%	0,60%	0,40%	0,40%	0,60%	0,60%	0,60%
G/S	1,31	1,33	1,34	1,33	1,23	1,23	1,23
Eau efficace	165	165	165	165	165	165	165
Eau efficace/Ciment	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37

Les quatorze bétons ainsi formulés ont reçu une dénomination suivant les taux de substitution pratiqués, à retrouver en Tableau 3 pour l'interprétation des résultats.

**Tableau 3. Taux de substitution pour les 14 formulations de béton**

		Sable				Gravier			
		NS (%)	RS (%)	CRS1 (%)	CRS2 (%)	NG (%)	RG (%)	CRG1 (%)	CRG2 (%)
C25/30	B1_C25_100NS-100NG	100				100			
	B2_C25_20RS-50RG	80	20			50	50		
	B3_C25_20CRS1-50CRG1	80		20		50		50	
	B4_C25_20CRS2-50CRG2	80			20	50			50
	B5_C25_40RS-100RG	60	40				100		
	B6_C25_40CRS1-100CRG1	60		40				100	
	B7_C25_40CRS2-100CRG2	60			40				100
C45/55	B8_C45_100NS-100NG	100				100			
	B9_C45_100NS-50RG	100				50	50		
	B10_C45_100NS-50CRG1	100				50		50	
	B11_C45_100NS-50CRG2	100				50			50
	B12_C45_100NS-100RG	100					100		
	B13_C45_100NS-100CRG1	100						100	
	B14_C45_100NS-100CRG2	100							100

### C. Protocoles et essais

- Contrôle des constituants à réception

Les principaux paramètres à vérifier pour les granulats recyclés carbonatés sont, comme pour les granulats recyclés non carbonatés, le coefficient d'absorption, la régularité granulométrique et la teneur en sulfates solubles.

Pour la préparation des matériaux, la méthodologie décrite dans le § 12.3.1.1.1 de l'ouvrage de synthèse du projet national Recybéton [3] a été utilisée pour la pré-saturation en eau et l'homogénéisation des GBR et GBRC avant malaxage.

- Fabrication des bétons

Chaque formule a été réalisée en deux gâchées.

Pour les 14 bétons, les propriétés à l'état frais mesurées sont les suivantes :

- Air occlus à l'aéromètre béton (NF EN 12350-7) mesurée à T5 ( $T_0 + 5$  min) ;
- Masse volumique (NF EN 12350-6) mesurée à T5 ;
- Affaissement au cône d'Abrams (NF EN 12350-2) mesurée à T15, T30, T60 et T90.

Pour les essais mécaniques, la caractérisation des résistances en compression (NF EN 12390-3), en fendage (NF EN 12390-6) et le module Young (NF EN 12390-13) est réalisée sur une presse 4000 KN de classe 1.

Les corps d'épreuves ont été conservés dans une salle humide à  $20 \pm 2$  °C et une humidité relative supérieure à 95 % jusqu'à l'envoi aux laboratoires réalisant les essais de durabilité.

Les essais de durabilité ont été réalisés selon les protocoles suivants, principalement tirés des évolutions apportées par le Projet National Perfdub [4] :

- Mesure de la porosité accessible à l'eau (NF P 18-459) ;
- Essai d'absorption d'eau par capillarité (MO Perfdub) ;
- Essai de migration des ions chlorures (NF P18-462) ;
- Essais de carbonatation naturelle et accélérée (MO Perfdub) ;
- Mesure de perméabilité au gaz (MO Perfdub).

Les essais ont été réalisés aux échéances 90+/- 7 jours également à 6 et 12 mois pour la carbonatation naturelle.

### III. PROPRIETES DES BETONS DE GRANULATS RECYCLES CARBONATES

#### A. Propriété à l'état frais

Comme pour les granulats recyclés non carbonatés, le maintien de l'affaissement dans le temps reste un paramètre à surveiller avec des granulats de béton recyclés carbonatés (GBRC).

Les raidissements les plus importants ont été observés pour les bétons de classe C45/55, plus sensibles aux écarts d'eau et donc à la variabilité de l'absorption d'eau des granulats recyclés, carbonatés ou non (Fig. 1 et Fig. 2).

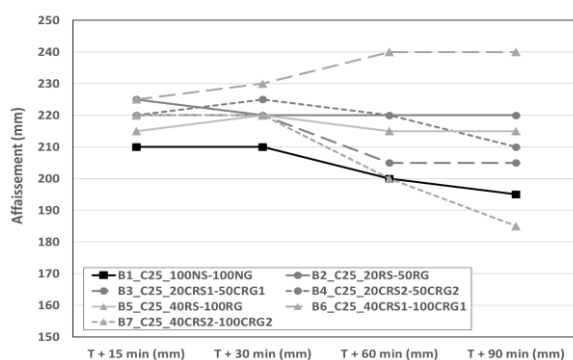


Figure 1. Affaissements mesurés pour les bétons C25/30

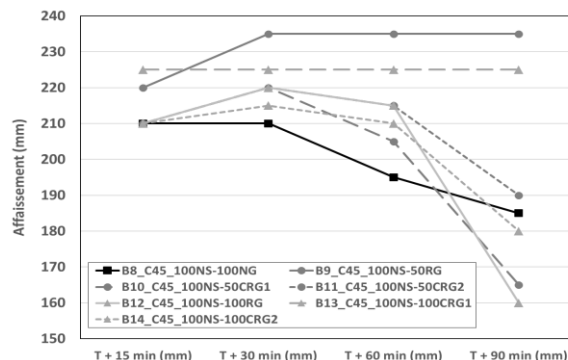


Figure 2. Affaissements mesurés pour les bétons C45/55

**Tableau 4. Mesure de masses volumiques et air occlus**

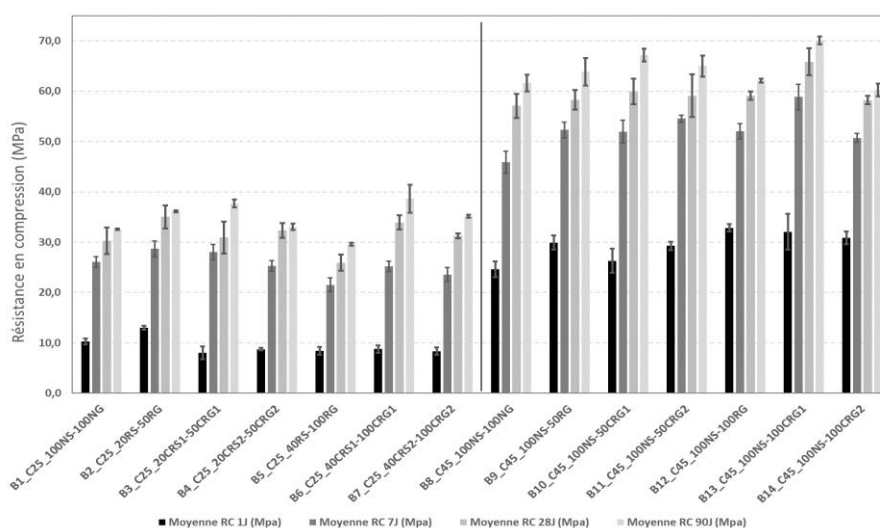
	Masse Volumique à T30 (kg/m <sup>3</sup> )	Air occlus à T30 (%)
B1	2320	4,1
B2	2 240	3,9
B3	2180	6,8
B4	2230	5,7
B5	2060	9,8
B6	2110	6,7
B7	2150	4,5
B8	2393	2,1
B9	2 322	2,1
B10	2340	2,1
B11	2340	2,2
B12	2312	2,6
B13	2327	2,9
B14	2302	3,0

Le choix du plastifiant ainsi qu'un travail sur son dosage permet d'obtenir des maintiens de l'affaissement tout à fait satisfaisants, même pour de longues durées (jusqu'à 90 min pour les essais en laboratoire). La carbonatation des granulats recyclés ne modifie pas la sensibilité du béton vis-à-vis de l'adjuvantation.

Concernant la teneur en air occlus (Tableau 4), il n'a pas été observé d'effets significatifs des GBRC comparativement aux GR, malgré des teneurs parfois élevées pour les C25/30.

### B. Propriétés mécaniques

Pour une classe de résistance à la compression à 28 jours donnée, le béton de GBRC diffère peu du béton GR sur la majorité des résultats de compression (Fig. 3). Pour de faibles taux de substitution (jusqu'à 20% en sable et 50% en gravier), les effets de l'introduction de GR ou GBRC sur les autres propriétés des bétons sont mineurs.

**Figure 3. Mesures de résistance en compression sur les 14 bétons**

L'évolution de la résistance en compression en fonction du temps mène à la même classe de résistance du béton que celle obtenue avec un squelette de granulats naturels ou recyclés non carbonatés. L'interprétation de ces résultats est toutefois à relativiser compte tenu du fait que la granulométrie des gravillons n'est pas strictement la même entre les granulats recyclés carbonatés et non carbonatés, ceci pour des raisons liées au déroulement du Projet National Fastcarb.

Ces résultats sont en-deçà de ce qu'indique la littérature, où une amélioration sensible des propriétés mécaniques a pu être observée dans certaines études récentes [6-8] sur l'emploi de granulats recyclés carbonatés. Ces études emploient cependant des granulats recyclés carbonatés issus de processus de carbonatation très différents de l'approche industrielle du PN Fastcarb.

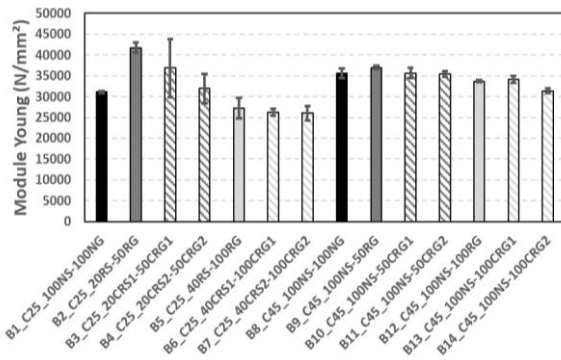


Figure 4. Module d'Young des 14 bétons étudiés

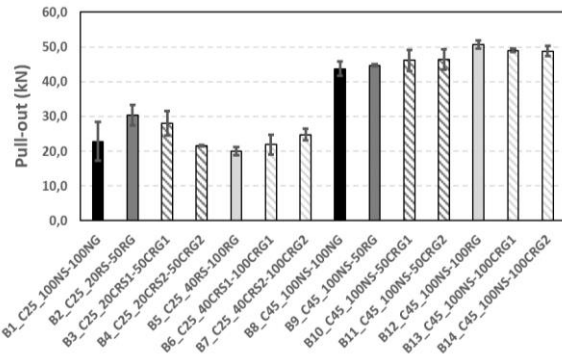


Figure 5. Essai de Pull-Out pour les 14 bétons

Le module d'élasticité (Figure 4) au même âge n'apparaît pas impacté significativement par l'usage de GBRC par rapport aux granulats GR. A noter toutefois, la mesure du béton B2 semble élevée par rapport au béton de granulats naturels.

En figure 5, les résultats d'essai de Pull-Out varient en fonction de la classe de résistance du béton. Le taux de substitution et le processus de carbonatation des granulats recyclés ne semblent pas impacter significativement le comportement des bétons. On ne note pas de tendance systématique significative avec les GRC comparativement aux GR. Il n'y a pas d'effet significatif pour les C45/55. Dans le cas des C25/30, deux tendances opposées sont observées : effet négatif des GRC comparativement aux GR (B2/3/4), effet positif des GRC comparativement aux GR (B5/6/7).

C. Propriétés de durabilité

Les principaux indicateurs de durabilité que sont la porosité accessible à l'eau, la migration des ions chlorures, la perméabilité aux gaz et la vitesse de carbonatation accélérée ne montrent pas d'impacts négatifs ni positifs significatifs liés à l'usage de GBRC comparé à des GR non carbonatés. Les différences par rapport au béton de granulats naturel sont cohérentes avec les conclusions du projet national RECYBETON [4].

Comme illustré en figure 6, le béton présente une porosité plus importante en relation avec le taux de substitution par des GBRC. Cette augmentation est du même ordre de grandeur que celle observée avec l'usage des mêmes granulats non carbonatés.

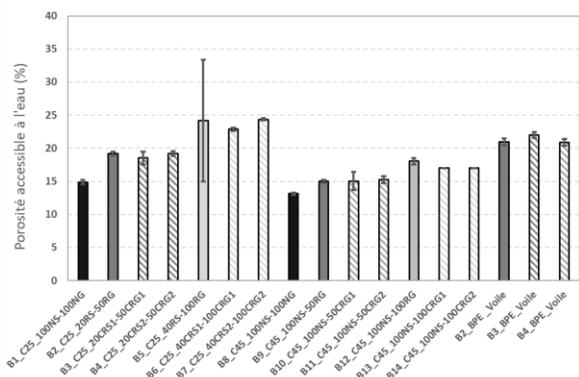


Figure 6. Porosité accessible à l'eau

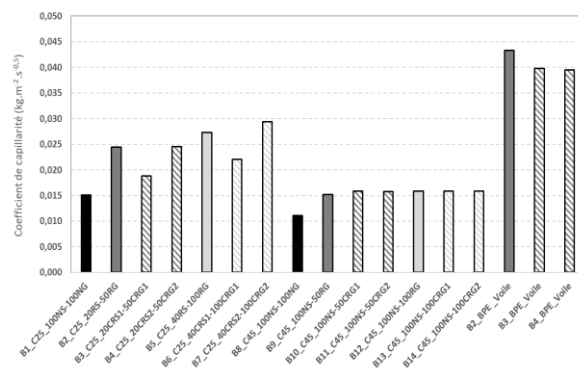


Figure 7. Coefficient de capillarité



En conséquence, les phénomènes de transferts, liquides ou gazeux, sont impactés de la même manière que pour l’usage de GR non carbonatés.

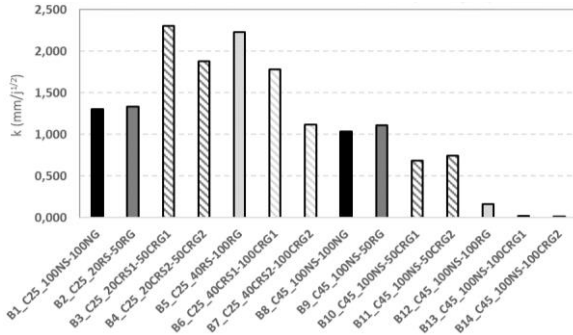


Figure 8. Vitesses de carbonatation accélérée

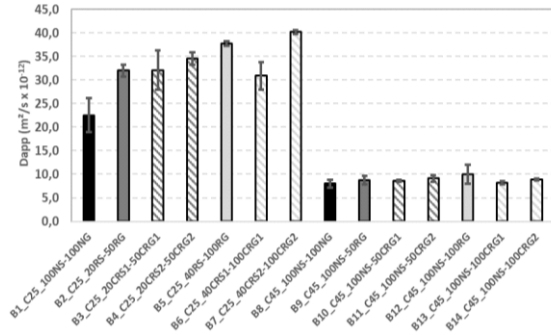


Figure 9. Coefficient de diffusion des ions chlorure

La vitesse de carbonatation n’est pas accélérée, ni diminuée (Fig. 8). S’agissant des risques liés à la corrosion des armatures qui concerne une majorité des applications, l’usage des GBRC est donc envisageable de la même manière qu’avec les GR.

Concernant la diffusivité des ions chlorure, la carbonatation des granulats recyclés n’entraîne pas non plus d’effets notables et systématiques (figure 9). Les bétons réalisés avec des granulats recyclés carbonatés ou non correspondant à la classe de résistance C45/55 présentent des diffusivités équivalentes à un béton constitué de granulats naturels. Ces résultats mettent en avant l’apport d’une plus grande compacité de la matrice cimentaire et confirment la pertinence de réduire le rapport E/L lorsque les taux d’incorporation en granulats recyclés (carbonatés ou non) sont élevés.

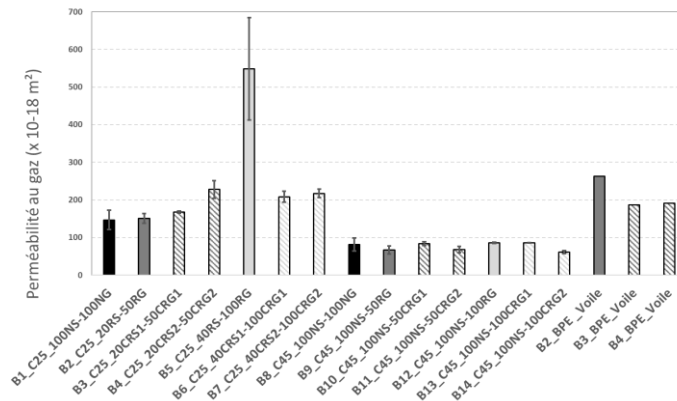


Figure 10. Perméabilité au gaz k<sub>sec</sub> des 14 bétons et des voiles BPE

Cette tendance se retrouve sur les résultats de perméabilité au gaz (k<sub>sec</sub>) présentés en figure 10. Les bétons C45/55 présentent des perméabilités au gaz faibles (inférieures à 100.10<sup>-18</sup> m²) ce qui est vraisemblablement lié à leur matrice cimentaire plus compacte et à l’absence de sable recyclé. Les essais réalisés sur les voiles coulés in-situ conduisent à des résultats du même ordre de grandeur que leur équivalent de laboratoire C25/30.

#### IV. Réalisation de bétons industriels

Quatre types de fabrication en centrale BPE et en usine de produits préfabriqués ont été menés dans le cadre du projet national FASTCARB, dont l'objectif était d'évaluer la faisabilité de l'utilisation des GBRC à l'échelle industrielle :

- Réalisation de voiles BPE sur une centrale à béton Holcim à Tigneux (38) ;
- Fabrication de blocs bétons sur le site industriel Saint-Gobain d'Ancenis (44) ;
- Fabrication de bordures sur le site industriel de Stradal Kilstett (67) ;
- Fabrication d'escaliers sur le site industriel de PBM 71 (71).

Les granulats recyclés carbonatés employés pour ces réalisations sont issus des mêmes lots que ceux employés pour les études laboratoires.

##### A. Réalisation de voiles BPE

Les bétons B2, B3 et B4 issus des travaux en laboratoire ont été utilisés pour la réalisation de voiles en béton pour création de murs séparateurs de cases granulats (Figure 11) sur une centrale à béton à Tigneux (38).



**Figure 11.** Illustration d'un voile coulé avec un béton de GBRC

	B2_Voile BPE	B3_Voile BPE	B4_Voile BPE
Date coulage	21/07/2021	22/07/2021	23/07/2021
Affaissement T15 (mm)	220	230	220
Affaissement T90 (mm)	210	180	190
Masse Volumique T15	2,29	2,27	2,26
Air Occlus T15 (%)	1,7	2,1	1,9
Tbéton T15 (°C)	26	26	27
Text T15 (°C)	22	24	29
Rc28 (MPa)	32,4	35,7	29,6

**Figure 12.** Synthèse des résultats sur béton frais et résistance mécanique

Les principales propriétés investiguées ont été les résistances mécaniques, la rhéologie ainsi que les grandeurs de durabilité (illustrés dans la partie III précédente : porosité à l'eau, carbonatation accélérée, migration des ions chlorures, perméabilité au gaz). Les résultats à l'état frais et de résistance mécanique à la compression présentés en figure 12 montrent un bon comportement du béton pour les trois formulations, même pour des températures extérieures élevées proches de 30°C.

Les résultats de durabilité semblent montrer, figure 6 et figure 7, un impact de la mise en place et de la cure du béton sur la porosité du béton, en particulier à travers l'essai de porosité par capillarité : 0,040 Kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-0,5</sup> pour les voiles BPE en moyenne et 0,024 Kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-0,5</sup> pour les bétons de laboratoire. La carbonatation des granulats recyclés ne semble pas impacter significativement les propriétés du béton.

### B. Fabrication de produits préfabriqués

Différents produits en béton ont été fabriqués avec des GBR carbonatés.

- Fabrication de blocs.

Des blocs béton ont été fabriqués avec un taux de substitution de 50% sur le sable et le gravillon. La production a permis d'obtenir des produits ayant un niveau de résistance mécanique similaire à celui des produits de référence (résistance à la compression sur produit). Concernant la résistance au gel-dégel, les deux formules sont également conformes aux seuils de la norme EN 771-18.

- Fabrication de bordures.

Des bordures de trottoir (de type T2) ont été produites avec deux taux de substitution de sable carbonaté 1 (Holcim) : 50% de substitution et 100%.

Lors de la production, une adaptation très limitée des réglages machines a été nécessaire, notamment la force de pilonnage pour respecter la tolérance dimensionnelle des bordures en raison du foisonnement des formules testées. Le béton a pu être utilisé pour générer des bordures conformes visuellement.

Les substitutions des granulats naturels par des granulats recyclés carbonatés selon des taux de 50% (F2) et 100% (F3), comparativement au béton de référence (F1) sont à l'origine d'une baisse de la résistance en flexion sur produit de respectivement 10% et 30 %, ainsi qu'une augmentation de 70% et 150% de l'absorption d'eau (Tableau 4). Ce critère défini dans la norme NF EN 1340 étant limité à 6%, la substitution seule ne suffit pas sans un travail sur la matrice cimentaire de la composition pour maintenir une valeur d'absorption suffisante, la formulation F2 étant cependant proche du seuil.

**Tableau 5. Résultats d'essais sur bordures selon le taux de substitution en GBRC**

	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>
	<i>Témoin</i>	<i>50% GBRC</i>	<i>100% GBRC</i>
<b><i>R<sub>f</sub> 3 points 7j (Mpa)</i></b>	6,55	6,1	4,54
<b><i>Absorption d'eau (%)</i></b>	3,7	6,3	9,1

- Fabrication d'escaliers.

Pour avancer davantage sur le volet bas carbone dans le cadre de la fabrication d'escaliers, une formulation de béton employant un liant à base de CEM IV et une substitution de 20% en sable et 60% en gravillons GBR carbonatés a été développée. Les essais en usine confirment la nécessité de veiller à l'optimisation de l'ouvrabilité, comme c'est le cas avec les granulats recyclés non carbonatés. A la date de rédaction du présent article, les essais de durabilité ne sont pas terminés pour ces produits.

## V. Conclusions

Les études réalisées dans le cadre du Projet National FASTCARB vont dans le même sens que les résultats obtenus dans des projets précédents tels que le projet national RECYBETON [1] et permettent de formuler les conclusions suivantes :

- Les granulats recyclés carbonatés obtenus par les démonstrateurs du projet Fastcarb ne modifient pas significativement les propriétés des bétons à l'état frais ou durci, comparativement aux granulats recyclés non carbonatés. Les possibilités d'optimisation des processus industriels développés pourraient mener à retrouver l'impact des granulats carbonatés sur les propriétés mécaniques et de durabilité tel que décrit dans la littérature [6-8] ;
- Comme dans le cas des granulats recyclés non carbonatés, il est possible de fabriquer des bétons avec de bonnes performances en utilisant des granulats de béton recyclés carbonatés, même à des taux de substitution importants. Les caractéristiques physico-chimiques intrinsèques des GBRC, leur taux de substitution et les caractéristiques de la matrice cimentaire (rapport  $E_{eff}/Liant$  notamment) sont les facteurs déterminants vis-à-vis des propriétés de durabilité du nouveau béton ;
- La variabilité des sources de granulats recyclés incite à une attention particulière devant être portée au contrôle de la régularité de leurs caractéristiques, que les granulats recyclés soient carbonatés ou non. Les fréquences de contrôle des caractéristiques doivent suivre les mêmes règles en vigueur que pour les granulats recyclés non carbonatés ;
- Les résultats acquis par le projet national Fastcarb confirment la pertinence des spécifications de la norme NF EN 206/CN, dont les modalités définies concernant les contrôles à effectuer sur les granulats et l'optimisation des bétons en fonction des taux de substitution.

## REMERCIEMENTS

La recherche présentée est réalisée dans le cadre du Projet National FastCarb soutenu par le Ministère de la Transition écologique et solidaire.

## REFERENCES

- [1] Sereng, M. (2021). Amélioration des propriétés des granulats recyclés par stockage de CO<sub>2</sub>. *Academic Journal of Civil Engineering*, 39(1), 235-242
- [2] C. Liang, B. Pan, Z. Ma, Z. He, Z. Duan. (2020). Utilization of CO<sub>2</sub> curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: a review, *Cement Concr.Compos.* 105.
- [3] J. Zhang, C. Shi, Y. Li, X. Pan, C.-S. Poon, Z. Xie. (2015). Performance enhancement of recycled concrete aggregates through carbonation, *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (11) (2015), 04015029
- [4] De Larrard F., Colina H. (2019) *Concrete recycling – Research and practice*. CRC Press.
- [5] Livrable du Projet National Perfdub (2022).
- [6] N. Russo, F. Lollini. (2022). Effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical and durability properties of concrete, *Journal of Building Engineering*, Volume 51, 104290.
- [7] B. Lu, C. Shi, Z. Cao, M. Guo, J. Zheng. (2019) Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete, *J. Clean. Prod.* 233. 421–428

[8] D.X. Xuan, B.J. Zhan, C.S. Poon. (2017). Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates, *Cement Concr. Compos.* 84. 214–221