

Projet de recherche et développement



Stockage de CO₂ par carbonatation du béton recyclé

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

Application à l'échelle 1 Produits en béton préfabriqués intégrant des granulats de béton recyclés carbonatés

Auteur(s) / Organisme(s) :

T. PERNIN – CERIB

Thème de rattachement : 2-2-4

Passage au béton – Fabrication de produits en béton

FCARB/R/023

LC/20/FCARB/052

19/12/2023

Site internet : www.fastcarb.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/fastcarb

Président : Raoul de PARISOT

Directeur : Jean-Michel TORRENTI

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

Sommaire	2
1 Introduction	3
2 Production des bétons contenant des granulats de béton recyclés carbonatés et méthodes de caractérisation	3
2.1 Bétons étudiés en laboratoire dans le projet national FastCarb	3
2.2 Bétons fabriqués à échelle 1	4
3 Réalisation de bétons industriels - résultats	4
3.1 Réalisation de voiles BPE	4
3.1.1 Propriétés à l'état frais et résistances mécaniques	6
3.1.2 Propriétés de durabilité	6
3.2 Fabrication de blocs de béton	7
3.2.1 Résistances mécaniques	8
3.2.2 Résistance au gel	9
3.3 Fabrication de bordures en béton	10
3.3.1 Résistances mécaniques	11
3.3.2 Résultats de durabilité	11
3.4 Fabrication d'escaliers en béton	14
3.4.1 Développement de la formule	14
3.4.2 Résultats	15
4 Conclusions	18

1 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 et fait l'objet de ce présent rapport.

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 naturels, et l'impact de leur emploi sur les lignes de production.

2 Production des bétons contenant des granulats de béton recyclés carbonatés et méthodes de caractérisation

2.1 Bétons étudiés en laboratoire dans le projet national FastCarb

Dans le cadre de l'action « Passage au béton » du projet, quatorze bétons de laboratoire ont été formulés de manière à distinguer deux familles de béton 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 %.

Ces compositions sont à retrouver dans les rapports FastCarb FCARB/R/021 (Fabrication du béton) et FCARB/R/020 (Propriétés des bétons).

Les quatorze bétons formulés ont reçu une dénomination suivant les taux de substitution pratiqués, à retrouver en Tableau 1 pour l'interprétation des résultats.

Tableau 1. 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_40CRS1-100CRG2	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

Les 3 bétons B2_C25_20RS-50RG, B3_C25_20CRS1-50CRG1 et B4_C25_20CRS2-50CRG2 ont été employés pour la réalisation des voiles BPE

2.2 Bétons fabriqués à échelle 1

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 est 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.

3 Réalisation de bétons industriels - résultats

Ce chapitre dresse l'ensemble des résultats collectés pour chacune des familles de produits réalisés dans le cadre du projet national FastCarb.

3.1 Réalisation de voiles BPE

Descriptif du chantier : réalisation de voiles en béton pour la création de murs séparateurs de cases granulats sur la centrale à béton Lafarge de Tigneux (38).

Pour cette réalisation, les formules B2_C25_20RS-50RG, B3_C25_20CRS1-50CRG1 et B4_C25_20CRS2-50CRG2 issues des travaux en laboratoire ont été utilisées.

L'adjuvantation de ces formules avait été travaillée en anticipation de ce chantier, et prise en compte du temps de trajet important depuis la centrale de fabrication du béton, à Serezin (69).

Les voiles réalisés sont présentés en Figure 1.



Figure 1. Voile BPE coulé sur le site de Tigneux (38)

Synthèse des résultats

Dates de coulage : 21, 22 et 23 juillet 2021.

Fournisseur de béton BPE : Lafarge bétons Rhône-Alpes, centrale de Serezin (69).

Les voiles ont été coulés avec les formulations issues des études laboratoire du projet national avec les taux de substitution suivants : 20 % pour le sable et 50 % de gravillons.

Nombre de formules étudiées : 3 avec utilisation de granulats recyclés non carbonatés, et granulats carbonatés issus du process 1 et ceux du process 2.

Compositions des bétons :

Les formules béton reprises des essais laboratoire sont présentées en Tableau 2.

Tableau 2. Détail des compositions fabriquées pour la réalisation des voiles

Compositions (kg/m ³)	C1	C2	C3
0/4 SAINT BONNET DE MURE	572	604	594
0/4 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Non carbonaté	141	-	-
0/4 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté LH	-	149	-
0/4 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté Vicat	-	-	146
4/11.2 SAINT BONNET DE MURE	108	108	108
11.2/22.4 SAINT BONNET DE MURE	364	356	356
4/16 RECYCLE SAINT FONS DEPOT – Non carbonaté	473	-	-
4/16 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté LH	-	460	-
4/16 RECYCLE SAINT FONS DEPOT - Carbonaté Vicat	-	-	466
CEM II/A-LL 42,5R VAL D'AZERGUES	318	318	320
Isoflow 7230	0,84 %	0,84 %	0,84 %
Chryso CHR	0,38 %	0,38 %	0,38 %
Eau efficace	178	180	183
E _{eff} /C	0,56	0,57	0,57

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 chlorure, perméabilité aux gaz).

3.1.1 Propriétés à l'état frais et résistances mécaniques

L'objectif de cette réalisation était d'utiliser les GBRC en conditions de fabrication en centrale BPE, et d'adapter la rhéologie pour assurer un temps de transport de 45 min.

Les résultats obtenus sont présentés en Tableau 3.

Tableau 3. Résultats à l'état frais et résistances mécaniques des bétons employés

	C1	C2	C3
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
T _{béton} T15 (°C)	26	26	27
T _{ext} T15 (°C)	22	24	29
Rc28 (MPa)	32,4	35,7	29,6

Les résultats à l'état frais et de résistances mécaniques à la compression présentés en Tableau 3 montrent un bon comportement du béton pour les trois formulations, même pour des températures extérieures élevées proches de 30 °C. Le maintien en rhéologie en classe S4 a pu être assuré.

3.1.2 Propriétés de durabilité

Les résultats de durabilité sont détaillés dans le rapport FastCarb « FCARB/R/020-Propriété des bétons contenant des GBRC » et semblent montrer 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 : il est mesuré une valeur de 0,040 Kg.m⁻².s^{-0,5} pour les voiles BPE en moyenne, comparativement à 0,024 Kg.m⁻².s^{-0,5} pour les bétons de l'étude fabriqué et conservés en laboratoire. La carbonatation des granulats recyclés ne semble en revanche pas impacter significativement les propriétés du béton comparativement à l'emploi de granulats recyclés non carbonatés, de manière cohérente avec les autres observations effectuées sur les bétons de laboratoire.

3.2 Fabrication de blocs de béton

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.

Descriptif du chantier : Fabrication en usine de blocs béton (Figure 2) avec substitution du sable et gravier par des granulats GBRC issus du projet FastCarb.



Figure 2. Blocs béton avec 50 % de substitution en GBRC sur la ligne de production

Date : Novembre 2021

Nombre de formules testées : 2 bétons, un béton témoin, avec granulats naturels, et un béton avec substitution à 50 % du sable et du gravillon en GBRC.

Caractéristiques étudiées : Résistance mécanique, résistance au gel selon norme produit (NF EN 771-3).

Les blocs ont pu être fabriqués sur la ligne de production du site avec quelques réglages machines à opérer (compactage plus important du béton).

Les principales problématiques lors du coulage ont été liées au sable, en particulier les points suivants :

- ▶ gestion du stock de sable : le stockage en big bag parfois soumis aux intempéries a permis au sable de durcir avec le temps. Le lot de sable carbonaté issu du démonstrateur de Vicat n'a pas pu être employé. La composition F1 est donc composée de granulats naturels et de sable carbonaté issu du démonstrateur Lafarge, et de granulats 4/10 criblé à partir des lots provenant du démonstrateur de Vicat ;
- ▶ gestion du sable dans les cases : les pesées à la centrale ont été impactées par le manque de coulabilité du sable dans les cases, nécessitant l'intervention humaine pour accompagner la chute de ce dernier au pesage.

3.2.1 Résistances mécaniques

► Formule témoin F0

Tableau 4. Résultats de résistances en flexion (MPa) de la formule F0

Bloc N°	Poids du bloc (kg)	Résistances (KN)	Résistances (MPa)	Valeur Li	Commentaires
1	18,2	385,7	3,9	4	Tous les blocs surfacés
2	18,5	371,1	3,8	4	-
3	18,1	369,7	3,7	4	-
4	18,3	366,2	3,7	4	-



Figure 3. Exemple de bloc passé à la presse après surfacage (Formule F0)

► Formule Fastcarb F1

Tableau 5. Résultats de résistances en flexion (MPa) de la formule F1

Bloc N°	Poids du bloc (kg)	Résistances (KN)	Résistances (MPa)	Valeur Li	Commentaires
1	17,2	357,1	3,6	4	Tous les blocs surfacés
2	17,2	354,5	3,6	4	-
3	17,2	407,8	4,1	4	-
4	17,1	405,3	4,1	4	-

Résultat : Malgré une résistance moyenne du béton témoin légèrement plus faible qu'attendu, il est possible de constater un impact négligeable de la substitution des granulats par les granulats (sable + gravier) du projet FastCarb.

3.2.2 Résistance au gel

Nature de l'essai : gel / dégel des blocs en béton

Texte de référence : annexe F de la norme NF EN 771-3+A1/CN

- ▶ Formule témoin F0



Figure 4. Bloc F0 après 25 cycles de gel-dégel

Tableau 6. Observations effectuées sur les blocs F0 soumis aux essais

N° bloc	E	F	G	H
Observations après 25 cycles de gel-dégel	Aucun défaut relevé	Aucun défaut relevé	Aucun défaut relevé	Aucun défaut relevé

Aucun défaut n'a été relevé sur l'un des blocs à l'issue des 25 cycles de gel-dégel.

- ▶ Formule FastCarb F1



Figure 5. Bloc F1 après 25 cycles de gel-dégel

Tableau 7. Observations effectuées sur les blocs F1 soumis aux essais

N° bloc	A	B	C	D
Observations après 25 cycles de gel-dégel	Aucun défaut relevé	Aucun défaut relevé	Aucun défaut relevé	Aucun défaut relevé

Résultats : Impact limité sur la résistance mécanique du produit, résistance au gel validée pour formule témoin et formule avec 50 % de substitution.

3.3 Fabrication de bordures en béton

Descriptif du chantier : Fabrication en usine de bordures de trottoir de type T2 (Figure 6) avec substitution du sable par du sable recyclé carbonaté issu du projet FastCarb, pour plusieurs taux de substitution.



Figure 6. Bordures avec 50 % de sable recyclé carbonaté sur la ligne de production



Figure 7. Bordures avec 100 % de sable recyclé carbonaté sur la ligne de production

Date : Janvier 2022

Nombre de formules testées : 3 bétons, un béton témoin (B-F1), avec granulats naturels, un béton avec substitution à 50 % (B-F2) du sable en GBRC et une avec 100 % de substitution en sable (B-F3).

Caractéristiques étudiées : Résistance mécanique en flexion, résistance à l'abrasion, résistance au gel et glissance.

Résultats : 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 ainsi pu être utilisé pour la fabrication de bordures conformes aux contrôles visuels et dimensionnels.

3.3.1 Résistances mécaniques

Les résistances en flexions mesurées en usine, ainsi que les absorptions d'eau sont présentées dans le Tableau 8.

Tableau 8. Résultats d'essais sur bordures selon le taux de substitution en GBRC

	B-F1	B-F2	B-F3
	Témoin	50 % GBRC	100 % GBRC
R _f 3 points 7j (Mpa)	6,55	6,1	4,54
Absorption d'eau (%)	3,7	6,3	9,1

Les substitutions des granulats naturels par des granulats recyclés carbonatés selon des taux de 50 % (B-F2) et 100 % (B-F3), comparativement au béton de référence (B-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.

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.

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 %.

3.3.2 Résultats de durabilité

3.3.2.1 Résistance au gel

Nature de l'essai : gel dégel avec sels de déverglaçage sur bordures et caniveaux en béton.

Texte de référence : annexe D de la norme NF EN 1340 (Février 2004) et son complément national NF P 98-340/CN.

- ▶ Bordures avec 50 % de sable recyclé carbonaté

Tableau 9. Résultat de résistance au gel pour la formule B-F2

N° des produits testés	1	2	3	Moyenne
Masse de la quantité totale de matériau écaillé après 28 cycles <i>M</i> (en mg)	5 320	3 020	5 990	-
Superficie de la surface d'essai <i>A</i> (en mm ²)	14 697	15 006	14 884	-
Perte de masse par unité de surface <i>L</i> (kg/m ²)	0,4	0,2	0,4	0,3

- ▶ Bordures avec 100 % de sable recyclé carbonaté

Tableau 10. Résultat de résistance au gel pour la formule B-F3

N° des produits testés	1	2	3	Moyenne
Masse de la quantité totale de matériau écaillé après 28 cycles <i>M</i> (en mg)	11 420	10 990	30 030	-
Superficie de la surface d'essai <i>A</i> (en mm ²)	14 778	15 170	14 619	-
Perte de masse par unité de surface <i>L</i> (kg/m ²)	0,8	0,7	2,1	1,2

Extrait des spécifications du référentiel de certification pour la marque NF-Bordures et caniveaux en béton :

	Classe	Longueur d’empreinte (mm)
Résistance renforcée au gel/dégel et sels de déverglaçage	D	Moyenne des 3 éléments $\leq 1,0$ et aucun élément $> 1,5$

Résultats : La substitution à 50 % du sable permet de maintenir une bonne résistance au gel, avec une perte de masse par unité de surface moyenne inférieure à $0,3 \text{ kg/m}^3$, et donc assurer la classe D (Tableau 9).

Pour la formule avec 100 % de sable recyclé carbonaté, les résultats sont satisfaisants pour 2 échantillons mais non valides pour le 3^{ème} (Tableau 10).

Ce résultat contrasté témoigne d’une perte de régularité potentielle dans le compactage des bordures, et donc une dispersion importante dans les résultats pour des taux de substitution aussi importants. Les très bons résultats sur les premiers échantillons indiquent cependant qu’avec un travail de composition plus important, il serait envisageable d’obtenir une conformité en tout point.

3.3.2.2 Résistance à l’abrasion

Nature de l’essai : résistance à l’usure par abrasion sur bordures et caniveaux en béton.

Texte de référence : annexe G de la norme NF EN 1340 et son complément national NF P98-340/CN.

- ▶ Bordures avec 50 % de sable recyclé carbonaté

Tableau 11. Résultat de résistance à l’abrasion pour la formule B-F2

N° des produits testés	1	2	3	Observation
Longueur d’empreinte maximum (en mm)	20,0	19,0	18,5	/
La longueur d’empreinte maximum pour chaque éprouvette est la plus grande valeur obtenue sur 2 empreintes effectuées sur la même éprouvette.				

- ▶ Bordures avec 100 % de sable recyclé carbonaté

Tableau 12. Résultat de résistance à l’abrasion pour la formule B-F3

N° des produits testés	1	2	3	Observation
Longueur d’empreinte maximum (en mm)	19,5	20,5	20,0	/
La longueur d’empreinte maximum pour chaque éprouvette est la plus grande valeur obtenue sur 2 empreintes effectuées sur la même éprouvette.				

Extrait des spécifications du référentiel de certification pour la marque NF-Bordures et caniveaux en béton :

	Classe	Longueur d’empreinte (mm)
Résistance à l’abrasion	H	Aucune valeur > 23

Résultats : Les deux compositions, aussi bien à 50 % que 100 % en substitution du sable permettent d’atteindre la classe H. L’augmentation de la substitution n’entraîne pas une chute de la résistance à l’abrasion de plus 5 %.

3.3.2.3 Essai de glissance

Nature des essais : Résistance à la glissance au pendule de frottements SRT sur bordures et caniveaux en béton.

Texte de référence : Annexe I de la norme NF EN 1340 et son complément national NF P 98-340/CN.

- ▶ Bordures avec 50 % de sable recyclé carbonaté

Tableau 13. Résultat d’évaluation de la glissance pour la formule B-F2

N° des éprouvettes testées	1	2	3	4	5	Moyenne
Moyenne dans le 1 ^{er} sens	70	71	71	70	69	70
Moyenne dans le sens opposé	69	69	71	71	70	70
Moyenne dans les 2 sens	-					70

- ▶ Bordures avec 100 % de sable recyclé carbonaté

Tableau 14. Résultat d’évaluation de la glissance pour la formule B-F2

N° des éprouvettes testées	1	2	3	4	5	Moyenne
Moyenne dans le 1 ^{er} sens	68	66	71	66	67	68
Moyenne dans le sens opposé	68	66	70	67	67	68
Moyenne dans les 2 sens	-					68

Extrait des spécifications de la norme NF EN 1340 :

Si, dans un cas exceptionnel, une valeur est exigée pour la résistance à la glissance ou au dérapage, la valeur minimale de résistance à la glissance ou au dérapage doit être déclarée.

Extrait de la norme NF P 98-335 :

Les produits modulaires pour revêtement de voirie et espaces publics présentent en général une résistance à la glissance ou au dérapage suffisante à l'exclusion des produits polis ou des produits ayant subi un traitement de surface qui aboutit à une surface très lisse.

Le risque de glissement est avéré lorsque la valeur moyenne de résistance au glissement au SRT est inférieure à 35.

Résultats : La substitution du sable n’a pas dégradé les propriétés de glissance des produits qui restent conformes (supérieur à 35).

3.4 Fabrication d'escaliers en béton

Descriptif du chantier : Fabrication en usine d'escaliers préfabriqués à destination d'un chantier de bâtiment résidentiel à Chartres (28).

Le béton employé respecte les spécifications de la NF EN 206/CN (2014) : substitution de 20 % des gravillons avec des granulats recyclés carbonatés issus des démonstrateurs FastCarb. Un développement d'une formulation à taux de substitution plus important a également été réalisé dans le cadre du projet.

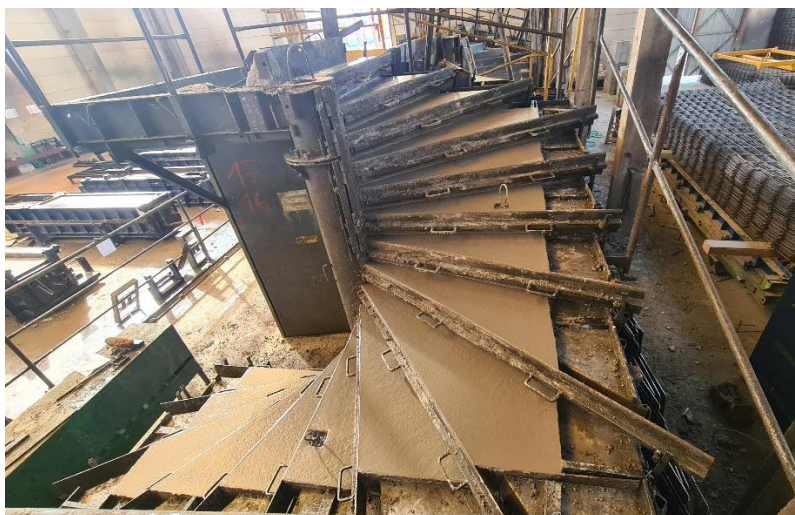


Figure 8. Fabrication d'un escalier en usine (71) le 05/10/2022

Date : Octobre 2022 (fabrication)

Résultats : La substitution de 20 % de gravillons par des gravillons recyclés carbonatés n'a pas impacté la production des escaliers. La rhéologie du béton est restée conforme et la résistance à 7 jours, supérieure à 40 MPa a permis d'assurer la livraison du chantier dans les délais impartis.

Dans le cadre du projet, a également été étudiée une formulation présentant une plus forte substitution des matériaux : 25 % de sable carbonaté et 50 % de gravillons carbonatés.

Ces taux ont été les taux maximaux permettant d'assurer une rhéologie correcte du béton.

Par rapport au béton de référence, il a été observé une chute d'environ 40 % de la résistance mécanique à 28j et une augmentation de la porosité accessible à l'eau au même niveau que les murs BPE fabriqués avec des taux de substitution similaire (de l'ordre de 20 %), impactant la vitesse de carbonatation accélérée.

3.4.1 Développement de la formule

Différents essais ont été menés pour obtenir un taux de substitution optimum tout en maintenant une rhéologie exploitable pour le coulage des escaliers en usine.

La formule donnant le meilleur résultat est présentée en Tableau 15. Cette formule contient 20 % de sable recyclé carbonaté et 50 % de gravier recyclé carbonaté.

Tableau 15. Composition de la formule E-F3

E-F3 - BAP FASTCARB CRS20-CRG50	
Constituants	Dosages (kg/m ³)
Graviers 4/10	407
Sable 0/4	562
Graviers FastCarb (VA) 4/16	408
Sable FastCarb (VA) 0/4	188
CEM IV 4,5 R Créchy	350
Filler calcaire	185
Plastifiant	8L
Eau totale	195,00

L'un des objectifs majeurs de la fabrication de ces escaliers durant le projet a été de participer à la construction d'un bâtiment démonstrateur des solutions bas carbone de l'industrie du béton : la résidence Olympi.

La mise à jour de la norme NF EN 206/CN n'ayant pas vu sa parution à temps pour le respect des temporalités du chantier, une autre formule respectant les seuils de la norme 206 en vigueur de 2014 a également été développée. Elle est présentée en Tableau 16, la substitution effectuée est de 20 % de la masse de gravillon uniquement.

Tableau 16. Composition de la formule E-F2

E-F2 - BAP FASTCARB CRS0-CRG20	
Constituants	Dosages (kg/m ³)
Sable 0/4	675
Gravier 4/10	494
Gravier 10/20	290
Graviers FastCarb (VA) 4/16	196
CEM IV 42,5 R Créchy	360
Filler calcaire	80
Plastifiant	5L
Eau efficace	160

3.4.2 Résultats

Béton E-F2 : escaliers pour le chantier Olympi.

Les escaliers ont été fabriqués en octobre 2022 pour livraison sur chantier à Chartres après 14 jours de durcissement en usine.

La formule béton a présenté une bonne rhéologie lors du coulage, les escaliers présentent un bon aspect au démoulage (Figure 9).

Les résistances mécaniques à 24h (21 MPa), 48h (28 MPa) ont permis d'atteindre une résistance mécanique de 40 MPa à 7 jours, validant la livraison du produit sur chantier.



Figure 9. Escalier après démoulage

Ces escaliers, au nombre de 3, ont permis la réalisation de cages d'escaliers dans les sous-sols de l'immeuble (Figure 10. Pose de l'escalier sur chantier (28)).



Figure 10. Pose de l'escalier sur chantier (28)

Béton F3 : substitution plus importante des granulats

Le travail de développement mené a permis d'obtenir une composition béton dont les taux de substitution des granulats naturels est bien plus important : 20 % du sable et 50 % du gravillon.

Cette formule présente une rhéologie suffisante pour permettre le coulage de l'escalier sans en dégrader l'aspect.

Des échantillons de ce béton ont été transmis au Cerib pour réaliser des essais de durabilité, dont les résultats sont présentés en Tableau 17.

Tableau 17. Résultats obtenus sur les bétons E-F1 (référence) et E-F3 (FastCarb)

Résultats	F1	F3
Rc _{28j} (Mpa)	56,1	35,9
Abs (%)	6,5	10,8
Porosité à l'eau (%)	14,1	21,4
Vitesse de carbonatation (mm/j ^{1/2})	1,18	2,39

On constate un impact important de la substitution des granulats sur les résultats :

- ▶ chute de la résistance mécanique de plus de 30 %, sous la valeur cible de 40 MPa ;
- ▶ augmentation significative de l'absorption d'eau (Annexe F de la NF EN 13369) et de la porosité accessible à l'eau (XP P 18-459) ;
- ▶ en conséquence une vitesse de carbonatation accélérée (XP P 18-458) doublée par rapport au béton de référence.

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, mais tout en veillant à conserver de bonnes propriétés de durabilités qui peuvent être fortement impactées, notamment lors de l'ajout de sable recyclé.

4 Conclusions

Les études réalisées dans le cadre du projet national FastCarb ont permis la réaliser différentes fabrications à l'échelle industrielle et en employant dans des conditions représentatives de production de béton (centrale BPE, lignes de production en préfabrication) les granulats recyclés carbonatés par les démonstrateurs. Cette étude vient en complément de l'étude réalisées sur les bétons de laboratoire.

Les observations effectuées vont dans le même sens que les résultats obtenus dans des projets précédents tels que le projet national RECYBETON quant à l'emploi de ces granulats dans la ligne de production et permettent de formuler les conclusions suivantes :

- ▶ l'emploi de sable recyclé en grande quantité maintien la problématique concernant son stockage et son dosage, le risque de colmatage des cases de la centrale étant présent et nécessitant une vigilance ;
- ▶ comme dans le cadre de l'emploi de granulats recyclés non carbonatés, il est possible d'obtenir et de produire des bétons avec de bonnes performances en utilisant des granulats de béton recyclés carbonatés, même à des taux de substitution importants en contrepartie d'un travail effectué sur les paramètres de composition mais également des machines destinées à employer ces bétons. 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 finales, aussi bien mécaniques que de durabilité, du nouveau béton ;
- ▶ 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.