

GT2-2 Utilisation des GBRC dans les bétons Applications à l'échelle 1

www.fastcarb.fr

Thomas Pernin

► Objectifs

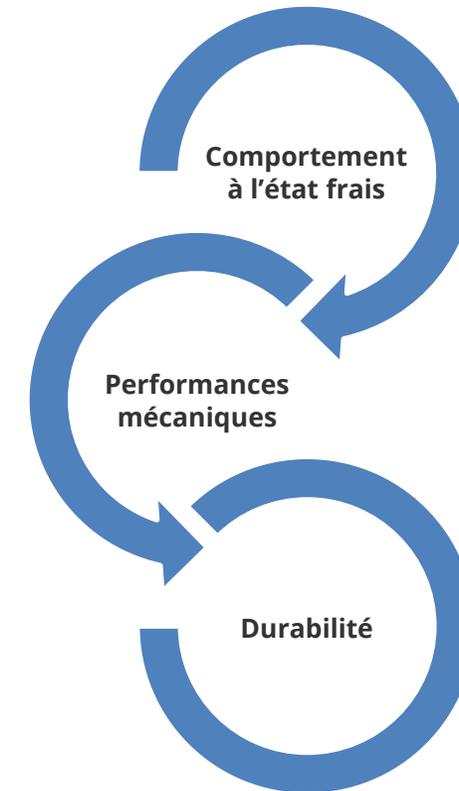
Passage au béton et à l'application aux produits préfabriqués et aux ouvrages coulés en place

1 Fabrication de bétons C25/30 et C45/55 en laboratoires

➔ Mesurer impact de la carbonatation des GBR sur les principales propriétés des bétons

2 Incorporation de GBR dans des bétons à l'échelle 1

➔ Réalisation de différents produits préfabriqués (blocs, bordures, escaliers) et des parties d'ouvrages coulés in-situ (voiles)



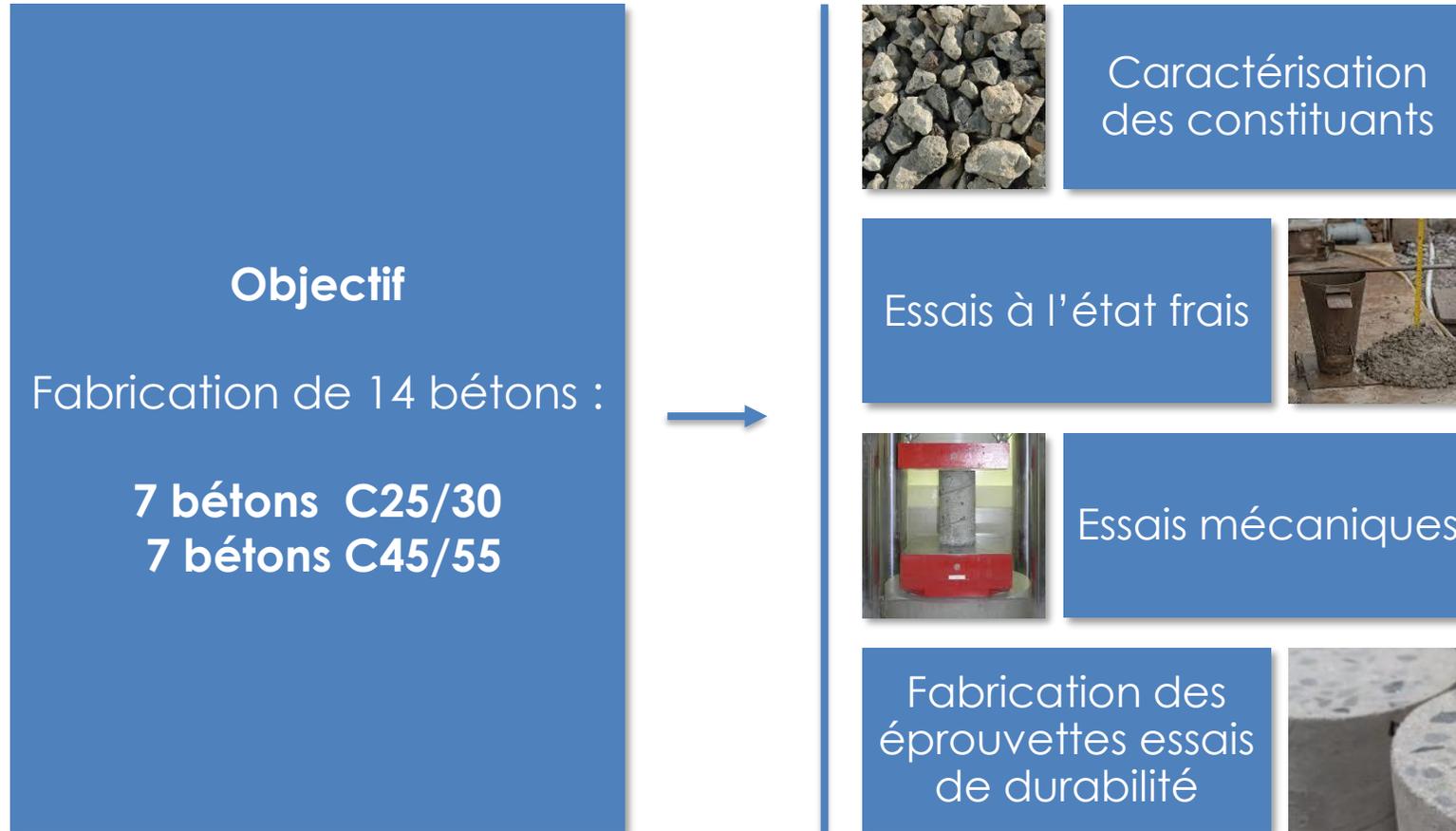
6
actions

- 2.2.1 fabrication des bétons laboratoires
- 2.2.2 essais durabilité
- 2.2.3 fabrication de voile BPE
- 2.2.4 fabrication de produits préfabriqués
- 2.2.5 analyses MEB
- 2.2.6 analyses Raman



Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

2-2-1 : fabrication des bétons laboratoires



Pilote : Cemex



Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

2-2-1 : fabrication des bétons laboratoires

Substitutions en GBR et GBRC

		Sand				Gravel			
		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
C45/50	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



Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

2-2-1 : fabrication des bétons laboratoires

Matières Premières



Ciment

Lafarge

CEM II/A-LL 42,5 R CE CP2 NF
Usine de Val d'Azergues



Granulats recyclés

Lafarge

0/4 concassé Saint-Fons dépôt
4/16 concassé Saint-Fons dépôt

Granulat recyclé carbonaté 1

Lafarge

0/4 Val d'Azergues
4/16 Val d'Azergues



Granulats naturels

Lafarge

0/4 SCL Saint-Bonnet
4/11 SCL Saint-Bonnet
11/22 SCL Saint-Bonnet



Adjuvants

Lafarge

0/4 concassé Saint-Fons dépôt
4/16 concassé Saint-Fons dépôt

Granulat recyclé carbonaté 2

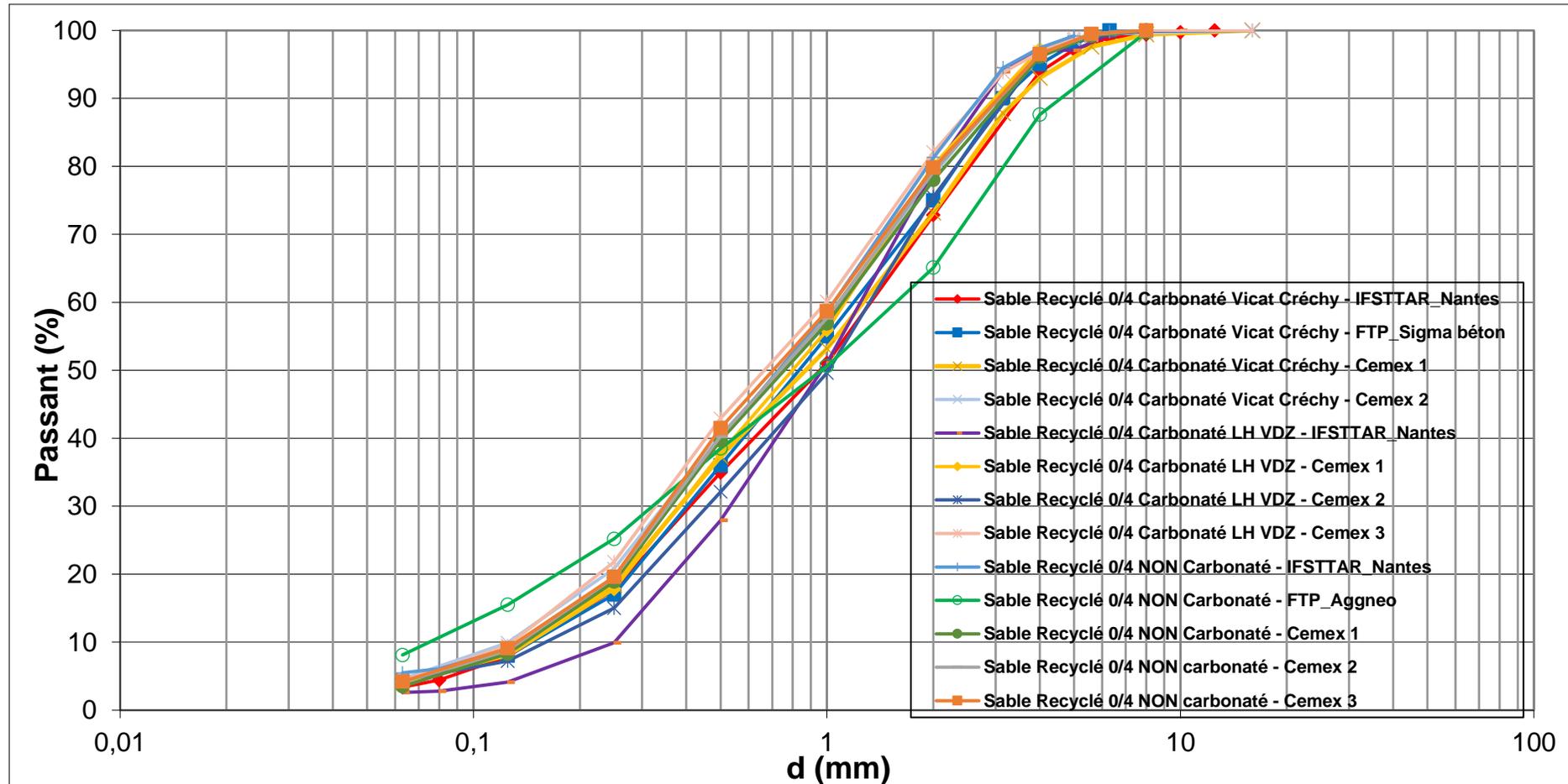
Vicat

0/4 Créchy
4/16 Créchy



2-2-1 : fabrication des bétons laboratoires

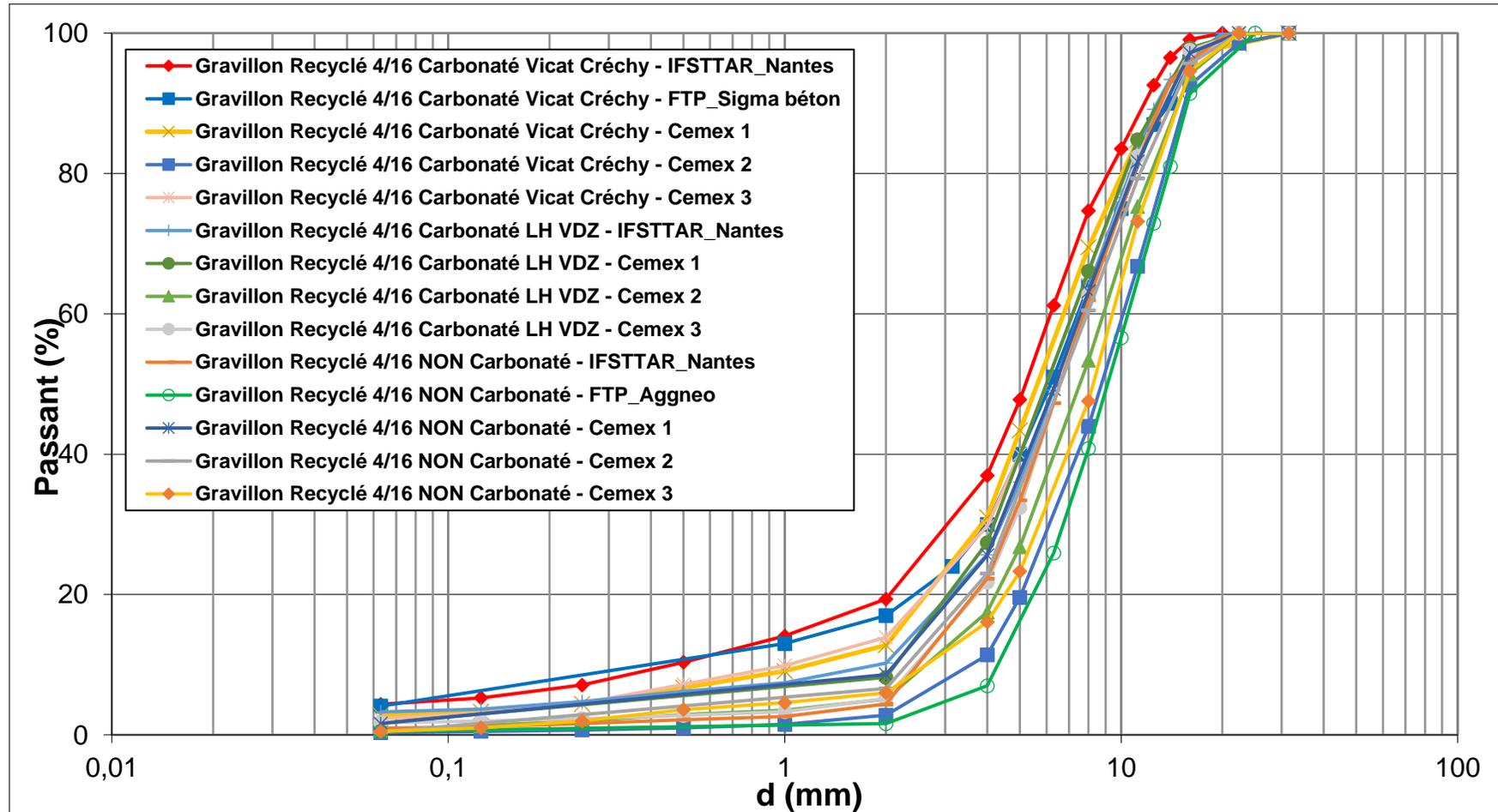
Matières Premières – Sables 0/4 – GR et GBR



Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

2-2-1 : fabrication des bétons laboratoires

Matières Premières – Gravillons 4/16 – GR et GBR



Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

2-2-1 : fabrication des bétons laboratoires

Matières Premières – Caractérisations

Essais répétés au laboratoire CEMEX sur plusieurs échantillons

Essais recoupés avec le Laboratoire UGE

- Résultats très semblables

Aspects des granulats à la réception

- Sables recarbonatés semblent « motés »
- Sables en BB semblent bi-phasés (fraction fine séparée de la fraction plus grossière)
- Nécessité de réhomogénéiser les BB

Premières conclusions absorption :

- Incertitude de l'essai importante rendant les conclusions complexes ; plusieurs mesures seront réalisées pendant l'étude

Tableau 1. Résultats de Wa24 sur les différentes coupures

	WA 24 GBR	WA 24 GBR C1	WA 24 GBR C2
0/4	13,8 %	12,5 %	13 %
4/16	6,3 %	6,1 %	6,4 %

Premières conclusions sur la granulométrie :

- Granulats 4/16 recyclé NON carbonaté avec une fraction fine importante
- Toutefois le processus de carbonatation accéléré **engendre une fraction fine non négligeable**
- Fraction fine tambour > Fraction fine lit fluidisé



2-2-1 : fabrication des bétons laboratoires

Formulations

Bétons C25/30

Composition (kg /m3)	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%	0,4%	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



Le béton recyclé, un puits de carbone!

27 Septembre 2022, Paris La Défense

2-2-1 : fabrication des bétons laboratoires

Formulations

Bétons C45/55

Composition (kg /m3)	Formule C45/55						
	B8bis	B9	B10	B11	B12bis	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	0,4%	0,4%	0,5%	0,7%	0,95%	0,90%	0,85%
Isoflow 7230	0,4%	0,6%	0,4%	0,4%	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

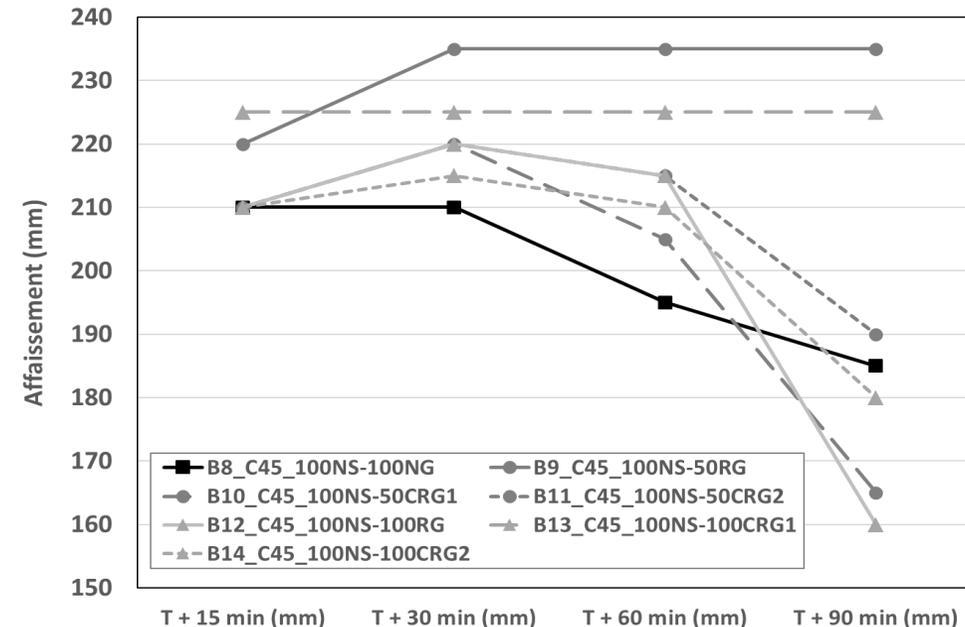
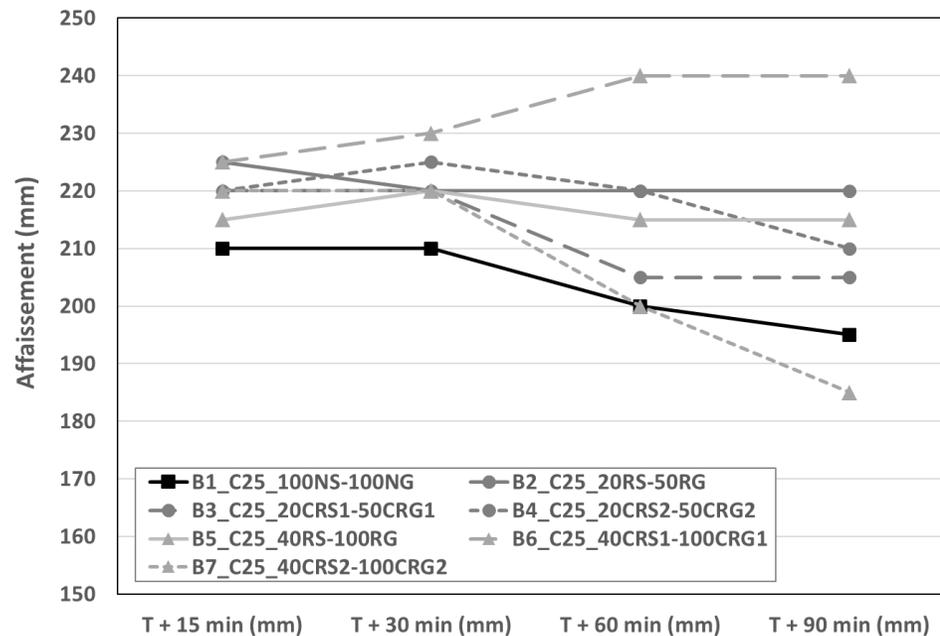


Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

2-2-1 : fabrication des bétons laboratoires - Résultats

Rhéologie – Essai d'affaissement

Résultats d'affaissement pour les béton C25/30 et C45/55



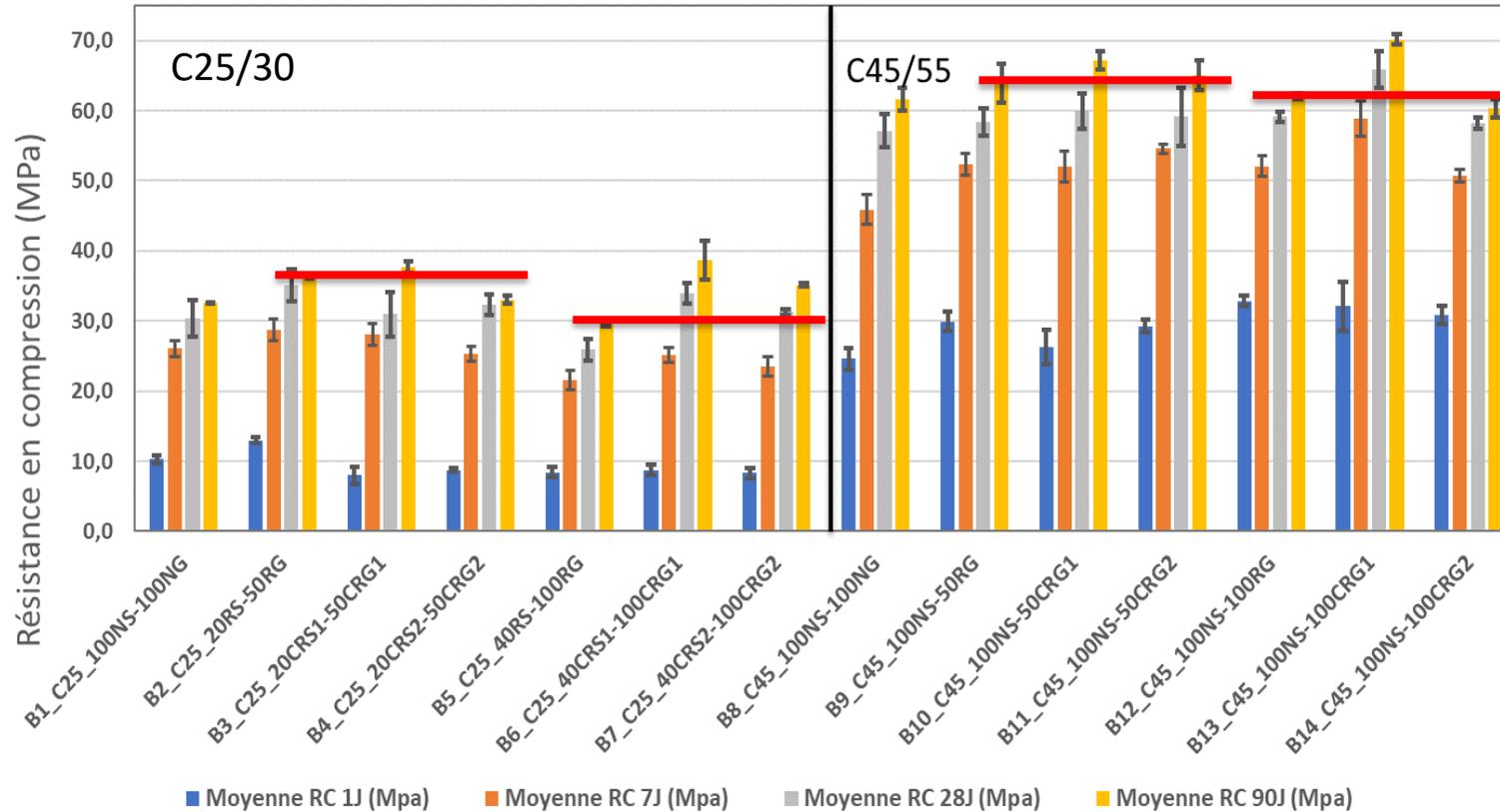
Hétérogénéité importante au sein d'un même lot de granulats en comportement en absorption



2-2-1 : fabrication des bétons laboratoires - Résultats

Mécanique – Résistance en compression

Essais de résistance en compression (MPa)



Impact limité de la carbonatation des granulats sur les résultats de résistance en compression



Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

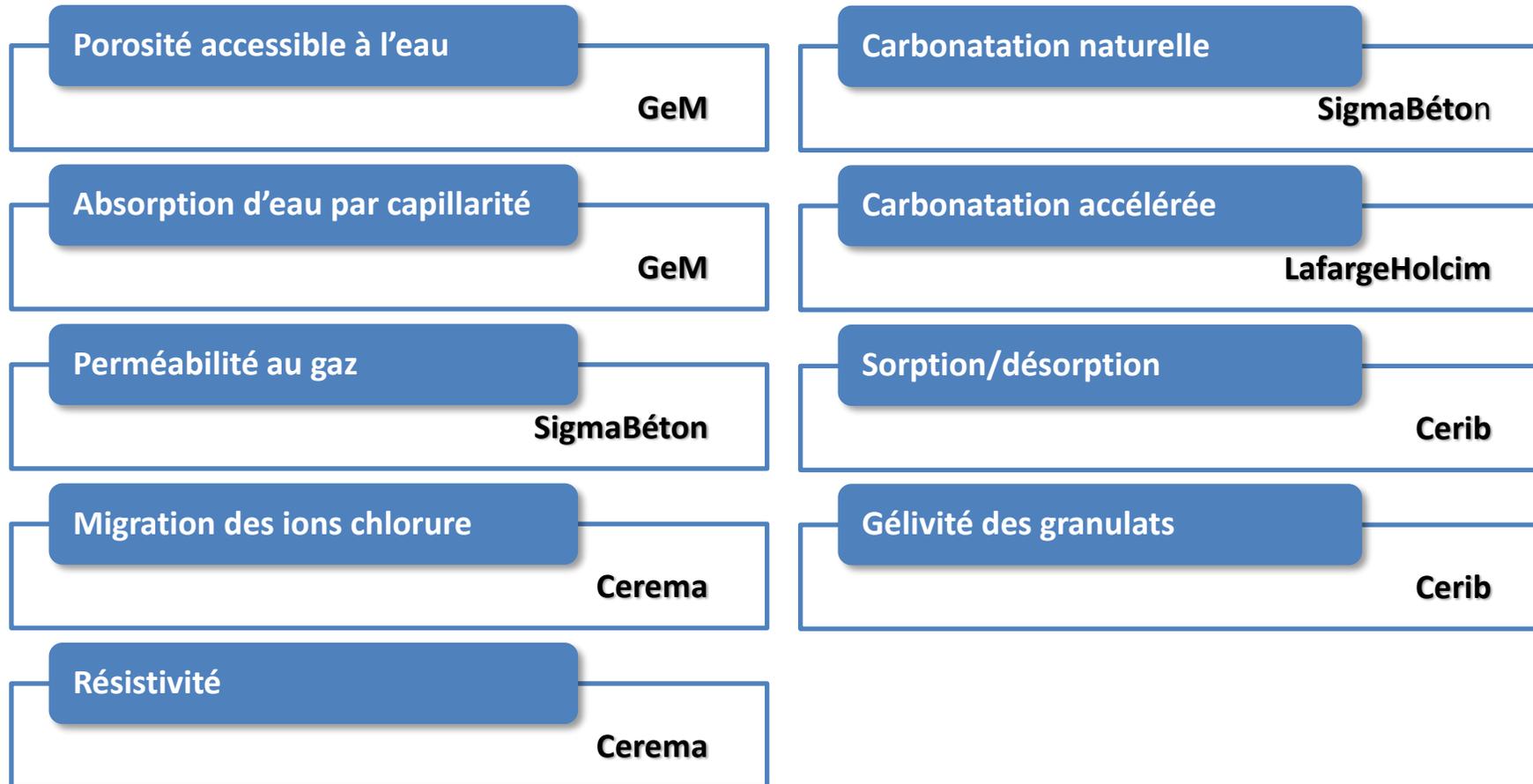
2-2-2 : Propriétés de durabilité

Objectifs

- ➔ **Quantifier** l'influence des GBRC sur la **durabilité potentielle** des bétons, comparativement à des bétons de granulats naturels et de GBR non carbonatés
- ➔ **Confirmer** l'applicabilité des recommandations du PN Recybéton et le cas échéant mettre en évidence l'éventuel effet positif de la carbonatation des GBR



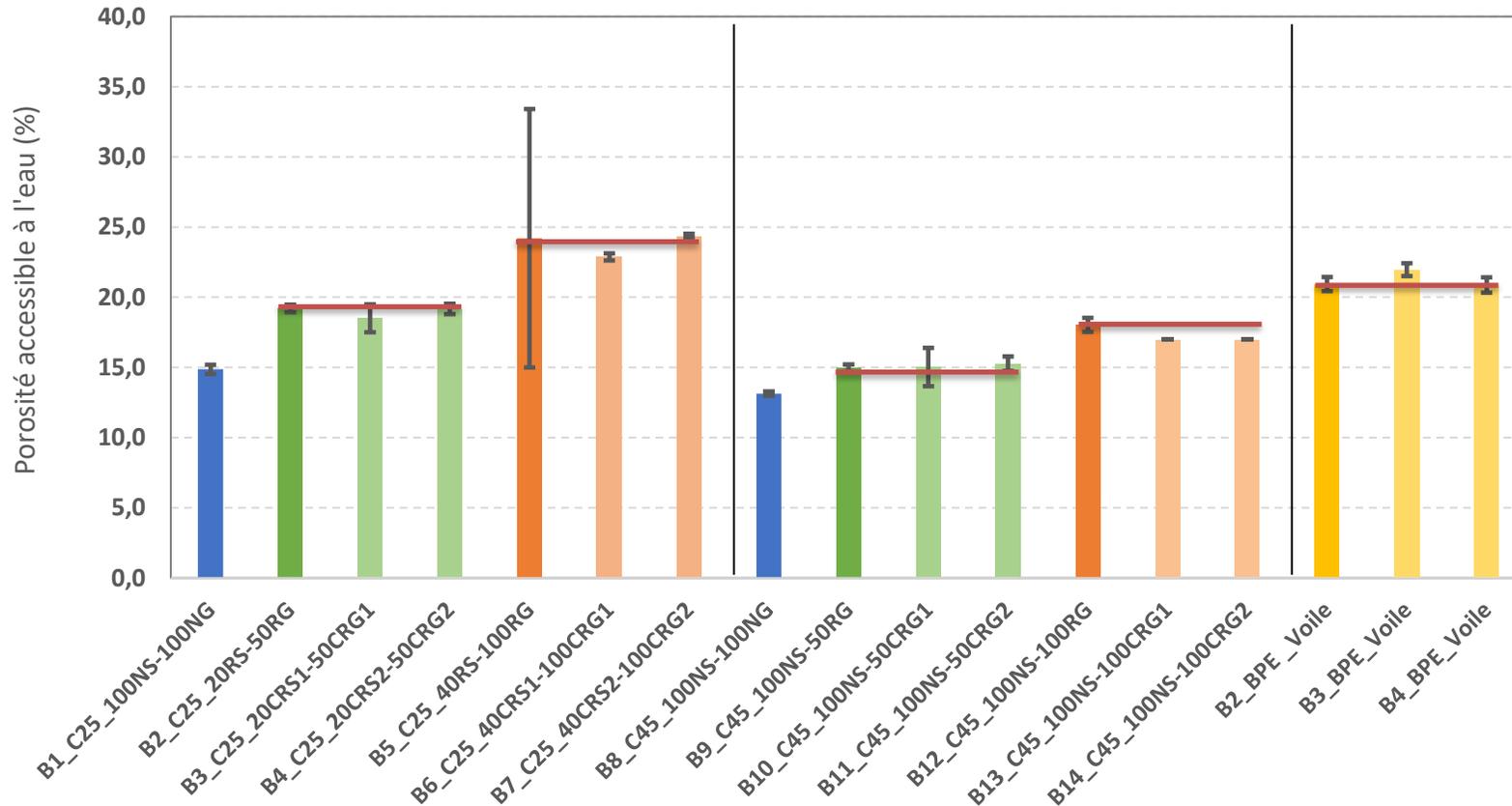
2-2-2 : Propriétés de durabilité



2-2-2 : Propriétés de durabilité

Porosité accessible à l'eau

Résultats de porosité en eau pour les béton C25/30 et C45/55



Carbonatation des granulats :

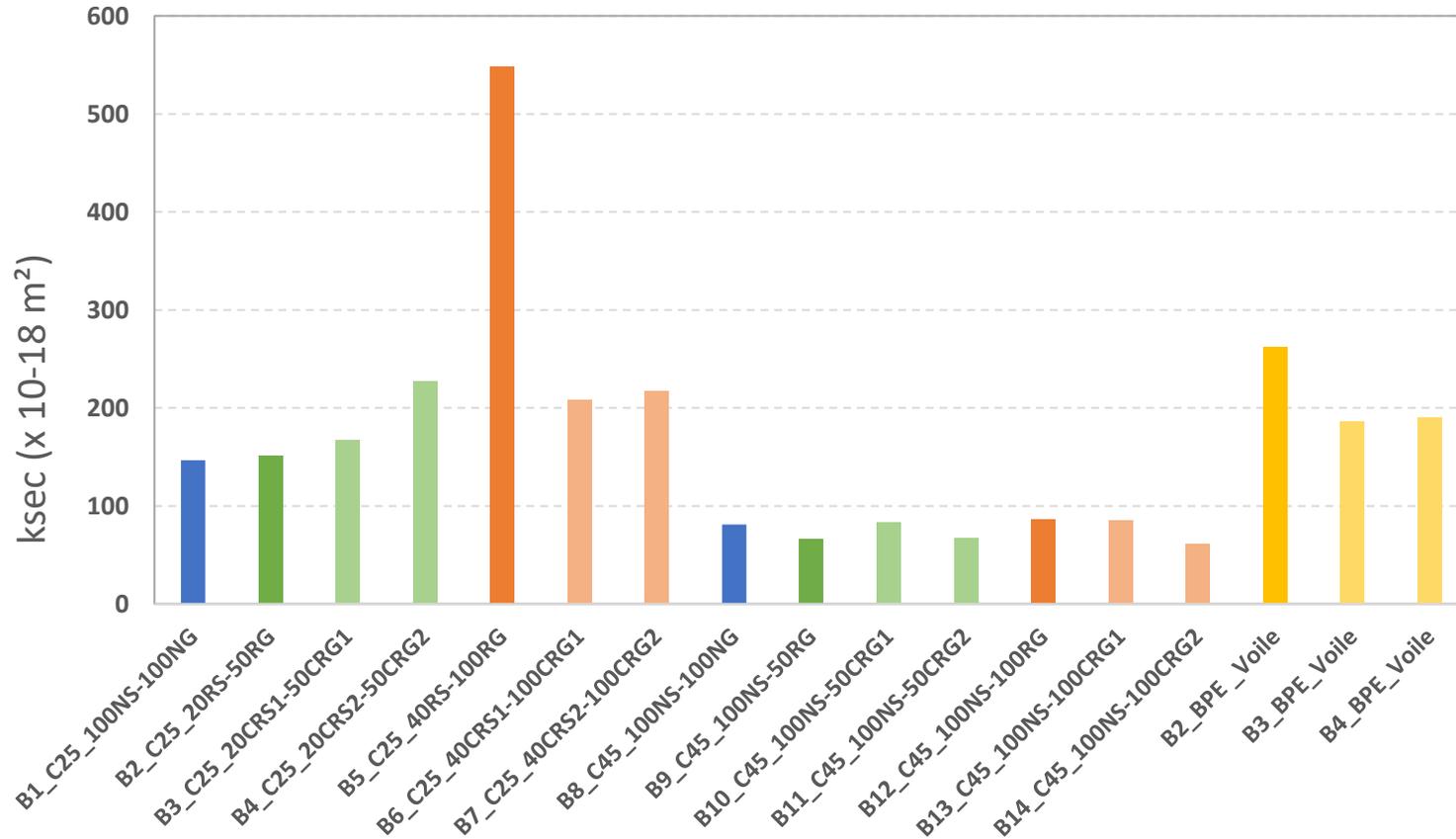
Pas d'impact significatif sur la valeur de porosité accessible à l'eau



2-2-2 : Propriétés de durabilité

Perméabilité au gaz

Résultats de perméabilité au gaz pour les béton C25/30 et C45/55



D'après les résultats, l'emploi de GBR amène le béton a des niveaux légèrement supérieurs à $200 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ pour les classes C25/30

Bonne performance des C45/55 pour tous les taux de substitution

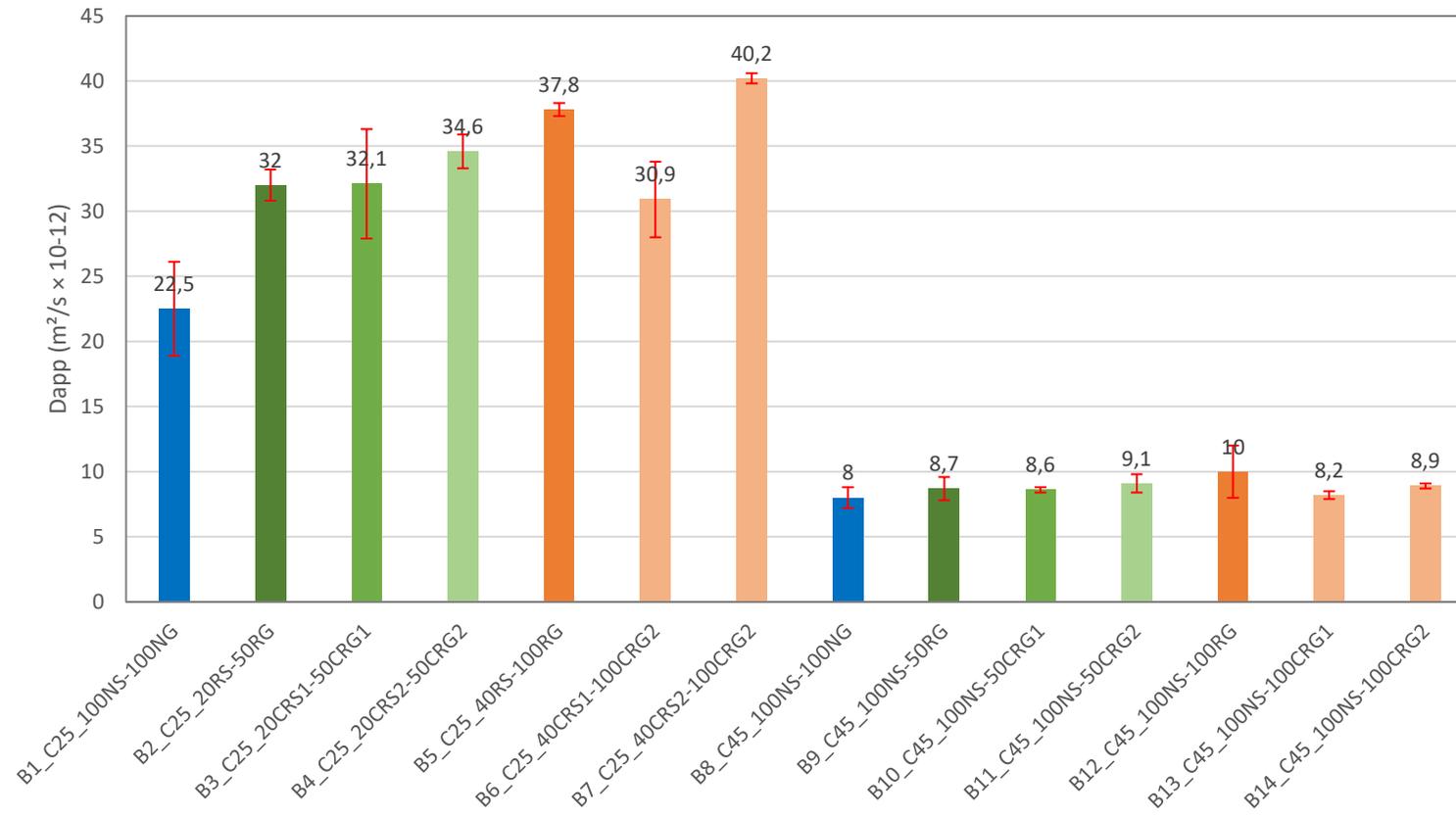
La carbonatation des GBR ne semble **pas avoir d'effets significatifs** sur les résultats.



2-2-2 : Propriétés de durabilité

Résistance à la pénétration des chlorures

Résultats de migration des ions chlorure pour les béton C25/30 et C45/55



Pas de tendance nette liée au procédé de carbonatation

Bonne performance des C45/55 y compris avec des taux de substitution élevés

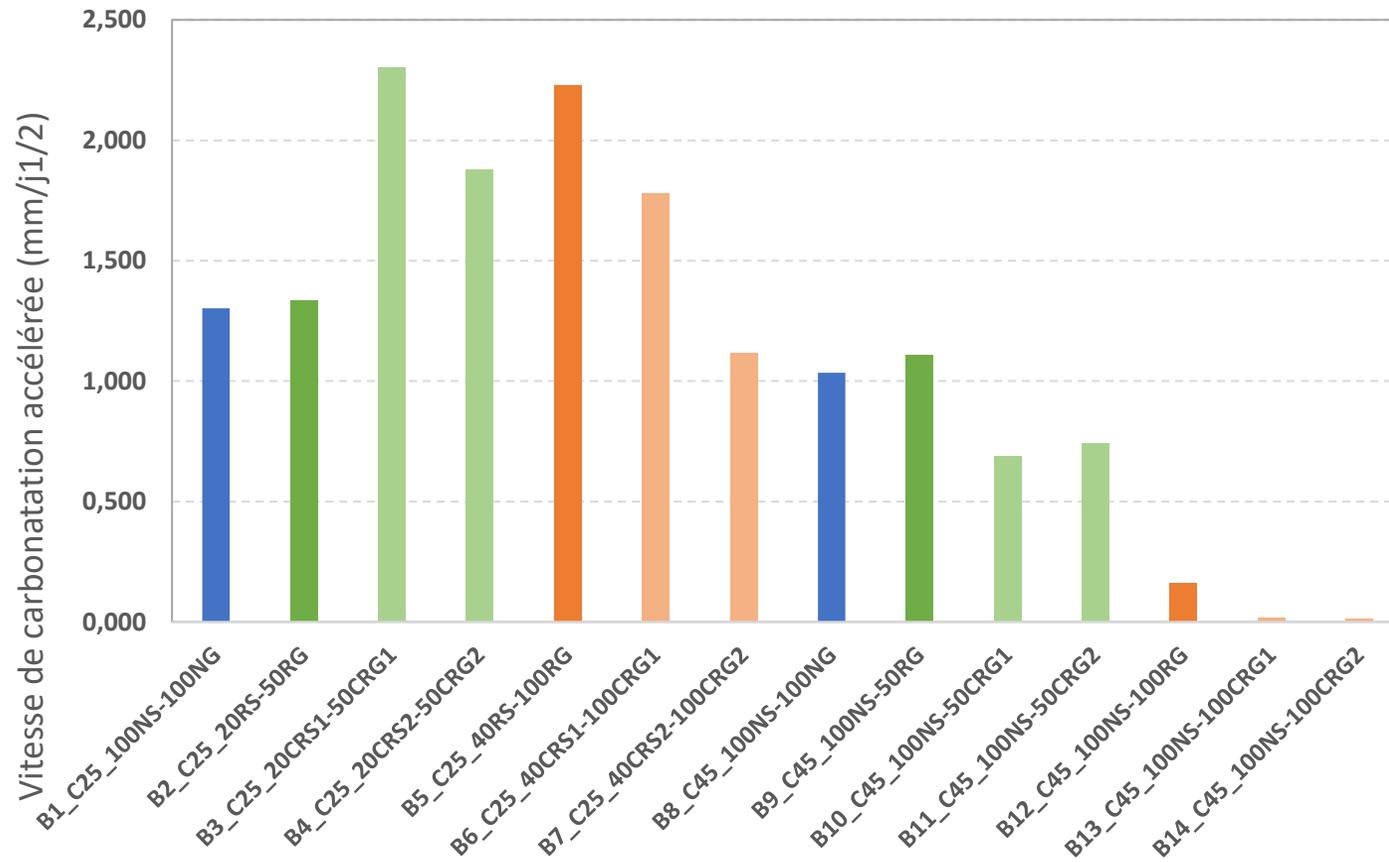


Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

2-2-2 : Propriétés de durabilité

Carbonatation accélérée

Résultats de carbonatation accélérée pour les béton C25/30 et C45/55



	R2
B1_C25_100NS-100NG	1,000
B2_C25_20RS-50RG	0,999
B3_C25_20CRS1-50CRG1	1,000
B4_C25_20CRS2-50CRG2	0,997
B5_C25_40RS-100RG	1,000
B6_C25_40CRS1-100CRG1	0,995
B7_C25_40CRS2-100CRG2	0,799
B8_C45_100NS-100NG	0,830
B9_C45_100NS-50RG	0,910
B10_C45_100NS-50CRG1	0,560
B11_C45_100NS-50CRG2	0,780
B12_C45_100NS-100RG	0,920
B13_C45_100NS-100CRG1	0,072
B14_C45_100NS-100CRG2	0,120

Pas d'effets significatifs des GBRC sur les vitesses de carbonatation accélérée



Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

2-2-3 : fabrication de voile BPE

- **3 voiles BPE à fabriquer**
 - Béton C25/30 avec GBRC1
 - Béton C25/30 avec GBRC2
 - Béton C25/30 avec GBR (non carbonatés)
- **Dimensions** : L6 m × H2,5 m × l0,2 m
- Caractérisation à l'état frais
- Analyse des parements
- Carottages pour la réalisation **d'essais de durabilité**

Pilote: LafargeHolcim



2-2-3 : fabrication de voile BPE

Compositions retenues pour les voiles BPE

Utilisation des formules C25/30 ($f_{cm,cyl 28} = 33$ à 38 MPa) :

► **Formule 1** **B2_C25_20RS-50RG :**

- 80% de sable naturel, 20% de sable recyclé non carbonaté
- 50 % gravillon naturel, 50 % gravillon recyclé non carbonaté

► **Formule 2** **B3_C25_20CRS1-50CRG1 :**

- 80% de sable naturel, 20% de sable GBRC n°1
- 50 % gravillon naturel, 50 % gravillon GBRC n°1

► **Formule 3** **B4_C25_20CRS2-50CRG2 :**

- 80% de sable naturel, 20% de sable GBRC n°2
- 50 % gravillon naturel, 50 % gravillon GBRC n°2



2-2-3 : fabrication de voile BPE

Voiles BPE coulés

Coulages des voiles
21 au 23/07/2021

Fabrication du béton :
Centrale BPE LHB
Serezin(69)

Lieu des coulages :
Tignieu (38)

45 minutes de transport



2-2-3 : fabrication de voile BPE

Voiles BPE coulés

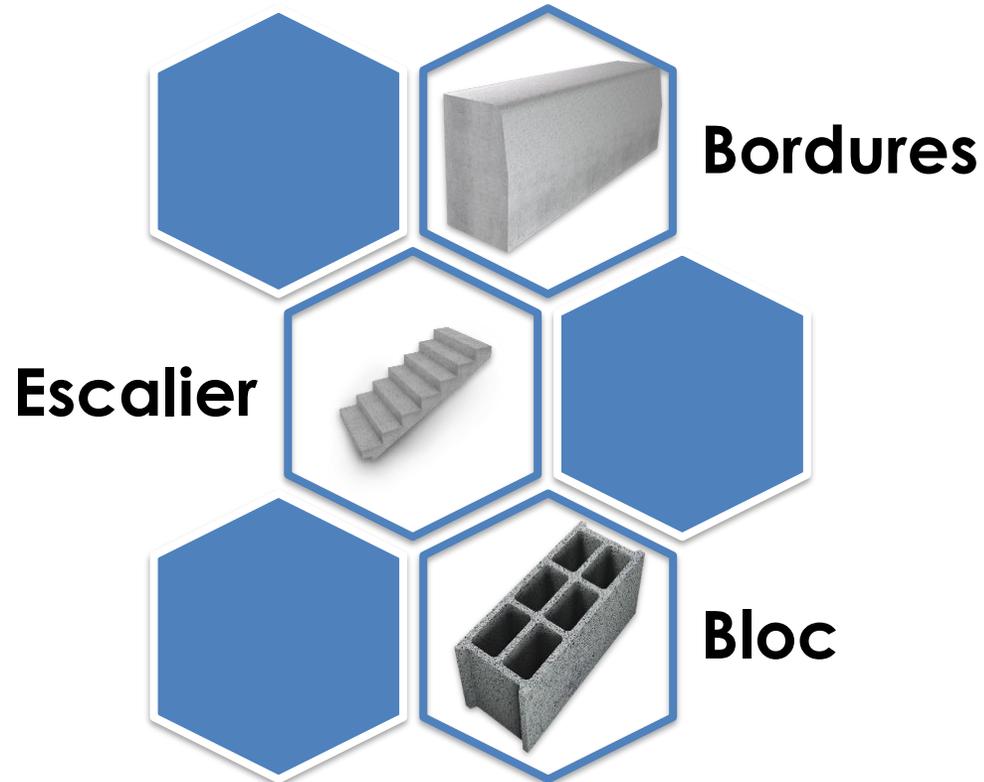
	Formule 1	Formule 2	Formule 3
Date coulage	21/07/2021	22/07/2021	23/07/2021
Affaissement T15 (mm)	220	230	220
Affaissement T90 (mm)	210	180	190
Masse Volumique T15	2,29	2,27	2,26
Air Occlus T15 (%)	1,7	2,1	1,9
Tbéton T15 (°C)	26	26	27
Text T15 (°C)	22	24	29
Rc28 (MPa)	32,4	35,7	29,6



Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

2-2-4 : Fabrication de produits préfabriqués

Fabrication de 3 produits préfabriqués :



Pilote : Cerib

Objectifs

Fabriquer avec la formule « classique » avec granulats naturels utilisés habituellement par l'usine et avec une formule avec des granulats recyclés carbonatés



Caractérisation de chacun des produits selon leur norme
Essais de durabilité pour les escaliers (GT2.2.2)



2-2-4 : Fabrication de produits préfabriqués

Fabrication des blocs

Usine de Point P – Ancenis (44)

Béton avec GBRC :

➔ Aspect des produits satisfaisant

➔ Formule avec **50% de substitution** en sable et gravier GBRC



Blocs réalisés sur le site d'Ancenis



2-2-4 : Fabrication de produits préfabriqués

Fabrication des blocs Résultats essais

Résistance à la compression des blocs

- Formule 0

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	

- Formule 1

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	



↪ Niveau de résistance mécanique équivalent



2-2-4 : Fabrication de produits préfabriqués

Fabrication des blocs Résultats essais

Résultats d'essais au gel

- Formule F0
- Formule F1



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



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

Observations après 25 cycles de gel-dégel

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

Texte de référence : annexe F de la norme NF EN 771-3+A1/CN (Décembre 2017)



2-2-4 : Fabrication de produits préfabriqués

Fabrication des bordures

Usine Stradal – Kilstett (68)

→ 3 formulations testées :

- **F1 : 0%** sable GBRC)
- **F2 : 50%** sable GBRC
- **F3 : 100%** sable GBRC



Résultats	F1	F2	F3
$R_{f,7j}$ (Mpa)	6,55	6,1	4,54
Abs (%)	3,7	6,3	9,1



Bordures réalisées sur le site de Kilstett (Formule F3)



2-2-4 : Fabrication de produits préfabriqués

Fabrication des escaliers

Usine PBM – Gilly sur Loire (71)

➔ 3 formulations testées :

- **F1 : Référence**
- **F2 : 20%** sable GBRC (NF EN 206/CN)
- **F3 : 25%** sable et 50% gravillon GBRC

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



Escalier réalisé sur le site de PBM71

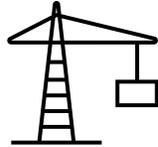


2.2.5 Analyses MEB

Objectifs

- Observations de l'auréole de transition et de la nouvelle pâte par MEB : fissurations, tailles et distributions des pores, taux de phase anhydres...
- Analyse par Image J de la répartition de la porosité et des phases anhydres
- Identifier la couche carbonatée

Travaux en cours



Réalisation: groupement GeM/UGE/Cerib

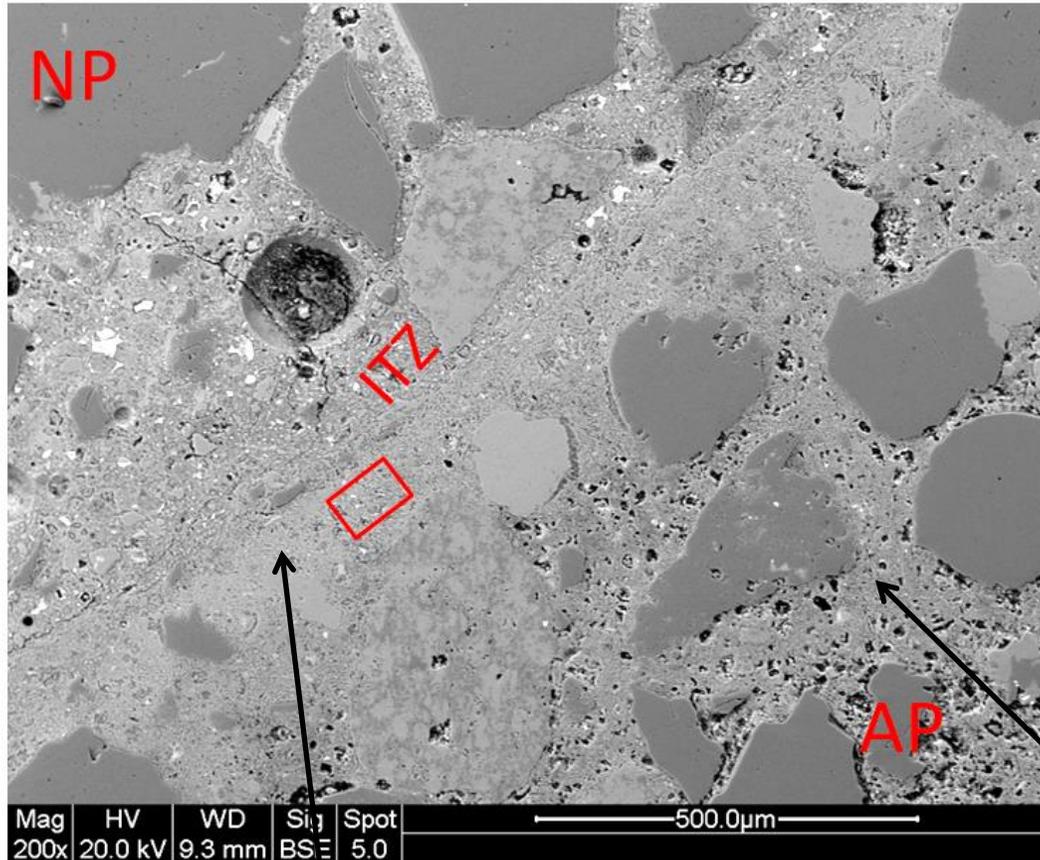
Pilote: Cerib



Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

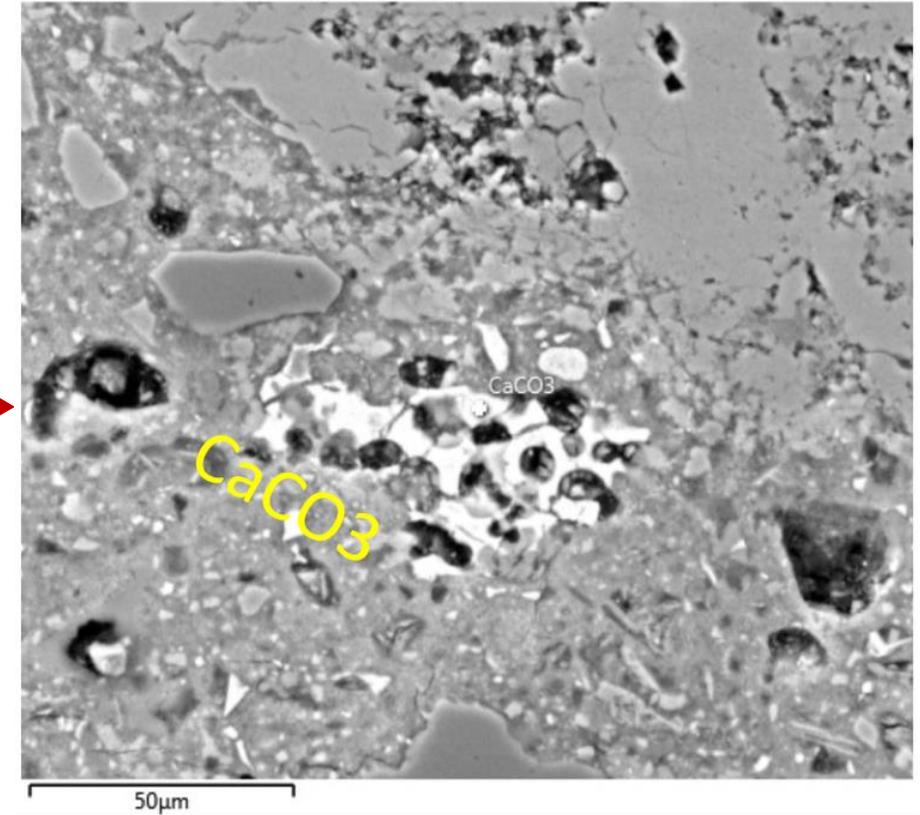
2.2.5 Analyses MEB

Observations C25 – UGE (Assia)



Zone moins poreuse

B3-C25 / 20CRS1 -50CRG1

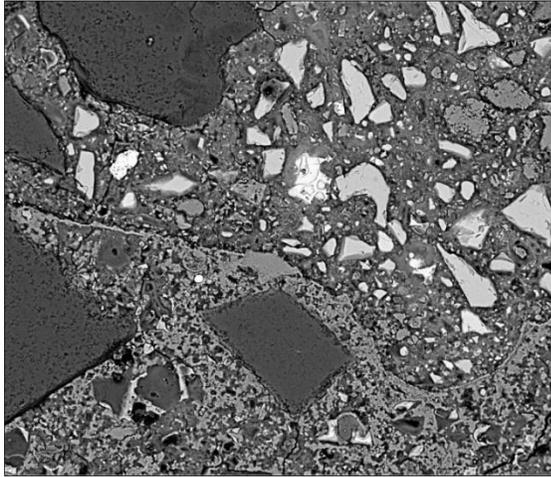


Zone très poreuse

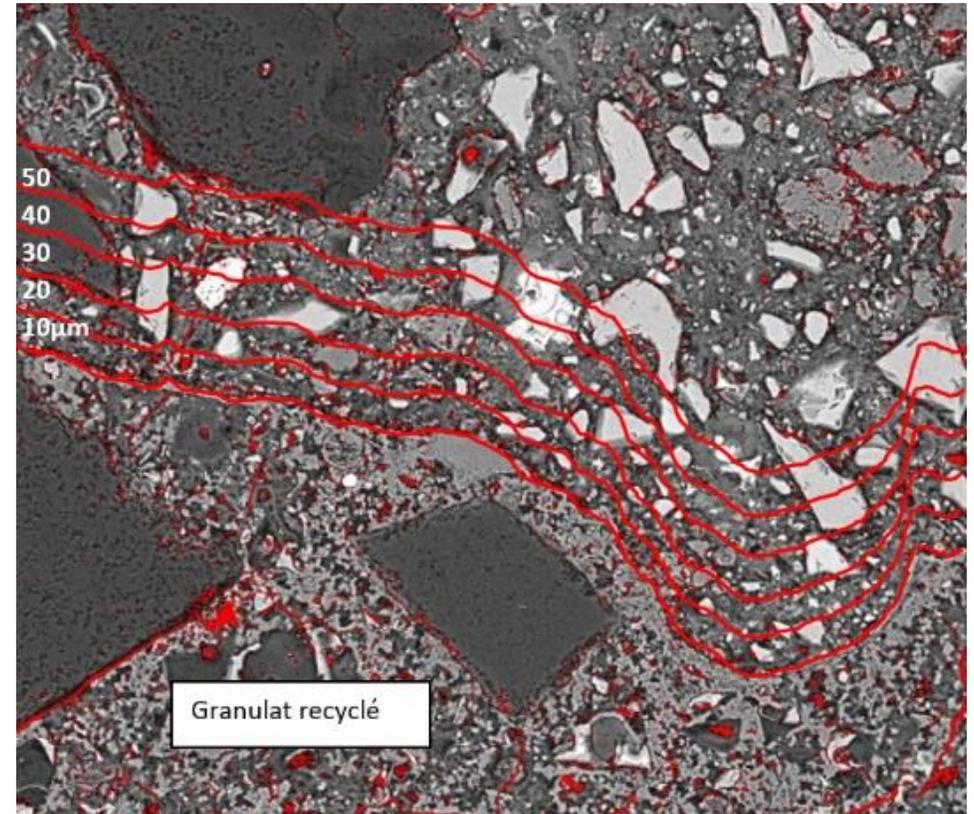
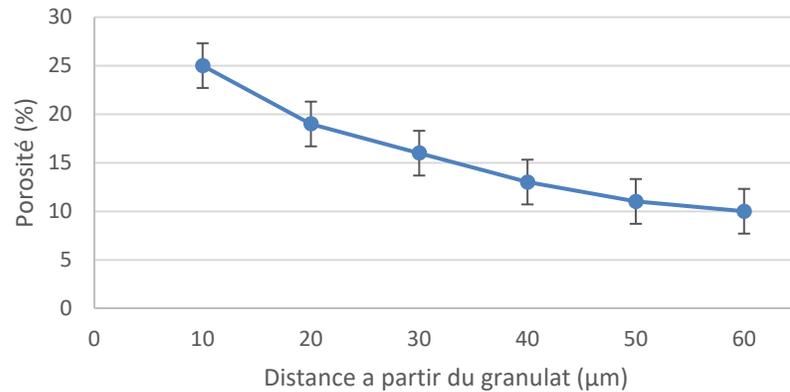


2.2.5 Analyses MEB

La démarche ITZ (Recybéton)



Profil de porosité d'un béton



Le béton recyclé, un puits de carbone!
27 Septembre 2022, Paris La Défense

Conclusions et Recommandations

- ➔ Pas d'effets significatifs des GBRC issus des démonstrateurs du projet national Fastcarb sur l'amélioration des propriétés des bétons à l'état frais ou durci, comparativement aux bétons avec granulats recyclés non carbonatés
 - ➔ Les possibilités d'optimisation des processus industriels pourraient conduire à retrouver un effet certain des granulats carbonatés sur ces propriétés tel que décrit dans la littérature
 - ➔ Les résultats acquis par le projet Fastcarb s'inscrivent en cohérence avec les seuils adoptés en France sur les granulats recyclés (NF EN 206/CN) qui peuvent s'appliquer aux granulats recyclés carbonatés
- ➔ *Les granulats recyclés carbonatés peuvent s'utiliser selon les mêmes conditions d'emploi que celles définies dans les recommandations du PN Recybéton et reprises dans la norme NF EN 206/CN.***



► Membres du GT2-2

