

Propriétés des bétons de granulats recyclés à l'état durci

Durabilité des bétons
Résistance au feu



Patrick Rougeau – CERIB
Fabienne Robert – CERIB





► Propriétés de transfert :

- Porosité
- Carbonatation
- Migration des chlorures
- Perméabilité

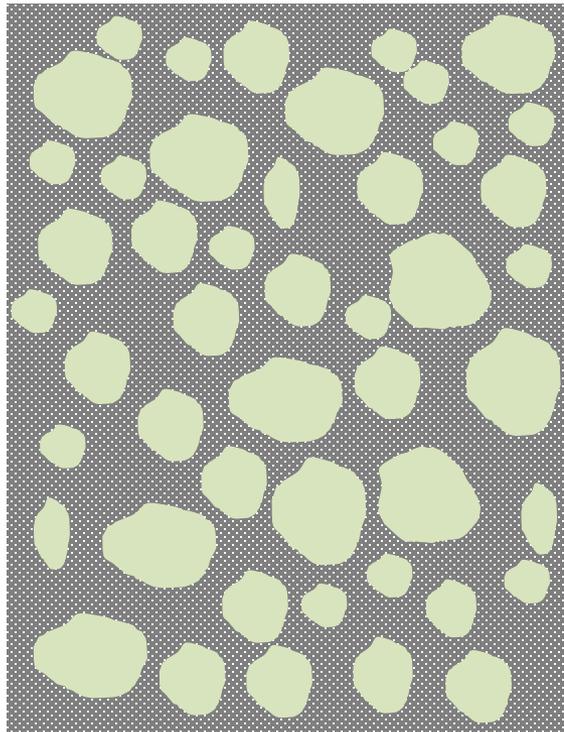
AD Tegger, M. Saillio (IFSTAR)
L. Schmitt, J. Mai-Nhu, P. Rougeau (CERIB)

► Gel/dégel

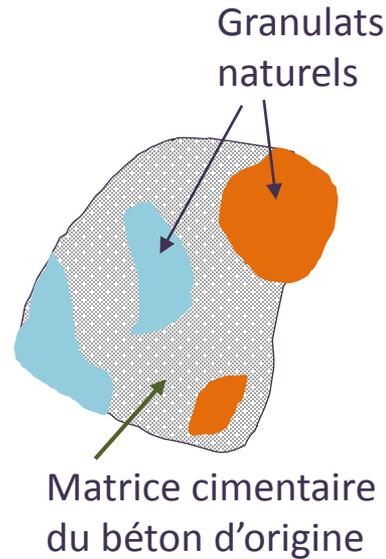
S. Omary, E. Ghorbel, G. Wardeh (L2MGC)
L. Schmitt, J. Mai-Nhu, P. Rougeau (CERIB)

► Résistance au feu

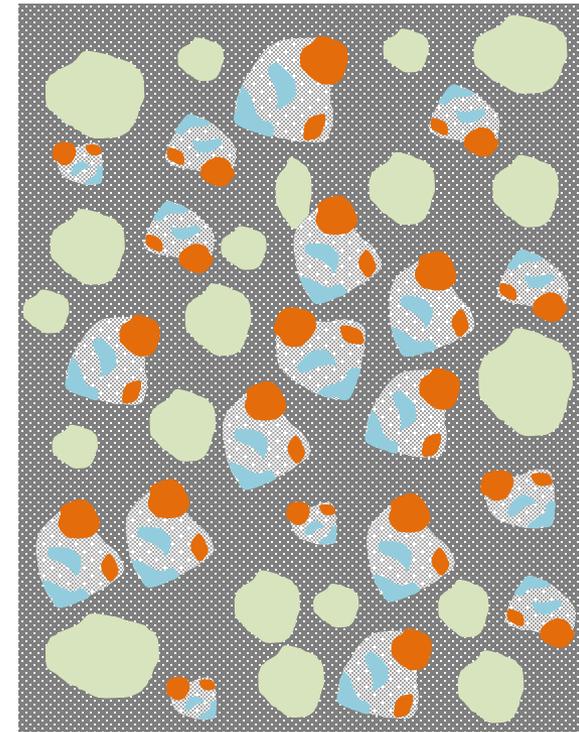
M. Auroy, C. Daval, C. Labetouille, F. Robert (CERIB)
AL. Beaucour, P. Pliya, A. Noumowé (L2MGC)



Béton à base de granulats naturels



Granulat recyclé



Béton à base de granulats recyclés

$$D_e = v_{p\hat{a}te} D_{p\hat{a}te} + v_{granulat} D_{granulat}$$

$$= v_{p\hat{a}te} D_{p\hat{a}te}$$

$$D_e = v_{p\hat{a}te} D_{p\hat{a}te} + v_{gNat} D_{gNat} + v_{gRecy} D_{gRecy}$$

$$= v_{p\hat{a}te} D_{p\hat{a}te} + v_{gRecy} D_{gRecy}$$



Les formulations étudiées :

Constituant (kg/m ³)	C25/30			C35/45			C45/55		
	BR	S30G30	G100	BR	S30G30	G100	BR	S30G30	G100
Eau	184	179	184	174	171	181	166	152	158
CEM II/A-L 42,5 N (C)	267	282	279	299	324	336	390	371	369
Addition calcaire (A)	45	49	70	58	44	53	100	65	73
SN (0/4)	772	492	794	769	495	782	732	483	775
SR (0/4)	0	233	0	0	216	0	0	229	0
GN (4/10)	264	167	0	264	169	0	250	164	0
GR (4/10)	0	151	161	0	143	158	0	148	157
GN (6,3/20)	811	539	0	808	546	0	769	529	0
GR (10/20)	0	167	691	0	164	682	0	162	676
Superplastifiant (% / ciment)	0,14	0,13	0,08	0,29	0,66	0,25	1,23	1,28	0,92
Affaissement (cm)	20	20	20	20	20	20	20	19	19
Air entrainé (%)	3	2,5	1,5	1,3	1,9	1,9	2,4	3	3,1
E_{eff}/L avec $L = C+A$	0,57	0,54	0,53	0,49	0,46	0,47	0,34	0,35	0,36



Porosité de la pâte cimentaire en fonction du rapport E/C, modèle de Powers (2004) :

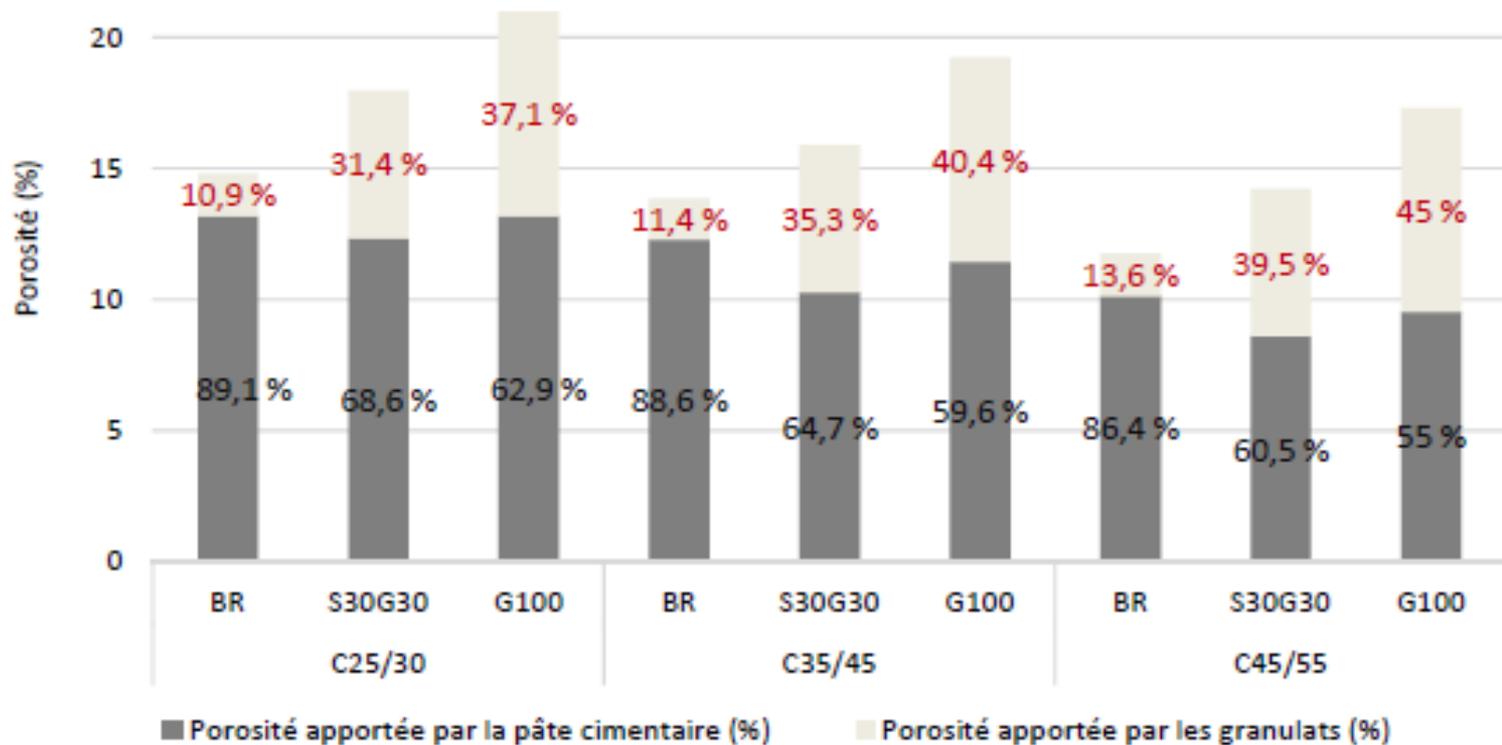
$$P_{p\hat{a}te} = \frac{\frac{E_{eff}}{C}}{\frac{E_{eff}}{C} + 0,32} - 0,53 \cdot \alpha \left(1 - \frac{\frac{E_{eff}}{C}}{\frac{E_{eff}}{C} + 0,32} \right)$$

Avec α le taux d'hydratation du ciment calculé grâce à la formule de Waller (1999) :

$$\alpha = 1 - e^{\left(-3,3 \frac{E_{eff}}{C} \right)}$$



Porosité

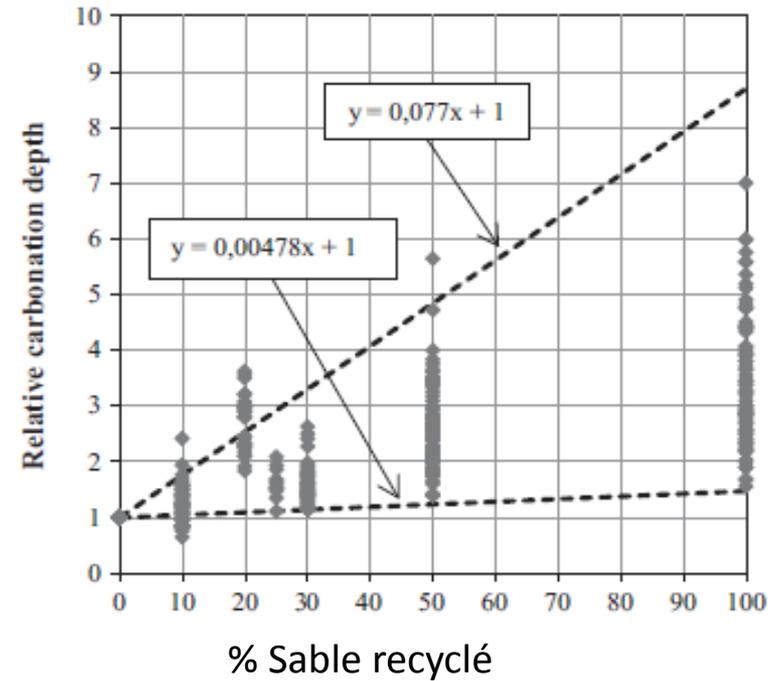
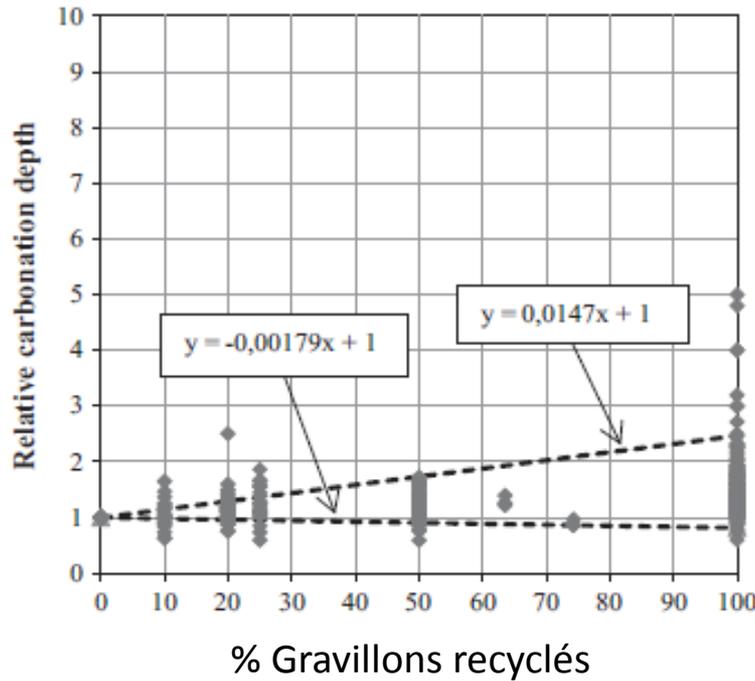


Porosité accessible à l'eau des bétons à base de granulats recyclés



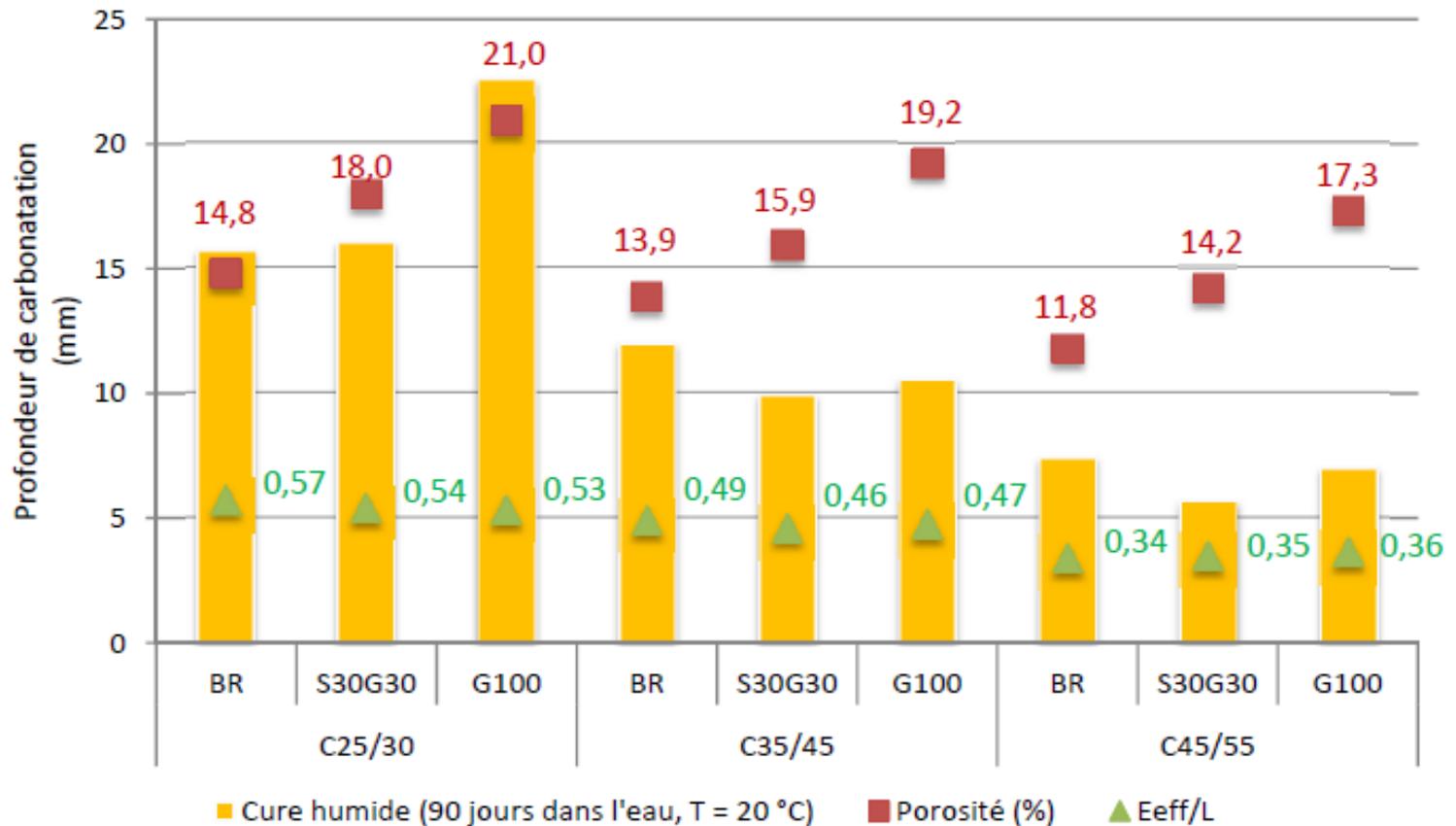


Carbonatation

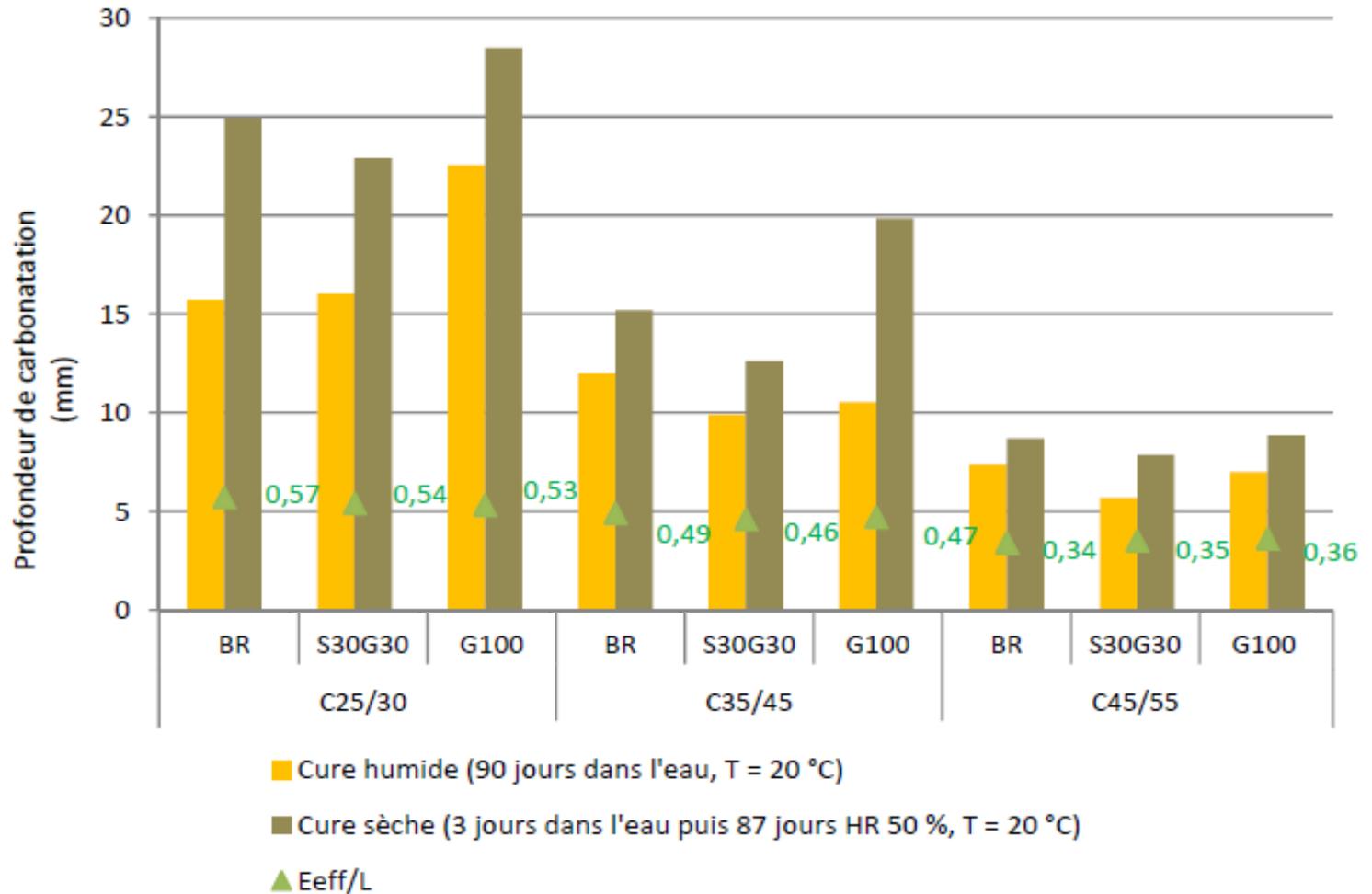


Synthèse de données sur la carbonatation de bétons à base de granulats recyclés (Silva et al, 2015)

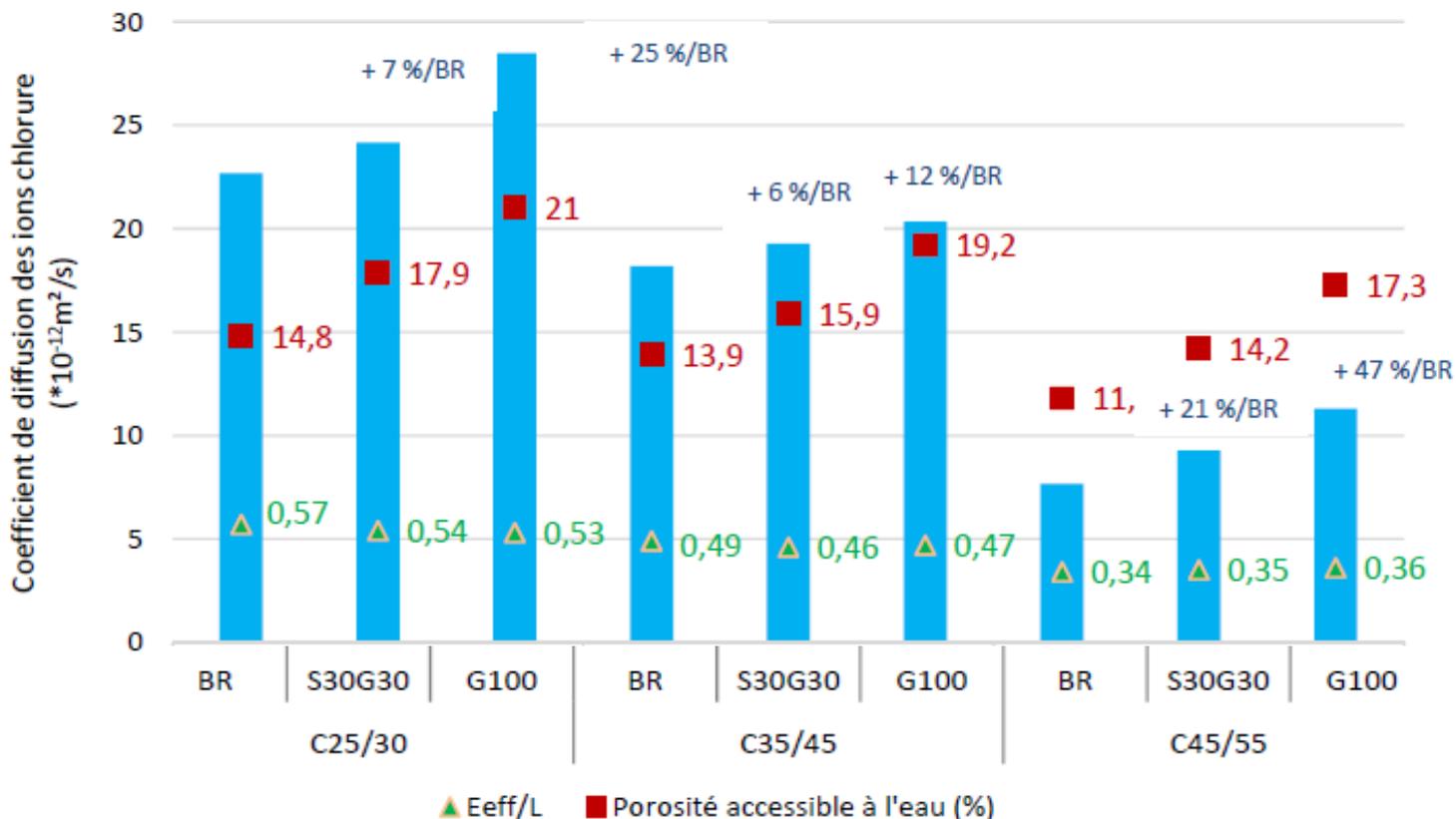




Profondeur de carbonatation des bétons en fonction des classes de résistance mécanique et des taux d'incorporation de granulats recyclés – prCEN/TS 12390-12 (4% CO₂)

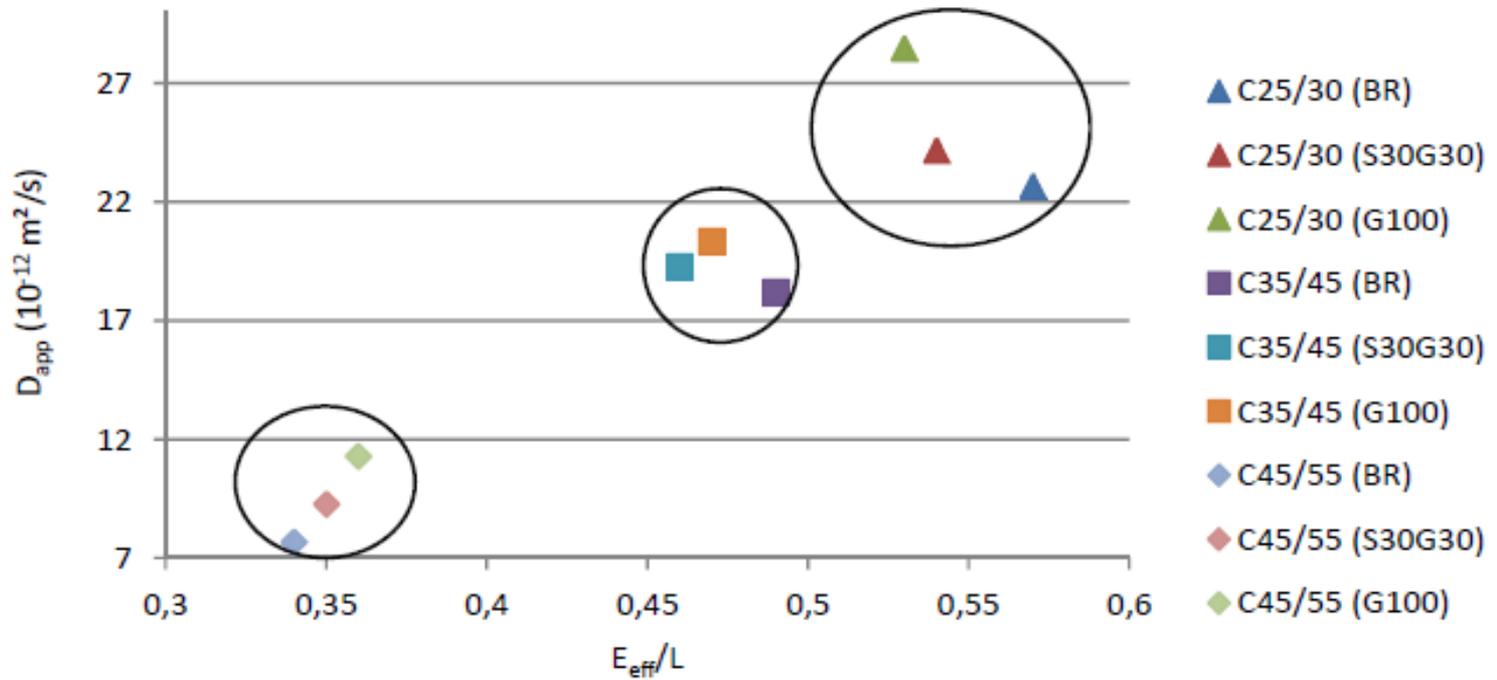


Influence de la cure sur les profondeurs de carbonatation – prCEN/TS 12390-12 (4% CO₂)



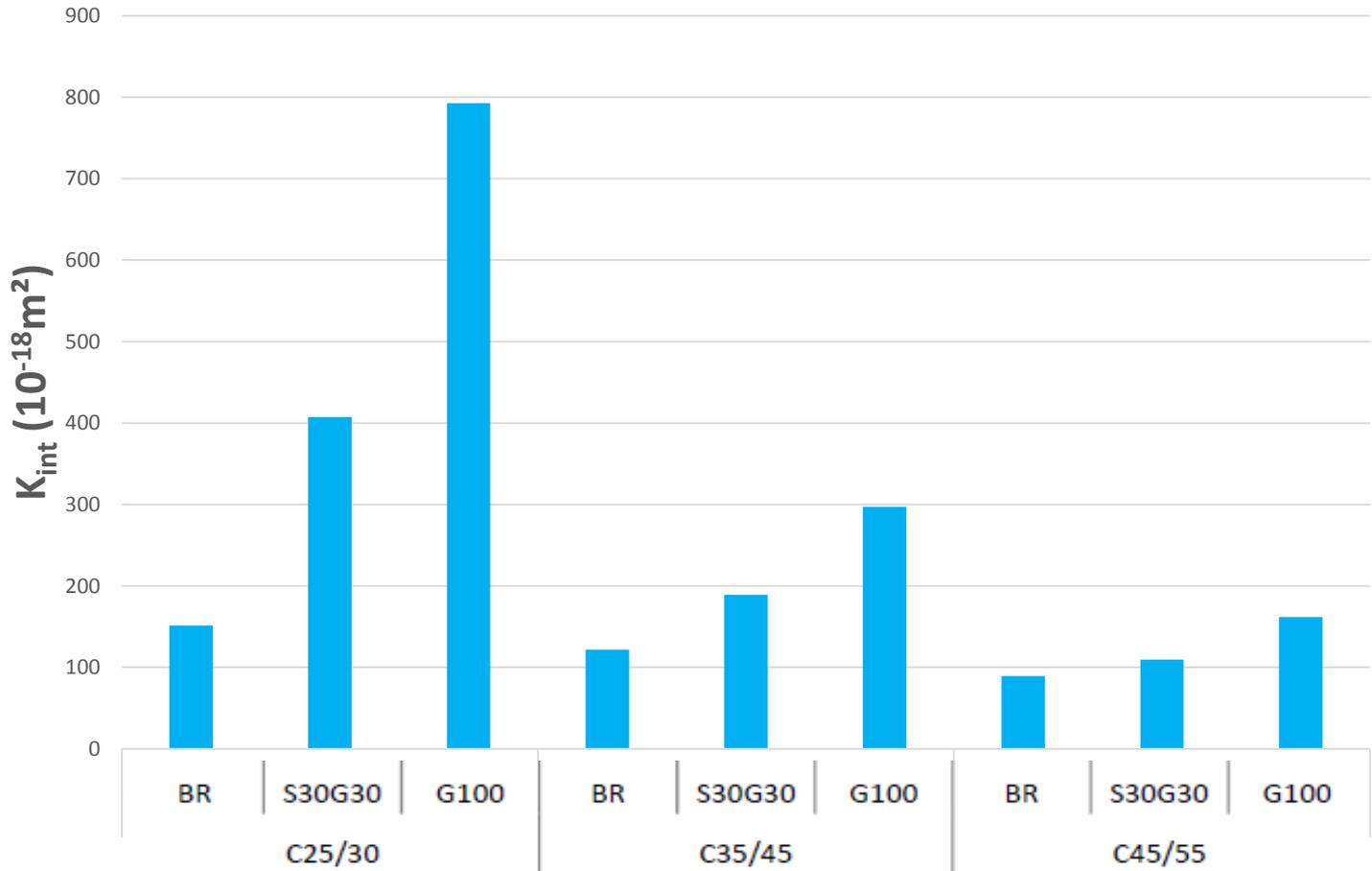
Coefficients de diffusion apparent des ions chlorure mesurés selon la norme XP P 18-462





Coefficient de diffusion apparent des ions chlorure en fonction du rapport E_{eff}/L





Perméabilité à l'oxygène



► Conclusion :

- Hétérogénéité des résultats dans la littérature liée à la diversité des granulats recyclés utilisés, les différences de méthodologies retenues pour les paramètres de composition et la diversité des modes opératoires utilisés
- Les granulats recyclés diminuent en général les performances des bétons relatives aux propriétés de transfert de manière prévisible
- En optimisant les compositions (E_{eff}/L notamment), il est facile même à fort taux de substitution de réaliser des bétons aussi résistants à la carbonatation et à la migration des chlorures
- Effets de paroi → lorsque la matrice cimentaire du nouveau béton est compacte, elle agit comme une barrière diffusionnelle
- Effet positif lié à la présence d'eau dans les granulats recyclés : un effet de second ordre



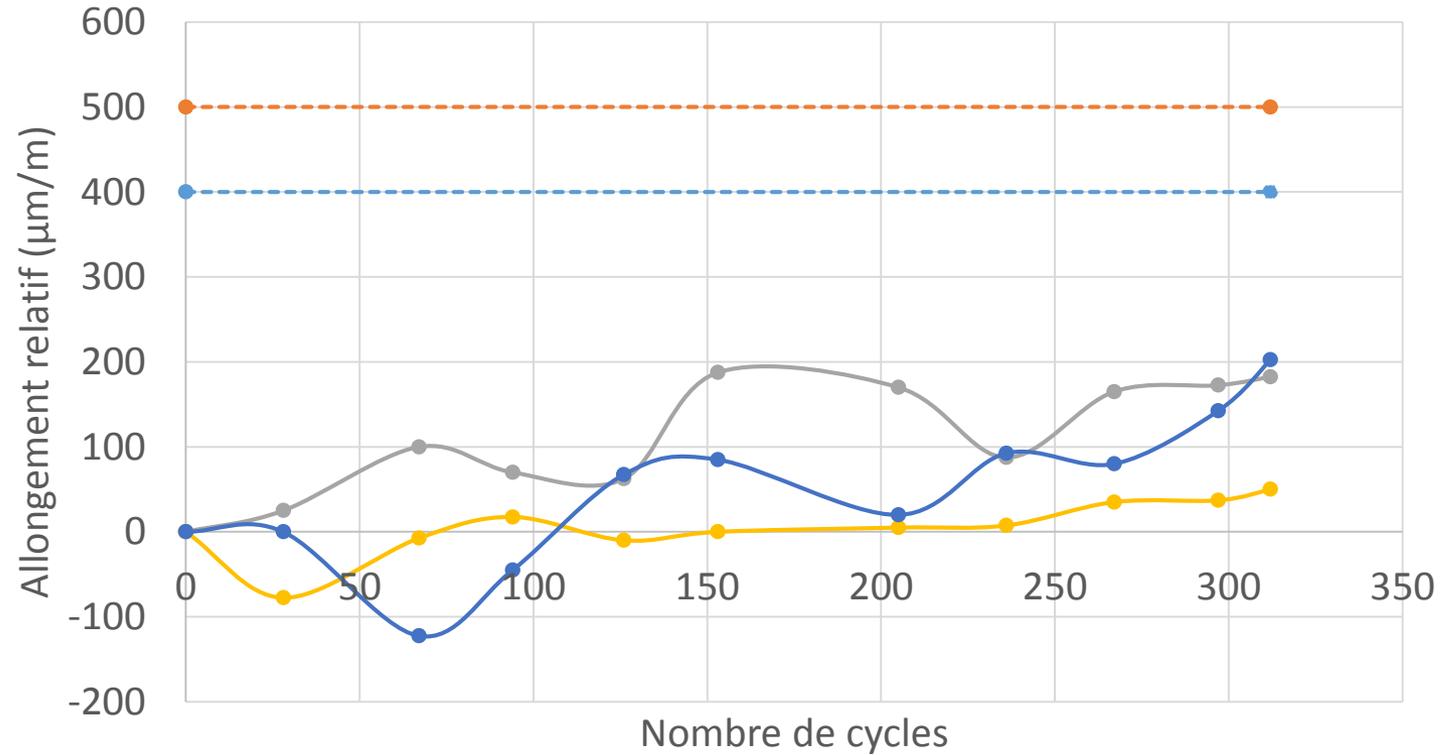


C30/37	OR-OR	20R-30R	30R-30R
Eau totale	161	193	197
Ciment Cem II/A-L 42,5 N de Rochefort	342	334	350
Filler Calcaire Betocarb HP OG	39	38	40
Sable Sandrancourt	739	628	535
Sable recyclé 0/4	0	157	229
Gravillon Givet 4/10	254	134	157
Gravillon recycle 4/10	0	255	281
Gravillon Givet 6,3/20	777	461	497
Superplastifiant MC PowerFlow 3140	0,63	0,61	0,81
Agent entraîneur d'air	0,11	0,12	0,09
Eau efficace (kg/m ³)	151	147	154
E _{eff} /C	0,44	0,44	0,44
E_{eff}/L_{eq}	0,44	0,44	0,44
Affaissement (cm)	19,6	20	18
Air occlus (%)	4,8	7	4,2
Masse volumique réelle mesurée à l'état frais (kg/m ³)	2314	2190	2286





Allongement relatif



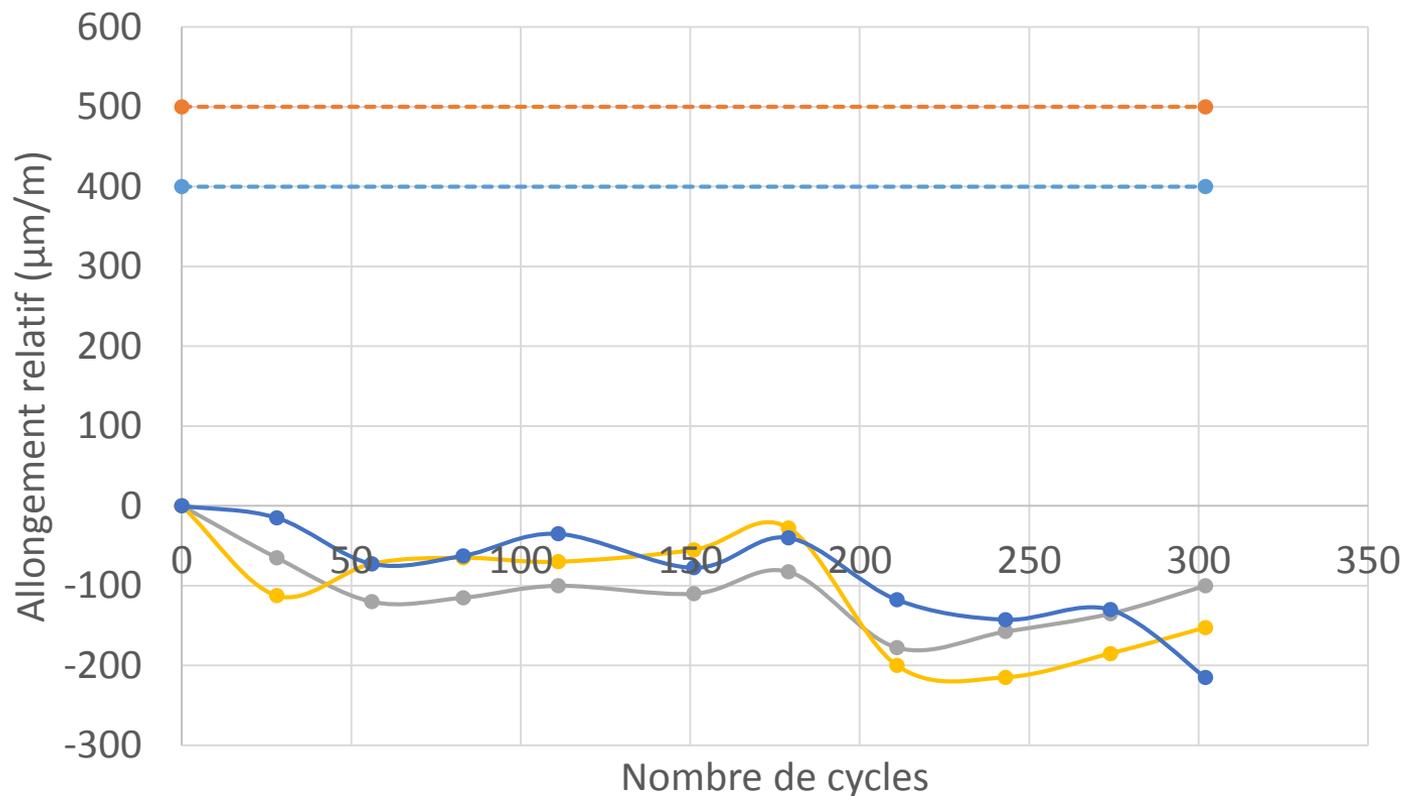
Etude et convenue Contrôle 0R0R 20R30R 30R30R

Résistance au gel interne sévère – NF P 18-424





Allongement

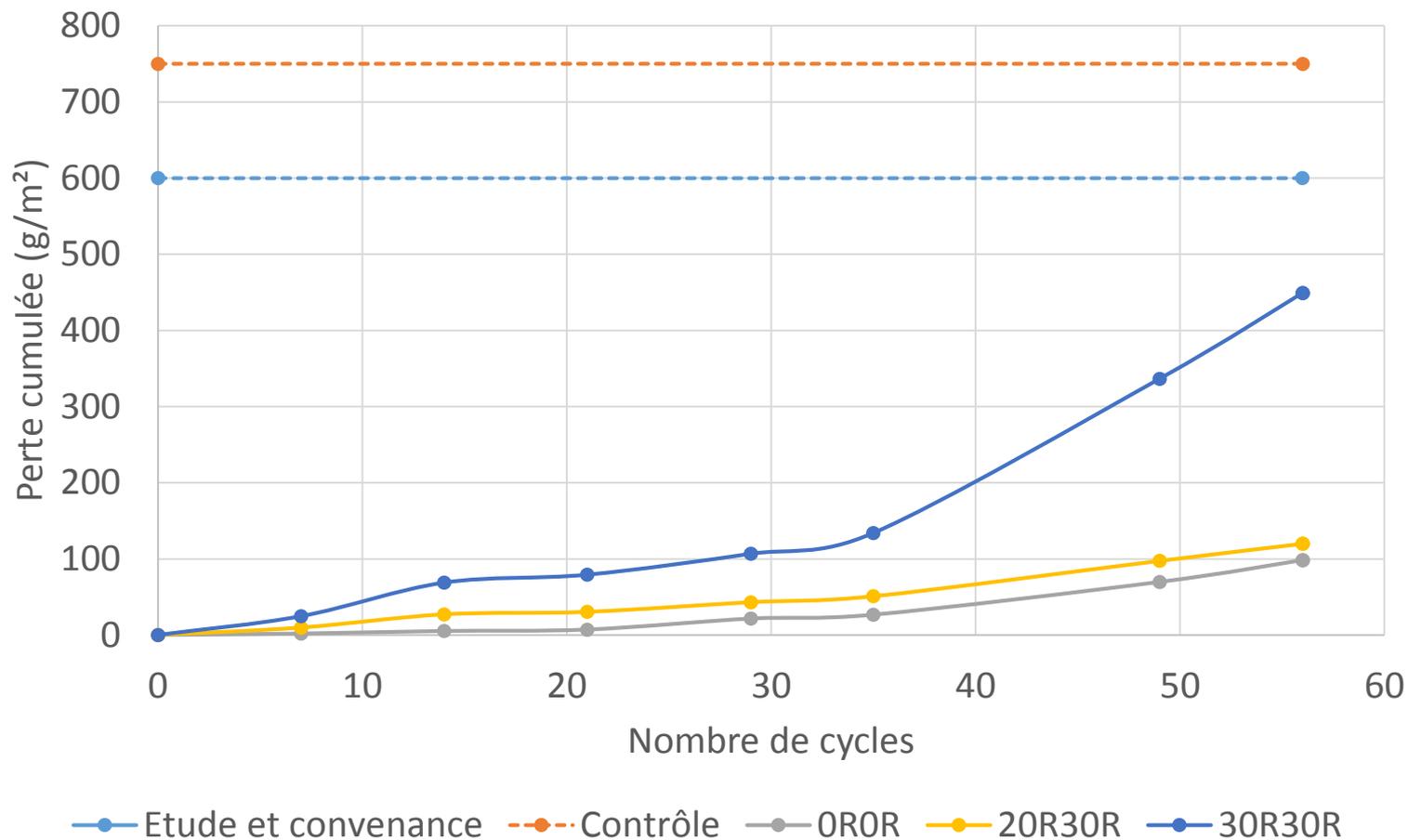


Etude et convenance Contrôle 0R0R 20R30R 30R30R

Résistance au gel interne modéré – NF P 18-425



Ecaillage



Résistance à l'écaillage – XP P 18-420



RECYBETON EFFET DE L'INCORPORATION DES GRANULATS RECYCLES SUR LA DURABILITE VIS-A-VIS DU GEL/DEGEL DES BETONS **ANR** **ECOREB**

Safillah OMARY¹, Elham GHORBEL² & George WARDEIF³
¹ L2MGC - Université de Caen Normandie, 5 Mail Guy Lussac 93000 Normandie sur Oise
 Safillah.Omary@univ-caen.fr, ² Elham.Ghorbel@univ-caen.fr, ³ George.Wardeif@univ-caen.fr

INTRODUCTION

- Formulations des bétons
- Norme NF P 18-424 et cycles imposés
- Validation de l'approche expérimentale des essais gel/dégel
- Indicateurs normalisés [NF P 18-424]
 - Variation de l'allongement relatif
 - Variation du carré de la fréquence de résonance
- Aspect visuel
- Conclusions

Formulations des bétons

C35/45 sR-sR

- Taux de substitution volumique en sable recyclé
- Taux de substitution volumique en graviers recyclés

Formulation	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45
RECYBETON	100.00	100.100	100.1000	100.1000
s (%)	0	33	53	100

C35/45 sR-sR-2%

- Taux de substitution volumique en graviers recyclés (0% à 100%)

Formulation	0% de sable recyclé			0% de graviers recyclés		
	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45
RECYBETON	100.00	100.100	100.1000	100.100	100.1000	100.1000
s (%)	0	33	53	0	33	53

Norme NF P 18-424 et cycles imposés

- Cycle gel/dégel dans la chambre modifiée et dans l'environnement climatique de 90/90

Validation de l'approche expérimentale des essais gel/dégel

- Allongement relatif
- Fréquence de résonance

Indicateurs normalisés [NF P 18-424]

- Variation de l'allongement relatif
- Variation du carré de la fréquence de résonance

Aspect visuel

Après 300 cycles gel/dégel

CONCLUSIONS :

- La vitesse de refroidissement et de réchauffement ainsi que la durée de cycle d'enlèvement par les réservoirs de régulation qui sont le facteur.
- La composition des granulats recyclés affecte la dégradation par les cycles gel/dégel.
- L'indicateur de l'agent résiduel est plus que les formulations actuelles établissant la résistance au gel/dégel des bétons.
- La mesure des carrés des fréquences de résonance est un indicateur plus précis que l'allongement relatif.
- L'ajout d'un agent résiduel d'un mélange d'appariement des liants internes et le changement de méthode.
- Les formulations C35/45 sR-sR et C35/45 sR-sR-2% avec des agents en air ont un effet de 4% sur l'évaluation des cycles gel/dégel vis-à-vis des critères de durabilité recommandés par la norme NF P 18-424.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier l'ANR pour le soutien financier.

IREX ANR

Thèse de Safillah OMARY (L2MGC)
 Soutenance 21 mars prochain



Conclusion :

- La résistance au gel des granulats recyclés dépend des caractéristiques du béton d'origine
- Les bétons sont résistants au gel (interne, écaillage) à condition :
 - de vérifier la non gélévitité des granulats recyclés
 - de respecter les règles de formulation de la norme NF EN 206/CN (dosage en $\text{Liant}_{\text{éq}}$, $E_{\text{eff}}/\text{Liant}_{\text{éq}}$, air entrainé...)





Propension à l'écaillage

Essais sur dalles

CERIB (1)

Propriétés thermo-physiques

Transfert de chaleur

Université de Cergy Pontoise (2)

CERIB (1)

**Dimensionnement au feu
des structures en béton de
granulats recyclés ?**

Résistance au feu

Essais sur poutres

CERIB (1)

Propriétés thermo-mécaniques

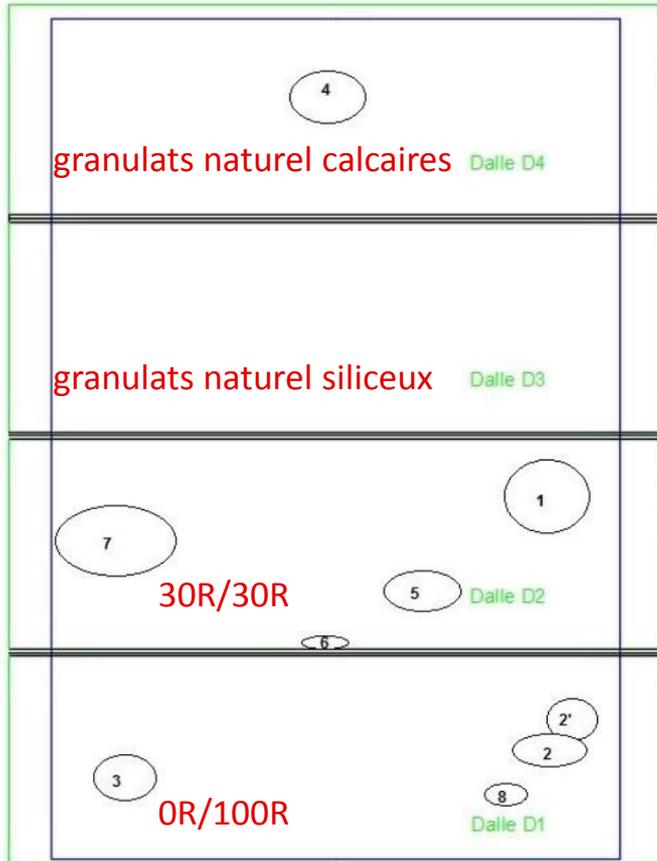
CERIB (1)

CERIB (1) : Martin AUROY, Clémence DAVAL, Christian LABETOULLE, Fabienne ROBERT

Université de Cergy Pontoise (2) : Anne-Lise BEAUCOUR, Prosper PLIYA, Albert NOUMOWÉ



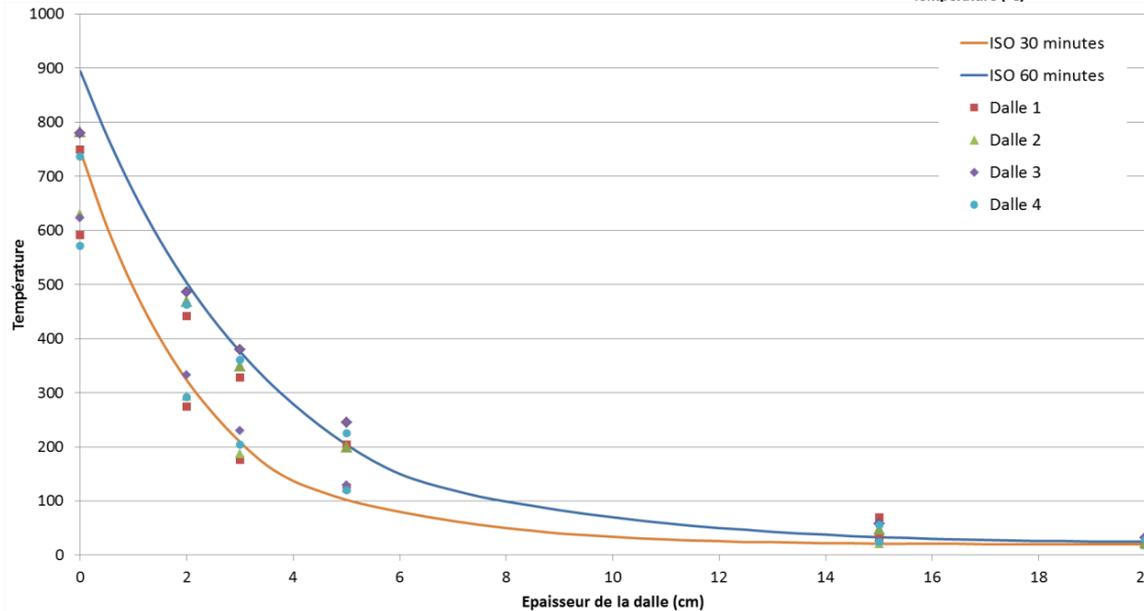
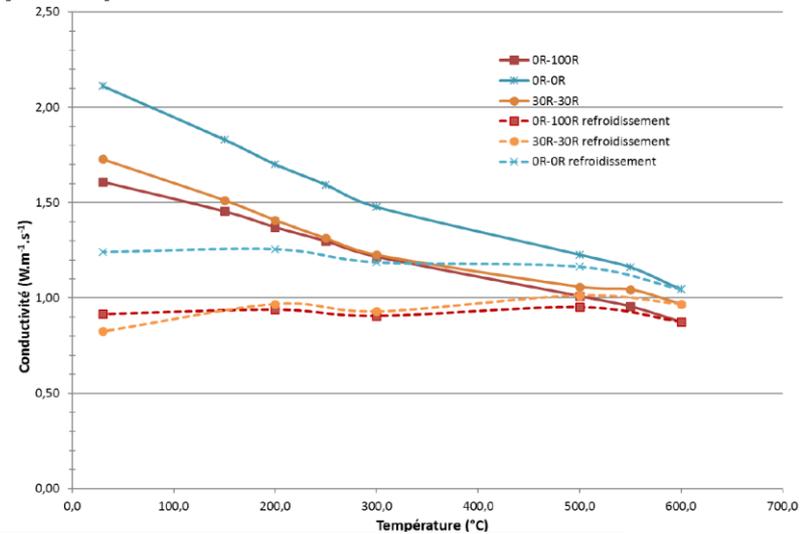
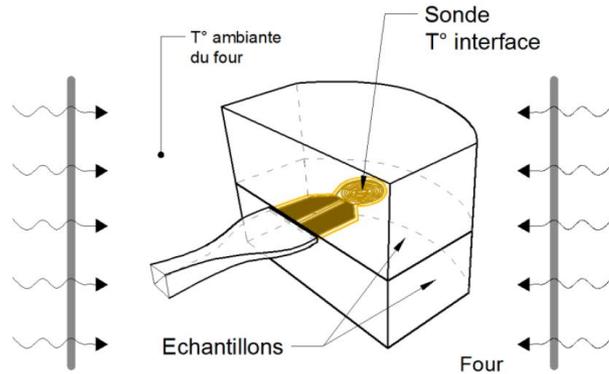
- Evaluation de la propension à l'écaillage 1h sous feu conventionnel
 - Dalles 4,6 m × 1,5 m × 0,2 m



	Rc28 (Mpa)	Teneurs en eau
Dalle D4	44 ± 3	4,0 %
Dalle D3	36 ± 1	4,3 %
Dalle D2	32 ± 2	4,6 %
Dalle D1	40 ± 2	5,6 %



► Propriétés thermophysiques

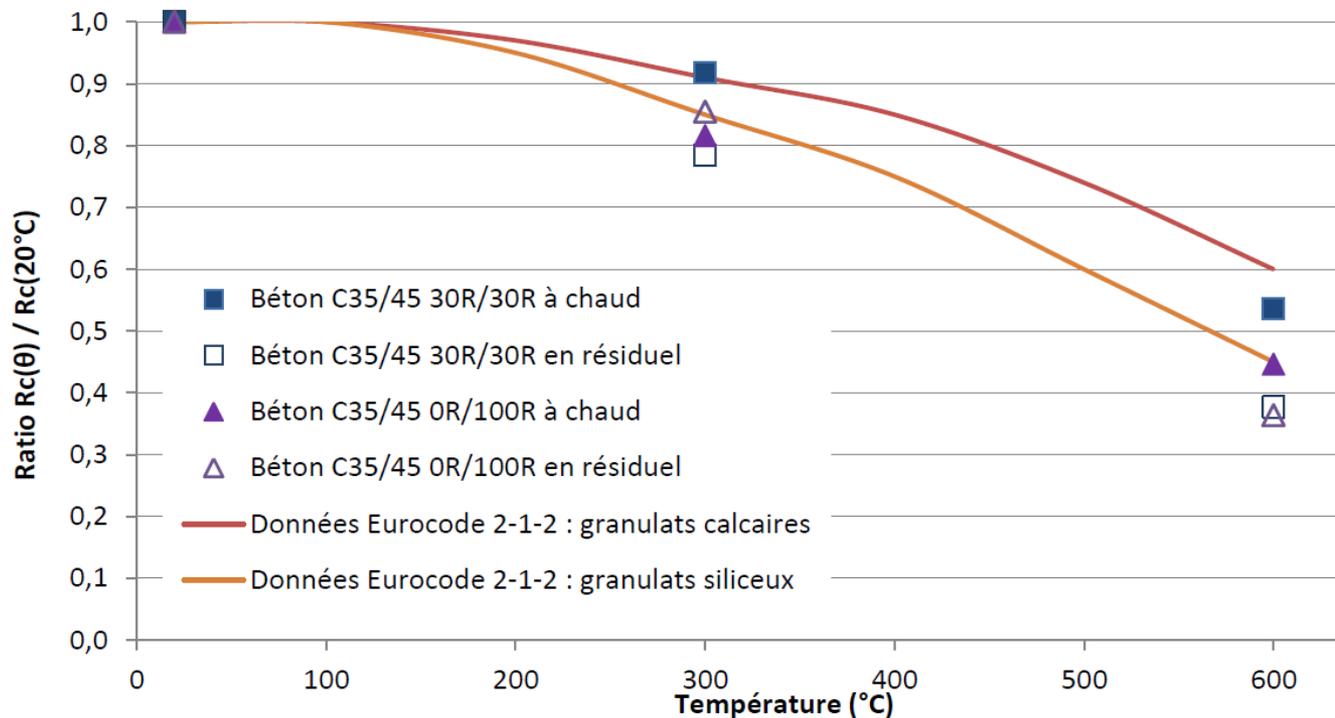
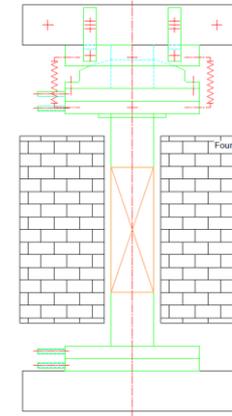


Profils thermiques dans les dalles testées sous feu conventionnel

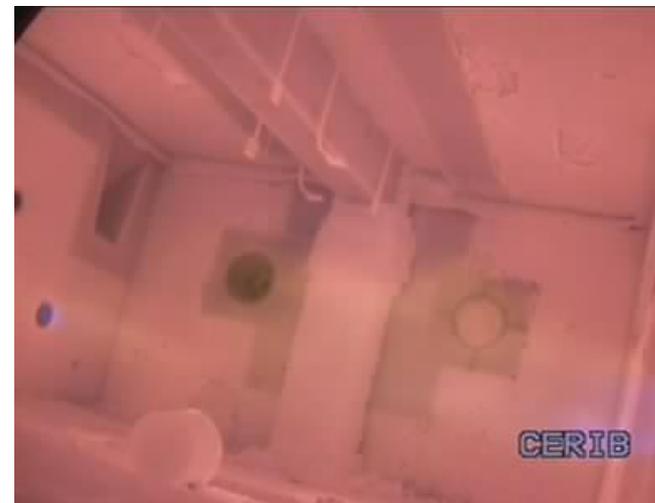
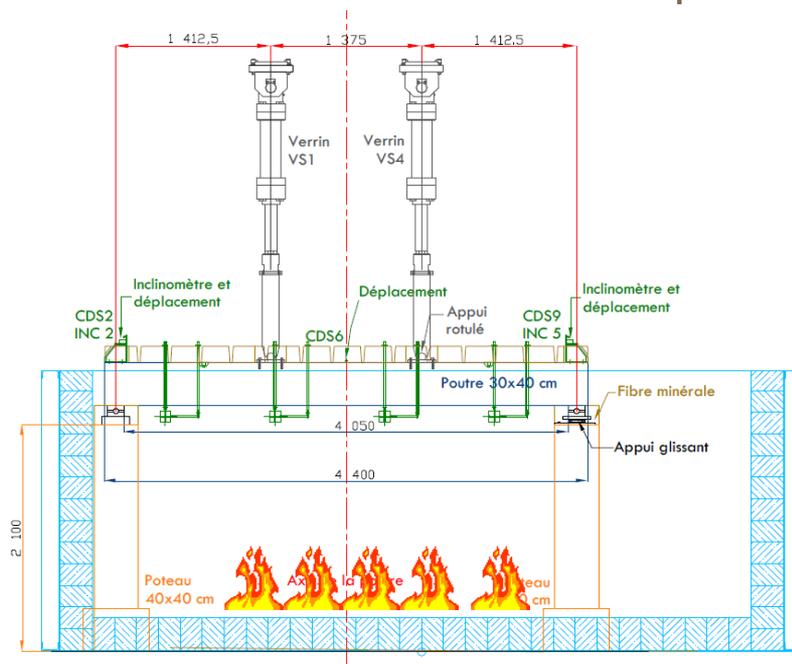


► Propriétés thermo-mécaniques

BETON	R _c (20°C) EN MPA
C35/45 OR/100R	34,4 ± 0,9
C35/45 30R/30R	39,3 ± 1,9



► Résistance au feu sur poutres



	Calcul selon l'Eurocode 2	Essai Poutre 0R/100R	Essai Poutre 30R/30R
A froid	108,3 kN.m <i>Coefficients de sécurité des matériaux pris égaux à 1</i>	126,6 kN.m	119,9 kN.m
A 60 minutes	69,7 kN.m	106,4 kN.m	116,2 kN.m
Ratio $M_{R,fi}/M_R$	0,64	0,84	0,97
<i>Arrêt des brûleurs à 60 minutes puis chargement jusqu'à rupture</i>			



► Conclusions

- Les bétons de granulats recyclés étudiés ont présenté quelques éclats superficiels et localisés non préjudiciables vis à vis de la stabilité de l'élément testé
- La conductivité thermique des bétons de granulats recyclés étudiés apparaît plus faible que celle des bétons de granulats naturels, le calcul de transfert thermique selon l'Eurocode 2-1-2 peut être appliqué
- La résistance au feu de deux poutres de portée 4,2 m a été évaluée selon la norme d'essai NF EN 1365-3 et analysée de manière comparative avec un dimensionnement selon l'Eurocode 2-1-2. Les moments résistants obtenus expérimentalement à l'issue des essais sont supérieurs à ceux calculés selon l'Eurocode 2-1-2
- Les premiers résultats de caractérisation thermo-mécanique montrent que la courbe d'affaiblissement correspondant aux granulats siliceux de l'Eurocode 2-1-2 est utilisable pour les bétons étudiés

