



HAL
open science

Propriétés liées à la durabilité: Chapitre 12. In partie IV: "Le béton recyclé"

David Bulteel, Martin Cyr, Assia Djerbi Tegguer, Elhem Ghorbel, André Lecomte, Nordine Leklou, Thibault Lenormand, Jonathan Mai-Nhu, Jean Michel Mechling, Isabelle Moulin, et al.

► To cite this version:

David Bulteel, Martin Cyr, Assia Djerbi Tegguer, Elhem Ghorbel, André Lecomte, et al.. Propriétés liées à la durabilité: Chapitre 12. In partie IV: "Le béton recyclé". Propriétés liées à la durabilité: Chapitre 12. In partie IV: "Le béton recyclé", IFSTTAR, pp.293-321, 2018, ISBN 978-2-85782-747-4. hal-02958010

HAL Id: hal-02958010

<https://hal.science/hal-02958010>

Submitted on 3 Nov 2020

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.

Chapitre 12.

Propriétés liées à la durabilité

P. Rougeau¹, L. Schmitt¹, J. Nai-Nhu¹, A. Djerbi², M. Saillio², E. Ghorbel³, J.-M. Mechling⁴, D. Bulteel⁵, M. Cyr⁶, A. Lecomte⁴, N. Leklou⁷, R. Trauchessec⁴, I. Moulin⁸, T. Lenormand⁸, O. Amir⁷

Résumé – Ce chapitre présente les travaux réalisés dans le cadre du Projet National RECYBETON et de l'ANR ECOREB pour étudier l'influence des granulats de béton recyclé (GBR) sur les propriétés de durabilité des bétons. De nombreuses études antérieures ont montré que les GBR sont plus poreux que les granulats naturels et qu'ils peuvent, de ce fait, altérer les propriétés de durabilité des bétons.

Les propriétés de durabilité étudiées sont celles liées aux risques de corrosion des armatures (carbonatation, migration des chlorures, perméabilité à l'air, porosité), à la résistance aux cycles de gel/dégel, à la réaction alcali-silice et à la présence de sulfates (formation d'ettringite/thaumasite).

Les résultats montrent que la porosité accessible à l'eau n'est pas un indicateur de durabilité suffisant à lui seul pour caractériser le risque de corrosion. Il est plus pertinent de considérer aussi le coefficient de diffusion des chlorures et la résistance du béton à la carbonatation.

De façon prévisible, les GBR modifient les propriétés de transfert du béton, selon leur porosité, le taux de substitution et la compacité de la matrice cimentaire du nouveau béton. En optimisant la formulation (diminution du rapport E/L notamment), on peut cependant obtenir des bétons aussi résistants que les bétons constitués uniquement de granulats naturels.

La résistance au gel des GBR dépend des caractéristiques du béton parent. Les bétons de GBR résistent donc aux cycles de gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçage dès lors que les GBR sont intrinsèquement résistants au gel et que les règles de formulation habituelles (teneur en liant, rapport E/L, teneur en air entraîné, etc.) sont respectées.

1. CERIB, Epernon.
2. IFSTTAR, Marne-la-Vallée.
3. L2MGC, Université de Cergy-Pontoise.
4. Institut Jean Lamour, Université de Lorraine, Nancy.
5. LGCgE, IMT Lille Douai, Université de Lille, Lille.
6. LMDC, Université de Toulouse.
7. GeM, UMR 6183, Centrale Nantes, Université de Nantes.
8. LERM, Arles.

En ce qui concerne le risque de réaction alcalis-silice, les GBR peuvent libérer des quantités importantes d'alcalins solubles dans l'eau, en particulier les sables de GBR qui contiennent une part importante de pâte de ciment adhérente. Les GBR peuvent également contenir des phases de silice instable associées à certains granulats naturels spécifiques ou à des éléments polluants (fragments de tuiles, etc.). Les études montrent également que les recommandations actuelles peuvent être appliquées. Néanmoins, certains des essais utilisés pour les granulats naturels doivent être adaptés (en raison notamment de l'absorption d'eau plus élevée des GBR), alors que d'autres (essai microbar) ne sont pas adaptés aux GBR.

Les études sur la formation d'ettringite et de thaumasite associée à la présence des sulfates conduisent à recommander que la teneur maximale en sulfates solubles dans l'eau soit limitée à 0,3 % et 0,2 % pour les GBR et pour l'ensemble des granulats, respectivement, afin d'éviter tout risque de désordres.

12.1. Introduction

Au même titre que les propriétés à l'état frais et durci, la durabilité est aussi un des aspects essentiels de la réutilisation des granulats de béton recyclé (GBR) dans un nouveau béton. Les propriétés de transport (§ 12.3) sont les premières concernées, car elles sont déterminantes vis-à-vis de la plupart des propriétés de durabilité, notamment celles qui contrôlent les risques de corrosion des armatures. Les études présentées ici concernent les propriétés de durabilité utilisées dans l'approche performantielle, à savoir :

- la porosité et la perméabilité aux gaz (à l'oxygène), souvent pris comme indicateurs de durabilité ;
- la carbonatation accélérée et la migration des ions chlorure sous champ électrique, généralement utilisés en tant qu'essais de performance.

La résistance aux cycles de gel/dégel, avec ou sans sels de déglacage, du béton de GBR est ensuite discutée (§ 12.4), ainsi que la résistance aux pathologies internes associées à la réaction alcali-silice et à la formation d'ettringite/thaumasite (§ 12.5 et 12.6, respectivement).

Les précédents chapitres de ce livre ont présenté les spécificités des GBR, dépendantes de leur microstructure et de leur porosité. Leurs caractéristiques intrinsèques sont tributaires de la nature du granulats naturel d'origine et de la quantité et des caractéristiques de l'ancienne matrice cimentaire. Les questions abordées dans ce chapitre, pour chaque propriété de durabilité, sont les suivantes :

- les GBR jouent-ils un rôle spécifique ?
- quels sont les mécanismes impliqués ?

- les essais et méthodologies habituels de durabilité sont-ils adaptés au béton de GBR ?
- quelles sont les conditions requises pour produire des bétons de GBR ayant une durabilité similaire à celle des bétons de granulats naturels ?

Les connaissances actuelles sur les différents paramètres de durabilité sont tout d'abord examinés dans un paragraphe « État de l'art ». Ensuite, les résultats issus de l'ANR ECOREB et du Projet National RECYBETON sont présentés dans des paragraphes spécifiques propres à chaque propriété.

12.2. État de l'art

12.2.1. Propriétés de transport

La carbonatation est un phénomène bien connu, qui induit avec le temps un risque de corrosion des armatures. Dans l'atmosphère, le pourcentage de CO₂ est de 0,04 % en moyenne. Lorsque le dioxyde de carbone pénètre dans la matrice cimentaire, la Portlandite est consommée et de la calcite se forme. Elle induit une baisse du pH dans la solution interstitielle qui passe de 13 et à 8-9. Les armatures ne sont alors plus protégées ; leur dépassement se produit et leur corrosion peut s'initier dès lors que les quantités d'oxygène et d'eau disponibles sont suffisantes.

La carbonatation du béton de GBR est bien documentée dans la littérature [Otsuki *et al.*, 2003 ; Cui *et al.*, 2004 ; Evangelista et de Brito, 2010 ; Sim et Park, 2011 ; Dao, 2012 ; Xiao *et al.*, 2012 ; Xiao *et al.*, 2013 ; Lotfi *et al.*, 2015 ; Silva *et al.*, 2015b]. Les effets de l'incorporation des GBR dans le béton sur la profondeur de carbonatation sont liés à plusieurs facteurs :

- le taux de substitution [Evangelista et de Brito, 2010 ; Dhir *et al.*, 1999] ;
- la teneur en ciment [Dao, 2012] ;
- les caractéristiques de l'ancien béton d'où proviennent les GBR [Xiao *et al.*, 2012 ; Ryu, 2002a] ;
- le type de concassage [Pedro *et al.*, 2014] ;
- la nature et la qualité des GBR (présence de matériaux bitumineux, de briques, de béton, de verre, etc.) [Bravo *et al.*, 2015] ;
- la cure du béton [Amorim *et al.*, 2012] ;
- l'utilisation de superplastifiant pour réduire le rapport E/C [Buyle-Bodin et Hadjieva-Zaharieva, 2002].

L'importante enquête menée par [Silva *et al.*, 2015b] a montré l'hétérogénéité des résultats rencontrés dans la littérature. Leurs principales conclusions sont les suivantes :

- les granulats recyclés issus de maçonneries concassées peuvent contenir des fragments de béton cellulaire, de béton léger, de briques, de céramiques, etc. qui accroissent la profondeur de carbonatation par rapport à des GBR sélectionnés ;

- la probabilité que les bétons incorporant des sables de GBR présentent une carbonatation plus profonde que les bétons contenant des gravillons de GBR est plus élevée ;
- en général, à mesure que le taux de substitution des granulats naturels par des GBR augmente, la profondeur de carbonatation du béton de GBR augmente aussi ;
- selon les paramètres de la formulation maintenus constants, entre bétons de granulats naturels et bétons de GBR, le rapport entre les profondeurs de carbonatation peut varier de 1 à 2,5 environ pour une substitution des gravillons, et de 1 à 8,7 environ pour une substitution du sable ;
- il est possible de produire des bétons de GBR ayant une résistance à la carbonatation équivalente à celle des bétons conventionnels, en optimisant le rapport eau/liant et la nature du liant.

La pénétration des ions chlorure est, avec la carbonatation, la principale cause de la dépassivation des armatures. Un comportement similaire à celui de la carbonatation a été mis en évidence dans la littérature [Otsuki *et al.*, 2003 ; Evangelista et de Brito, 2010 ; Sim et Park, 2011 ; Xiao *et al.*, 2013b ; Xiao *et al.*, 2014 ; Wil, 2015 ; Lotfi *et al.*, 2015 ; Bravo *et al.*, 2015 ; Sucic et Lotfy, 2016] :

- l'augmentation du coefficient de diffusion des chlorures varie linéairement avec le taux de substitution des granulats naturels par des GBR ;
- la substitution en sable de GBR conduit à des coefficients de diffusion des chlorures plus élevés que ceux obtenus avec la substitution en gravillons de GBR ;
- une large dispersion des résultats est trouvée dans la littérature, en raison essentiellement des différentes méthodologies de fabrication des bétons ;
- comme pour les bétons traditionnels, la migration des ions chlorure peut être atténuée en réduisant le rapport eau/liant ou en utilisant du laitier de haut-fourneau, des cendres volantes et de la fumée de silice ;
- une amélioration de la résistance à la migration des ions chlorure est observée lorsque des granulats fins de brique remplacent le sable naturel, probablement en raison de la nature pouzzolanique de ce matériau.

Certains auteurs montrent que le remplacement de gravillons naturels par des gravillons de GBR augmente la migration des chlorures [de Brito *et al.*, 2010 ; Kou et Poon, 2010]. Une augmentation du coefficient de diffusion des chlorures de 34 % est mesurée par [Evangelista et de Brito, 2010a] lorsque le sable naturel est totalement remplacé par du sable de GBR dans le béton, pour un rapport E/C égal à 0,41 pour le béton de granulats naturels et 0,48 pour le béton de GBR. L'imprégnation des granulats de GBR par un alcool polyvinylique améliore la résistance du béton à la pénétration des chlorures. Dans d'autres études, les coefficients de diffusion des chlorures entre les bétons de granulats naturels et les bétons de GBR sont similaires [Abbas et Fathifalz, 2009 ; Sucic et Lotfy, 2016].

La perméabilité du béton est étroitement liée à sa microstructure. Cette propriété de transport dépend de la porosité, de la connectivité des pores, de la présence de fissures et de la teneur en eau du béton. Comme les GBR sont poreux et, dans certains cas, fissurés par le procédé de concassage, l'incorporation de GBR dans le béton affecte sa perméabilité. La plupart des études indiquent clairement que la perméabilité au gaz des bétons de GBR, pour lesquels les gravillons naturels sont partiellement ou totalement substitués par des gravillons de GBR, est plus élevée que celle des bétons de granulats naturels [Limbachiya *et al.*, 2000 ; Olorunsogo et Padayachee, 2002 ; Gonçalves *et al.*, 2004 ; Kwan *et al.*, 2012]. Cependant, pour certains auteurs, aucun effet n'est observé pour une substitution en deçà de 30 % [Limbachiya *et al.*, 2000].

La différence de perméabilité au gaz entre les bétons de granulats naturels et les bétons de GBR s'atténue avec les paramètres suivants :

- le temps de durcissement. Selon [Kwan *et al.*, 2012], la diminution de la perméabilité intrinsèque est due à la poursuite du processus d'hydratation du ciment. Pour un faible rapport E/C, les réactions d'hydratation induisent une auto-dessiccation de la pâte de ciment et, par conséquent, une réduction des vides capillaires ;
- les conditions de cure. [Buyle-Bodin et Hadjieva-Zaharieva 2002] rapportent que la perméabilité à l'air des bétons de GBR est 6 fois plus élevée que celle des bétons de granulats naturels après une cure dans l'eau, et environ 20 fois après une cure dans l'air ;
- l'augmentation de la teneur en ciment du béton, observée par [Gonçalves *et al.*, 2004], et l'utilisation d'un rapport eau/liant plus faible [Lotfi *et al.*, 2015] ;
- le procédé de malaxage par TSMA (Two Stage Mixing Approach ; d'abord les gravillons et le sable sont mélangés avec la moitié de l'eau, ensuite les matériaux cimentaires et le reste de l'eau sont ajoutés) qui réduit la perméabilité à l'air d'environ 41 % à 182 jours [Tam et Tam, 2007].

12.2.2. Résistance aux cycles de gel/dégel

La majorité des études rapportent que la résistance au gel-dégel des bétons de GBR est inférieure à celle des bétons courants [Buck, 1977 ; Malhotra, 1978 ; Coquillat, 1982] et qu'elle dépend notamment du degré de saturation en eau du matériau [Zaharieva *et al.*, 2004]. D'autres chercheurs [Richardson *et al.*, 2011] montrent qu'en utilisant un entraîneur d'air, les bétons de GBR peuvent s'avérer aussi durables que les bétons de granulats naturels.

Une étude a été menée par [Yildrin *et al.*, 2015] sur l'influence de la pré-saturation en eau des GBR vis-à-vis de la résistance aux cycles de gel-dégel. Les caractéristiques suivantes des bétons ont été investiguées : rapport E/C (0,7, 0,6, 0,5), pourcentage de granulats naturels substitués par des GBR (0 %, 50 %, 100 %), et degré de saturation des GBR (0 %, 50 %, 100 %). La taille maximale des GBR était de 8 mm, et leur absorption d'eau de 6,2 %. Il a été

constaté que la saturation complète et la saturation à 50 % des GBR améliore la résistance du béton aux cycles gel-dégel. L'effet possible d'une cure interne est mentionné par les auteurs.

Dans leurs travaux, [Xiao *et al.*, 2013b] font état de résultats contradictoires :

- certaines études montrent que la résistance au gel/dégel du béton de GBR est similaire à celle du béton de granulats naturels, à résistance mécanique équivalente ;
- d'autres études montrent que la perte de résistance du béton de GBR peut être plus élevée que celle du béton de granulats naturels, la raison principale étant attribuée à l'absorption d'eau plus élevée des GBR ;
- comme pour le béton de granulats naturels, il est utile d'utiliser un agent entraîneur d'air.

[Kaihua *et al.*, 2016] montrent que la résistance au gel/dégel du béton de GBR est étroitement liée aux propriétés de l'ancien béton présent dans les GBR. Les GBR provenant d'un béton sans air entraîné ont une résistance au gel/dégel moindre.

12.2.3. Réaction alcalis-silice et GBR

La réaction alcali-silice (RAS) est susceptible d'altérer la durabilité du béton. Elle peut provoquer des fissures et des dommages importants dans les ouvrages. L'origine de la RSA est une réaction chimique entre quatre composés pouvant être présents simultanément dans le béton : la silice réactive dans les granulats, une concentration suffisamment élevée en alcalins, la présence de Portlandite, et un taux d'humidité relative HR supérieur à 70 – 80 %. Les mécanismes physico-chimiques ont été décrits dans la littérature [Stanton, 1940 ; Dent Glasser et Kataoka, 1981 ; Poole, 1992 ; Wang et Gillott, 1991]. Les conséquences dommageables de la RSA, liées à l'apparition d'un gel, sont d'ordre mécaniques [Diamond, 1989 ; Dron *et al.*, 1998 ; Jones, 1997 ; Prezzi *et al.*, 1997 ; Dent Glasser, 1979 ; Chatterji, 1989].

Les granulats de béton recyclé (GBR) sont composés de deux phases très différentes ; la pâte de ciment adhérente dont les propriétés sont tributaires de la composition des différents ciments utilisés dans le béton d'origine, et les granulats naturels (sables et gravillons) utilisés dans le béton. La phase cimentaire contient des éléments alcalins (en petite quantité généralement). Les granulats sont issus de roches pouvant être de natures très variées (allant des carbonates aux roches siliceuses), et pouvant contenir des phases potentiellement réactives (minéraux et/ou structures). Sachant que les granulats représentent environ 70 % du volume du béton, les caractéristiques pétrographiques et chimiques des GBR sont logiquement liées au bassin de production des granulats naturels d'origine et à leur géologie. Ce constat est surtout vrai pour les gravillons de GBR car les sables utilisés dans les bétons initiaux sont souvent issus de ressources alluvionnaires où le quartz est prédominant. Les GBR peuvent alors contenir d'importantes quantités

d'alcalins solubles et de la silice potentiellement réactive, et leur réutilisation peut engendrer un risque de RAS [Etxeberria, 2004 ; Shehata *et al.*, 2010 ; Adams, 2012].

Le risque d'une RAS dans les bétons de granulats naturels peut être pris en compte dès le stade de la formulation, en utilisant par exemple des granulats non réactifs, en limitant la teneur en alcalins dans la formulation, ou en utilisant des additions minérales. Ces méthodes se sont révélées efficaces pour éviter ou limiter les expansions dues à la RAS [Scott, 2006 ; Hong et Glasser, 2002 ; Kawabata et Yamada, 2015]. En France, ces méthodes sont proposées dans la norme [NF FD P18-456, 2004] et elles permettent d'éviter le risque d'une RSA lors de l'utilisation de granulats naturels. Toutefois, il reste à prouver que cette norme et ces méthodes sont directement applicables aux GBR.

12.2.4. Risques dus à la formation d'ettringite et de thaumasite

L'un des problèmes liés à l'utilisation de GBR pour la fabrication d'un nouveau béton est la présence de polluants [Nixon, 1978]. [Khalaf *et al.*, 2004] ont étudié le recyclage des gravats de maçonnerie comme gravillons dans de nouveaux bétons. Ils ont montré que ces granulats recyclés contenaient du mortier, du gypse, des matières organiques, des chlorures, des sulfates et du verre, ce qui diminuait leurs propriétés au regard de la durabilité. D'autres études ont mis en évidence les fortes teneurs en sulfates solubles dans l'eau de certains GBR ([Barbudo *et al.*, 2012 ; Tovar-Rodríguez *et al.*, 2013]) ce qui les place de facto hors normes. Par exemple, la norme NF EN 12620 stipule que les GBR doivent présenter un taux maximum de sulfates solubles dans l'eau de 0,2 % ($SS_{0,2}$). L'analyse de GBR représentatifs de quatre grands bassins de production français ont montré des niveaux parfois élevés de sulfates solubles dans l'eau [Projet National RECYBETON, thème 2, 2014]. Dans ce cas, une attaque sulfatique interne peut se produire, et se traduire par une expansion différée du béton due à la formation d'une quantité importante d'ettringite secondaire (ou différée) [Neville, 2004]. Elle apparaît en présence de sulfates facilement mobilisables et nécessite des conditions spécifiques simultanées (environnement humide, présence d'aluminates et d'alcalins éventuellement dans la pâte de ciment, température élevée du béton au jeune âge dans le cas de l'ettringite différée, etc.). Dans les bétons incorporant des GBR, les apports en sulfate peuvent avoir plusieurs origines, autres que celles associées au nouveau ciment ; ils peuvent provenir de l'ancien béton, mais aussi de pollutions externes, tels les enduits de plâtre.

Il faut aussi noter qu'en plus de l'ettringite, de la thaumasite peut aussi se former à basse température.

12.3. Résultats RECYBETON

12.3.1. Propriétés de transport

12.3.1.1. Procédures expérimentales

12.3.1.1.1. Compositions des bétons

Trois classes de résistance ont été fixées (C25/30, C35/45 et C45/55 selon la norme [NF EN 206/CN, 2014]) avec, pour chacune, trois bétons différents. Ainsi, au total, neuf bétons ont été étudiés (Tableau 12.1). Pour la classe C45/55, une résistance à la compression inférieure à celle visée a été obtenue, en raison d'une teneur en ciment plus faible et d'un rapport E/C plus élevé, par rapport au béton de granulats naturels correspondant.

Tableau 12.1

Composition des bétons, en kg pour un mètre cube

	C 25/30			C 34/45			C 45/55		
	0S0G	30S30G	0S100G	0S0G	30S30G	0S100G	0S0G	30S30G	0S100G
Eau	184	177	176	178	158	172	168	148	150
CEM II/A-L 42,5 N	267	282	279	299	324	336	390	371	369
Fillers calcaires	45	49	70	58	44	53	100	65	73
Sable naturel (0/4)	772	492	794	769	495	782	732	483	775
Sable de GBR (0/4)	0	233	0	0	216	0	0	229	0
Gravillons naturels (4/10)	264	167	0	264	169	0	250	164	0
Gravillons de GBR (4/10)	0	151	161	0	143	158	0	148	157
Gravillons naturels (6/20)	811	539	0	808	546	0	769	529	0
Gravillons de GBR (6/20)	0	167	691	0	164	682	0	162	676
Superplastifiant	0.14	0.13	0.08	0.29	0.66	0.25	1.23	1.28	0.92
e/liant équivalent	0.57	0.54	0.53	0.49	0.46	0.47	0.34	0.35	0.36
Affaissement (cm)	19.5	20	19.5	20	20	20	19.5	19	19
Résistance à la compression à 8 jours (MPa)	31,8	32,4	29,4	40,7	46,6	39,8	61,4	58,8	51,2

Un ciment CEM II/A-L 42,5 N et un fillers calcaire ont été utilisés comme liant. Le liant équivalent a été calculé selon la norme [NF EN 206/CN, 2014]. La teneur en superplastifiant a été ajustée afin de maintenir une maniabilité constante (affaissement entre 19 et 20 cm, soit la classe S4 de la norme NF EN 206/CN). La mesure de l'affaissement a été réalisée selon la norme [NF EN 12350-2, 2012]. Des granulats calcaires concassés ont été utilisés comme granulats naturels et les GBR provenaient de Déchets de Construction et de Démolition (DCD). Les principales propriétés des granulats naturels et des GBR ont été mesurées dans le cadre du Projet National RECYBETON et sont présentées dans le Tableau 12.2. En raison de la présence de l'ancienne pâte de ciment, les GBR ont une porosité plus élevée que les granulats naturels, ce qui leur confère une masse volumique plus faible et une absorption d'eau plus élevée.

Tableau 12.2

Propriétés des granulats

	Masse volumique réelle (kg/m ³)	Absorption d'eau Ab_{24} (%)
Sable naturel (0/4)	2,08	8,9
Sable de GBR (0/4)	2,29	5,6
Gravillons naturels (4/10)	2,26	5,8
Gravillons de GBR (4/10)	2,58	0,8
Gravillons naturels (6,3/20)	2,71	0,51
Gravillons de GBR (6,3/20)	2,71	0,46

En raison de l'absorption d'eau plus élevée des GBR, par rapport aux granulats naturels (Tableau 12.2), une pré-saturation en eau des GBR a été appliquée avant malaxage. Dans cette étude, les GBR ont été sursaturés de 1 %, c'est-à-dire que leur teneur en eau avant malaxage était égale à l'absorption d'eau plus 1 %. Les GBR et l'eau à ajouter ont été introduits dans un fût hermétique. Celui-ci a été roulé au sol pendant 10 minutes pour homogénéiser la répartition de l'eau dans les GBR. Ensuite, le fût est laissé au repos deux heures avant l'introduction des GBR dans le malaxeur.

12.3.1.1.2. Coulage et cure des éprouvettes

Pour chaque formule, des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) et cubiques ($15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$) ont été coulées pour mesurer les propriétés physiques du béton. Les moules prismatiques étaient en acier et les moules cubiques en PVC. Les éprouvettes ont été compactées à l'aide d'une table vibrante. Aucune ségrégation ni ressuage n'ont été observés. Toutes les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après coulage. Deux types de cure ont été appliqués :

- humide : dans l'eau (20 °C) jusqu'au jour de l'essai (90 jours dans ce cas) ;
- à sec : trois jours dans l'eau (20 °C) et 87 jours dans les conditions du laboratoire (20 °C ± 2 °C, humidité relative 50 % ± 5 %).

Ensuite, des éprouvettes cylindriques de Ø 5 × 10 cm ont été prélevés au centre des éprouvettes cubiques, afin d'effectuer un essai de migration des chlorures. Avant cet essai, les éprouvettes ont été saturées sous vide avec une solution alcaline (NaOH 0,1M) pendant 72 heures.

Les éprouvettes prismatiques ont servi à la réalisation de l'essai de carbonatation.

12.3.1.1.3. Procédures de caractérisation des propriétés de transport et de durabilité

La porosité à l'eau a été mesurée après saturation totale selon la méthode de la norme [NF P 18-459, 2010]. Les échantillons ont été pesés saturés dans l'eau puis dans l'air (saturé surface sèche), puis après séchage à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante. Les valeurs de porosité accessible à l'eau correspondent aux moyennes obtenues sur trois éprouvettes.

L'essai de carbonatation a été effectué selon la norme [NF prCEN/TS 12390-12, 2010]. Après la période de cure, les 27 éprouvettes (trois pour chaque béton) ont été placées dans une pièce à 20 °C ± 2 °C et à humidité relative HR de 50 % ± 5 % pendant 15 jours. À la suite de ce préconditionnement, les éprouvettes ont été placées dans l'enceinte de carbonatation où la concentration en CO₂ a été portée à 4 % ± 0,5 %. L'humidité relative pour cet essai était de 55 % ± 5 % et la température de 20 °C ± 2 °C. Après 90 jours dans l'enceinte, les éprouvettes ont été fendues et une solution de phénolphaléine a été pulvérisée sur les surfaces. La profondeur atteinte par le front marquant la chute du pH a été mesurée.

L'essai de migration des chlorures a été effectué conformément à la norme [NF XP P 18-462, 2012]. Trois éprouvettes cylindriques ont été testées pour chaque composition. Chaque éprouvette a été placée entre les deux compartiments d'une cellule, avec deux joints circulaires plats en silicone assurant l'étanchéité du système. Une solution de NaOH (0,025 mol/l) + KOH (0,083 mol/l) a été placée dans les deux compartiments amont et aval, et une solution de NaCl (0,513 mol/l) a été ajoutée dans le compartiment amont. Une tension de 30V a été appliquée entre les deux compartiments afin de forcer le mouvement des ions chlorure, de l'amont vers l'aval. L'essai a été effectué à 20 °C ± 5 °C, sur une durée d'environ 24 heures. À la fin de l'essai, les éprouvettes ont été fendues puis une solution de nitrate d'argent a été pulvérisée sur les surfaces. La profondeur atteinte par les chlorures dans l'échantillon, à un âge déterminé, a été mesurée. Les mesures ont permis de calculer les coefficients de diffusion des ions chlorure.

Un perméamètre CEMBUREAU a été utilisé pour mesurer la perméabilité aux gaz des bétons, selon la norme [NF XP P 18-463, 2011]. Il s'agit d'un

perméamètre à charge constante. De l'oxygène gazeux a été utilisé comme gaz vecteur. Une différence de pression allant jusqu'à 0,3 MPa a été appliquée sur l'éprouvette placée dans la cellule de mise en pression, où le collier en polyuréthane assurant l'étanchéité latérale a été plaqué contre la surface courbe sous pression de 0,7 MPa. Pour déterminer la perméabilité intrinsèque, l'équation proposée par Klinkenberg [Klinkenberg, 1941] a été utilisée.

12.3.1.2. Résultats et interprétation

12.3.1.2.1. Carbonatation et porosité

Dans les matériaux cimentaires, le transport du dioxyde de carbone dépend essentiellement des mécanismes suivants :

- la proportion de Portlandite. En réagissant avec le CO_2 , elle entraîne la précipitation de la calcite, ce qui ralentit la migration du CO_2 et contribue à une réduction de la porosité, en raison du volume molaire plus élevé de la calcite ;
- la porosité du béton : sa proportion, sa taille et la connectivité des pores ;
- le degré de saturation en eau. La migration du CO_2 dans l'eau est 10 000 fois plus lente que dans l'air.

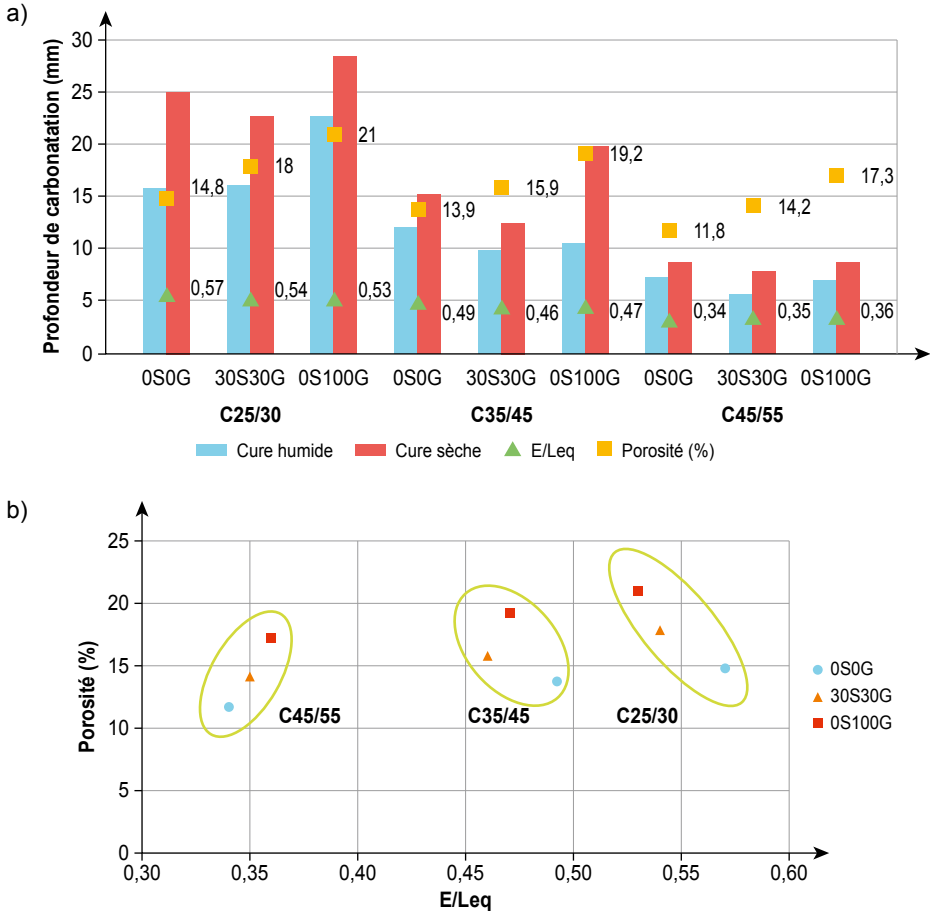
Les résultats confirment le rôle clé du rapport E/L (Figure 12.1-b) : plus ce rapport est élevé, plus la profondeur de carbonatation est grande. Les performances des bétons C45/55 (E/L faible) au regard de la carbonatation sont donc meilleures que celles des bétons C35/45, eux-mêmes meilleures que celles des bétons C25/30. Les bétons ayant un faible rapport E/L ont une plus faible porosité, de sorte que le CO_2 pénètre moins facilement dans la matrice cimentaire. Les pores sont également de plus petites tailles, ce qui conduit à un taux de saturation plus élevé, facteur défavorable à la migration du CO_2 . Dans ces bétons, l'effet de colmatage a aussi une plus grande intensité.

Les résultats présentés Figure 12.1 montrent l'augmentation significative de la porosité accessible à l'eau des bétons en fonction du taux de substitution des granulats naturels par des GBR. On observe que la profondeur de carbonatation n'est pas strictement corrélée à la porosité totale des bétons. Par exemple, les bétons de granulats naturels C25/30 0S0G et les bétons de GBR C45/55 30S30G ont des porosités proches de 14,8 % et 14,2 % respectivement. Cependant, leur profondeur de carbonatation diffère significativement : 24,9 mm et 7,9 mm pour la cure à sec, et 15,7 mm et 5,7 mm pour la cure humide, respectivement. La porosité, indicateur général de durabilité, ne permet donc pas d'anticiper correctement le comportement des bétons de GBR au regard du risque de corrosion des armatures par carbonatation du béton.

La porosité des GBR joue un rôle dans la carbonatation, d'autant plus important que le rapport E/L du nouveau béton est élevé. Les résultats présentés Figure 12.1 montrent que la profondeur de carbonatation du béton C25/30 0S100G est beaucoup plus élevée que celle des bétons C25/30 0S0G (granulats naturels) et C25/30 30S30G. Dans le cas de la cure humide, cette tendance

Figure 12.1

(a) Influence du type de cure sur la profondeur de carbonatation des bétons de GBR ;
 (b) porosité versus rapport E/L



n'apparaît pas pour les bétons C35/45 et C45/55. Ces résultats confirment l'impact moindre des GBR lorsque la compacité de la matrice cimentaire est élevée. Dans le cas des bétons C35/45 et C45/55, la matrice cimentaire du nouveau béton agit comme une barrière diffusionnelle, même si les GBR sont plus perméables (provenant d'un béton moins compact).

Il est probable que cet « effet barrière de diffusion », particulièrement marqué dans le cas des bétons C45/55, soit accentué par un « effet de paroi » supplémentaire. Durant le coulage du béton, les granulats proches de la paroi du moule désorganisent l'empilement granulaire local. Les granulats, qui ne peuvent se déplacer que dans des directions sensiblement parallèles, conditionnent alors partiellement la microstructure du béton de peau. En effet,

pendant la vibration, le centre de gravité des gros grains ne peut se rapprocher de la paroi du moule qu'à une distance maximale égale à la valeur de leur rayon. Dans les premiers millimètres de la surface exposée au CO_2 , le rapport volumique matrice cimentaire/granulat est donc plus élevé, ce qui accentue l'effet « barrière de diffusion » associé à la matrice cimentaire.

Pour toutes les classes de résistance, on observe une carbonatation légèrement inférieure pour les bétons de GBR 30S30G, comparativement aux bétons de granulats naturels. Pour les bétons C25/30 et C35/45, la cause principale est probablement un rapport E/L plus faible, ce qui conduit à une matrice cimentaire plus compacte et donc à une pénétration plus difficile du CO_2 au sein de la pâte. Cette hypothèse n'est pas nécessairement contredite par les résultats obtenus sur les bétons C45/55, dans la mesure où l'effet barrière de diffusion peut être prédominant pour ces bétons. Une autre hypothèse est que pour les bétons de GBR 30S30G, le taux de saturation des pores au début de l'essai de carbonatation accélérée est plus élevé, en raison de la porosité élevée des GBR du fait qu'ils ont été pré-saturés avant fabrication. Les GBR servent alors de réservoir d'eau, ce qui entraîne localement une augmentation de la teneur en eau liquide et donc une diminution de la profondeur de carbonatation (moindres propriétés de transfert du CO_2). Si cette hypothèse était juste, les bétons 0S100G devraient également bénéficier du même phénomène et présenter des profondeurs de carbonatation plus faibles ou similaires, ce qui n'est pas le cas. Le mécanisme pourrait être plus prononcé en présence du sable de GBR qu'en présence des gravillons de GBR.

Au terme de 90 jours, on peut considérer en première approximation que les quantités de Portlandite produites en cures sèche et humide sont du même ordre de grandeur (bien qu'il soit probable que les bétons conservés dans l'eau aient un taux plus élevé de Portlandite, en raison d'une hydratation favorisée). La porosité des bétons durcis dans les deux conditions de cure est alors très proche à cette échéance, et la principale différence entre les bétons, pour une même série, est la teneur en eau au début de l'essai de carbonatation accélérée (Figure 12.1). Le séchage à l'air libre ou dans une étuve a pour effet de réduire le degré de saturation en eau du béton en surface, et donc de favoriser la pénétration du CO_2 dans le béton. Une cure sèche accélère le phénomène de carbonatation.

Ainsi, les différences observées Figure 12.1 entre la cure humide et la cure sèche sont conformes aux attentes. La profondeur de carbonatation est supérieure de 39 % en moyenne pour tous les bétons ayant subi la cure sèche. La différence est plus grande pour la classe de résistance la plus modeste : 42 % en moyenne pour C25/30 contre 28 % en moyenne pour C45/55. La désaturation est en effet plus rapide dans les bétons moins compacts. Une cure sèche a donc plus de conséquences sur la résistance à la carbonatation des bétons les moins compacts (E/L élevé). Une matrice cimentaire plus compacte limite l'impact des autres facteurs (cure, quantité de GBR) sur la carbonatation du béton.

Il faut donc réduire le rapport E/L pour augmenter la compacité et compenser les effets négatifs des GBR. Les études issues de la littérature vont aussi dans ce sens [Silva *et al.*, 2015]. Les auteurs attirent également l'attention sur la nécessité d'adapter la teneur en superplastifiant afin de maintenir la maniabilité du béton.

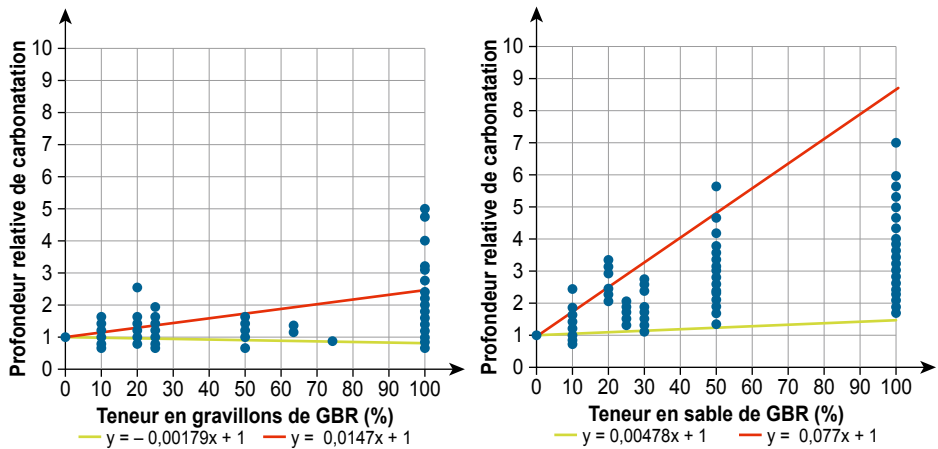
En conclusion, il apparaît que :

- il est possible de produire des bétons de GBR, même à des taux de substitution élevés, résistants à la carbonatation ;
- si le nouveau béton est compact, la matrice cimentaire agit comme une barrière de diffusion, dont l'effet est d'autant plus marqué que la différence de compacité entre l'ancienne et la nouvelle matrice cimentaire est grande ;
- l'effet positif associé à la présence d'eau dans les GBR, qui agirait comme un réservoir en maintenant un taux de saturation plus élevé empêchant l'avance du front de carbonatation, n'est ni confirmé ni infirmé ; s'il existe, il s'agirait alors d'un effet de second ordre.

Enfin, la coexistence des nombreux mécanismes décrits ci-dessus, ajoutés aux conditions d'essai de carbonatation accélérée différentes ou non mentionnées d'une étude à l'autre, explique la variabilité des résultats trouvés dans la littérature.

Figure 12.2

Profondeur relative de carbonatation en fonction du taux de substitution en sables et gravillons de GBR [Silva *et al.*, 2015b]

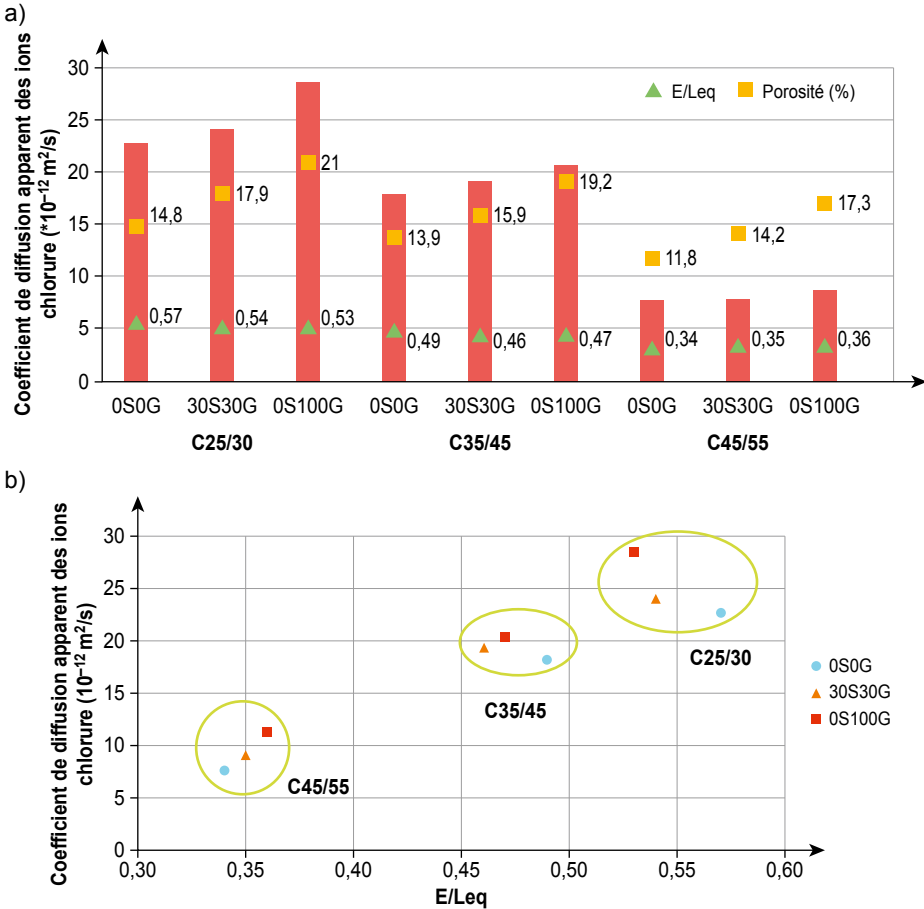


12.3.1.2.2. Migration des ions chlorure

Les résultats obtenus montrent que le coefficient de diffusion D_{app} augmente avec le rapport E/L et le taux de substitution en GBR (Figure 12.3), confirmant ainsi la plupart des résultats de la littérature. Les ions chlorure pénètrent plus

Figure 12.3

Coefficient de diffusion des ions chlorure des bétons de GBR en fonction de la classe de résistance (a) ou du rapport E/L_{eq} (b)



facilement dans le béton contenant des GBR. Ceci est probablement dû à l'ancienne matrice cimentaire présente dans les GBR, qui est plus poreuse que la nouvelle matrice cimentaire.

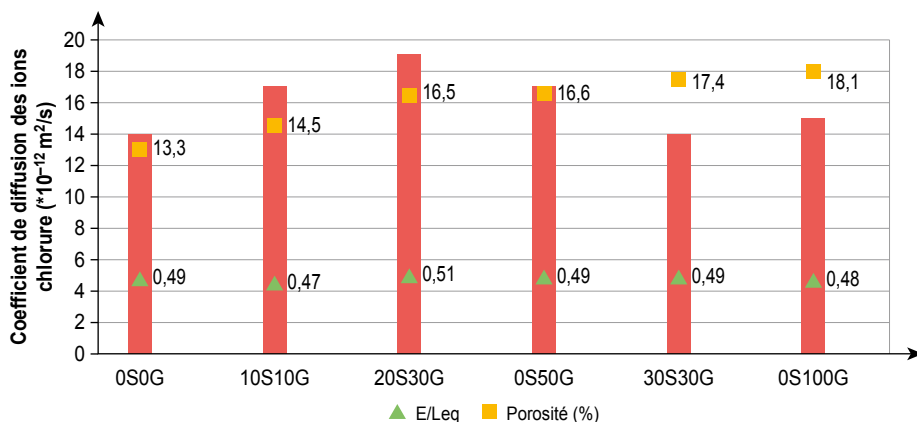
Contrairement aux observations faites lors des essais de carbonatation, l'augmentation du coefficient de diffusion des ions chlorure est plus importante pour les bétons C45/55 que pour les bétons C25/30. Le coefficient de diffusion apparent est plus grand pour la classe de résistance la plus faible mais, au sein d'une même classe, l'augmentation du coefficient de diffusion apparent est plus marquée lorsque les granulats naturels sont remplacés par des GBR, notamment pour les bétons à faible E/L (Figure 12.3). En effet, en considérant les bétons C25/30 et C35/45, la substitution de 30 % de granulats naturels par

des GBR entraîne une faible augmentation du coefficient de diffusion (moins de 10 %), alors que le même taux de substitution entraîne une augmentation plus importante (environ 21 %) pour les bétons C45/55. Ces tendances doivent être considérées avec prudence, compte tenu des incertitudes liées à l'essai.

Des essais ont aussi été réalisés avec d'autres bétons C35/45, dont certains contenaient une quantité plus faible de GBR (Figure 12.4). Les mêmes tendances ont été observées. Il apparaît que la variation relative du coefficient de diffusion apparent des chlorures est amplifiée avec l'ajout de GBR (6,9 % à 13,8 % pour les bétons de GBR à la place de 2,8 % pour le béton de granulats naturels).

Figure 12.4

Coefficient de diffusion des ions chlorure des bétons de GBR C35/45



Ces résultats sont à rapprocher de la présence de l'ancienne pâte de ciment autour des GBR, qui s'apparente probablement plus à une matrice cimentaire d'un béton formulé avec un rapport E/L proche de celui d'un béton C25/30, qu'à celle d'un béton C45/55. Apparemment, l'effet « barrière de diffusion » engendré par la carbonatation ne semble pas avoir un effet important dans le cas de la migration des chlorures. Toutefois, on ne peut pas exclure *a priori* cet effet car l'essai de diffusion des chlorures est réalisé sur des éprouvettes dont les deux faces latérales sont sciées, ce qui élimine la présence des faces en contact avec la paroi du moule où un effet de paroi peut avoir accentué les phénomènes de barrière de diffusion. D'autre part, comme les éprouvettes sont toujours saturées pendant l'essai, l'effet réservoir d'eau des GBR ne peut pas être sollicité (en supposant qu'il existe). En réalité, dans la pratique, c'est toujours à une face coffrée ou moulée qui est en contact avec les chlorures, et qui est aussi exposée au processus de carbonatation. Cette dernière diminue alors la capacité de la matrice cimentaire à fixer les chlorures (inconvénient) mais elle conduit aussi à un effet de colmatage de la matrice cimentaire (avantage).

En conclusion, il apparaît que :

- l'essai de migration des ions chlorure tend à surestimer l'influence des GBR ;
- les GBR, du moins ceux utilisés dans cette étude, ont relativement peu d'influence si leur taux de substitution est inférieur à 30 %, à la fois pour le sable et les gravillons ; pour un taux de substitution de 100 %, le coefficient de diffusion d'un béton de GBR de classe de résistance CX/Y est proche de celle du béton de granulats naturels de classe inférieure : C45/55 0S100G \approx C40/50 0S0G ; C35/45 0S100G \approx C30/37 0S0G. On peut effectivement observer Figure 12.3 que la valeur de C45/55 0S100G correspond à la moyenne des valeurs de C45/55 0S0S, et que le béton C35/45 0S0G aurait eu très vraisemblablement une valeur proche d'un béton C40/50 0S0G, si ce dernier avait été réalisé. La même observation peut être faite pour C35/45 0S100G (valeur moyenne des valeurs C35/45 0S0G et C25/30 0S0G) ;
- comme pour la carbonatation, il est donc possible, si nécessaire, de jouer sur les paramètres de la formulation pour compenser l'impact des GBR sur les propriétés de transport des ions chlorure dans les bétons (réduction du rapport E/L).

12.3.1.2.3. Perméabilité

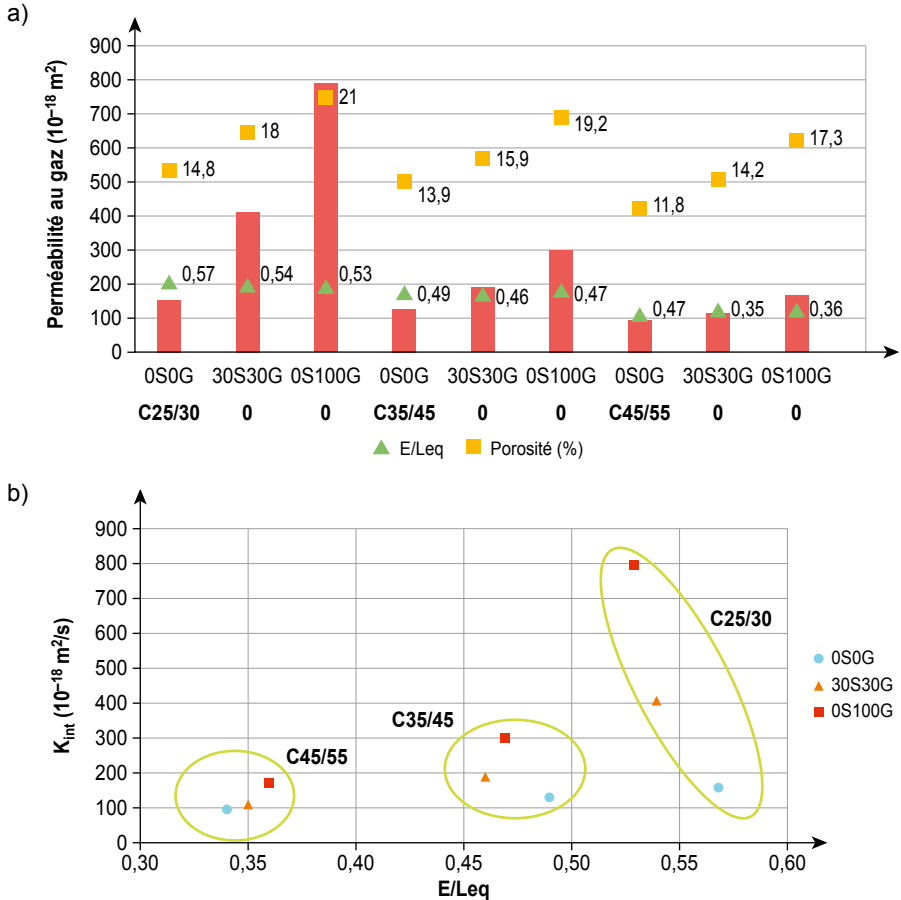
Le coefficient de perméabilité intrinsèque aux gaz (k_{int}) des bétons de granulats naturels et de GBR est donné Figure 12.5. Les résultats montrent que k_{int} est fortement influencé par le taux de GBR. Les évolutions dépendent également du rapport E/L. Pour les faibles rapports E/L (C35/45 et C45/55), la différence entre la perméabilité des bétons des granulats naturels et de GBR est moindre que celle des bétons de rapport E/L plus élevé (C25/30). Ceci est dû à la meilleure qualité de la matrice. Des résultats similaires ont été obtenus par [Goncalves *et al.*, 2004].

On peut noter que, malgré une pâte plus dense, le béton de GBR C45/55 0S100G (E/L = 0,36) a une perméabilité similaire à celle du béton de granulats naturels C25/30 0S0G (E/L = 0,57) et que le béton C45/55 30S30G (E/L = 0,35) a une perméabilité similaire à celle du béton C35/45 0S0G (E/L = 0,49). Il faut donc réduire de manière significative le rapport E/L lorsque des GBR sont ajoutés, pour obtenir des valeurs de perméabilité similaires. Un taux de 25 % de GBR nécessite une diminution du rapport E/L de l'ordre de 0,05 point pour atteindre le même niveau de perméabilité intrinsèque k_{int} .

Une autre étude réalisée dans le cadre du PN RECYBETON sur des bétons C30/37 incorporant 10 % de sable et de gravillons recyclés issus de différentes sources montre que la perméabilité quoique restant du même ordre ($40 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ à $80 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ pour un taux de saturation de 0 %) est influencée par la présence des granulats recyclés [Ghorbel *et al.*, 2017]. On note toutefois, que cet écart diminue lorsque le taux de saturation est plus élevé et est quasi nul pour 50 % de saturation.

Figure 12.5

Perméabilité aux gaz des bétons de GBR en fonction de la classe de résistance (a), ou du rapport E/L_{eq} (b)



[Ghorbel *et al.*, 2017] ont étudié l'effet d'un remplacement de 10 % de l'ensemble des granulats par du recyclé dans un béton de type C35/45, en faisant varier l'origine du sable (5 sources) et du gravillon (4 sources). L'impact est mesurable (variant de 50 à 100 % en valeur relative), mais reste du même ordre de grandeur que celui lié au remplacement de l'ensemble du squelette par un autre granulats naturel d'origine et de caractéristiques différentes.

12.3.1.3. Conclusion

Le taux de substitution des granulats naturels par des GBR joue un rôle important sur la porosité accessible à l'eau des bétons. L'augmentation du taux de substitution s'accompagne d'une augmentation de la porosité des

bétons. Cette augmentation est attribuée à la pâte de ciment du béton d'origine contenue dans les GBR.

La porosité accessible à l'eau est un indicateur de durabilité utile en première approche, notamment dans le cadre d'un contrôle de la régularité des bétons durant la construction. Cependant, il n'est pas suffisamment pertinent en soi pour comprendre et bien appréhender les risques de corrosion des bétons de GBR. Si une analyse approfondie des risques de corrosion est requise, il est plus pertinent de considérer au moins le coefficient de diffusion des ions chlorures et la résistance à la carbonatation du béton. L'utilisation de ces indicateurs de durabilité est préférable, d'une part parce qu'ils prennent davantage en compte les caractéristiques du béton, y compris sa porosité, et d'autre part parce que la plupart des modèles de durabilité opérationnels sont basés sur ces paramètres.

Il apparaît que les GBR diminuent de façon prévisible les performances du béton en matière de propriétés de transfert, selon les caractéristiques intrinsèques des GBR (porosité), le taux de substitution et la compacité de la matrice cimentaire du nouveau béton. Cependant, en optimisant la formulation (diminution du rapport E/L notamment), on peut obtenir, même avec un taux de substitution élevé, des bétons aussi résistants à la carbonatation et à la migration des ions chlorure que les bétons de granulats naturels.

Lorsque le nouveau béton est compact, sa matrice cimentaire agit comme une barrière diffusionnelle, dont l'effet est d'autant plus marqué que la différence de compacité entre l'ancienne et la nouvelle matrice cimentaire est grande. Dans cette étude, l'effet de cette barrière de diffusion est net pour la carbonatation, mais il moins évident dans le cas des chlorures, en raison notamment du protocole de l'essai.

L'effet positif lié à la présence d'eau dans les GBR, qui agirait comme un réservoir et permettrait de maintenir un taux de saturation plus élevé, favorisant ainsi la densification de la microstructure par la formation d'un surplus d'hydrates, et s'opposant à l'avancement de la carbonatation ou à la pénétration des ions chlorure, n'est ni confirmé ni infirmé. S'il existe, il apparaît comme un effet de second ordre.

12.3.2. Résistance au gel/dégel des bétons de GBR a air entraîné

12.3.2.1. Introduction – Caractéristiques du béton

En France, il existe trois normes pour la mesure de la résistance au gel/dégel des bétons : [NF P 18-424, 2008] et [NF P 18-425, 2008] pour le gel interne dans l'eau ou dans l'air ; XP P 18-420 pour la résistance aux cycles de gel/dégel avec sels de déverglaçage. Les formules des bétons testés dans le cadre

des présents travaux sont données Tableau 12.3. Les paramètres relatifs à la classe de résistance à la compression, à la teneur en ciment, à la teneur en air et au rapport maximum E/L sont conformes à la classe d'exposition XF3 de la norme [NF EN 206/CN, 2014].

Tableau 12.3

Formulation des bétons, pour un mètre cube

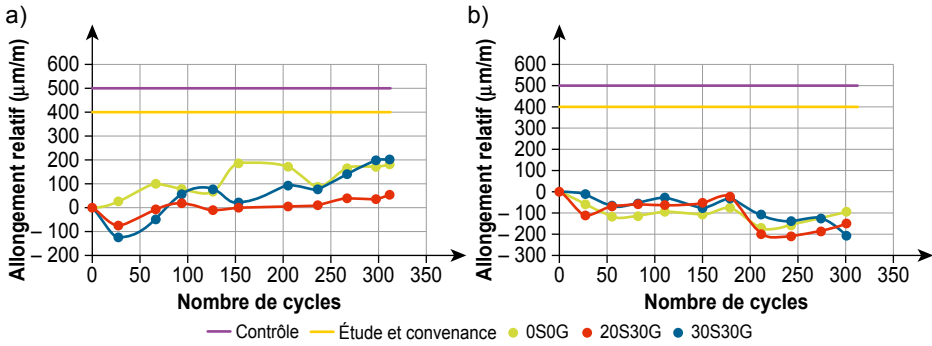
Constituants (kg/m ³)	C 30/37		
	0S0G	20S30G	20S30G
Eau	151	147	154
CEM III/A-L 42,5 N	342	334	350
Fillers calcaires	39	38	40
Sable naturel (0/4)	739	628	535
Sable de GBR (0/4)	0	157	229
Gravillons naturels (4/10)	254	134	157
Gravillons de GBR (4/10)	0	255	281
Gravillons naturels (6,3/20)	777	461	497
Superplastifiant	0,63	0,61	0,81
Entraîné d'air	0,11	0,12	0,09
E/L (liant équivalent)	0,44	0,44	0,44
Affaissement (cm)	20	20	18
Teneur en air (%)	5	7	4
Résistance à la compression à 8 jours (MPa)	40,0	37,5	43,5

12.3.2.2. Résultats

Les normes [NF P 18-425, 2008] et [NF P 18-424, 2008] proposent deux critères pour estimer la résistance au gel des bétons : le premier est lié à la variation dimensionnelle longitudinale d'éprouvettes prismatiques (10 × 10 × 40 cm³) ; le second est lié à la fréquence de résonance transversale. Un béton est considéré comme résistant au gel si, après 300 cycles de gel/dégel, $\Delta l/l_0 \leq 500 \mu\text{m}/\text{m}$ ou si le rapport médian $\frac{F_F n^2}{F_F O^2} \geq 60 \%$ (F_F est la fréquence de résonance fondamentale de flexion à l'origine (0) et après n cycles des gel-dégel (n)). Comme on peut le voir Figure 12.6, les variations dimensionnelles sont inférieures à la valeur seuil.

Figure 12.6

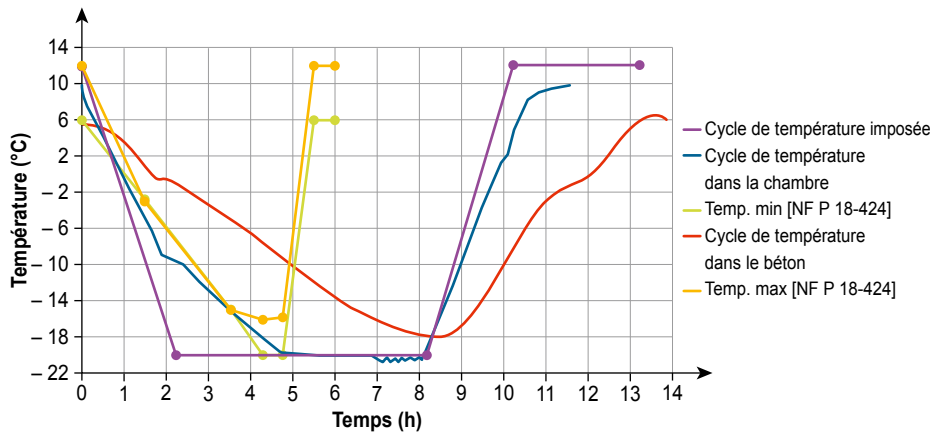
Résistance après 300 cycles de gel/dégel selon la procédure des normes [NF P 18-424, 2008] (a) et [NF P 18-425, 2008] (b)



Une troisième méthode avec un autre cycle de gel/dégel a également été utilisée (Figure 12.7). Les résultats sont donnés dans [Omary, 2017]. Cette étude a montré les mêmes tendances.

Figure 12.7

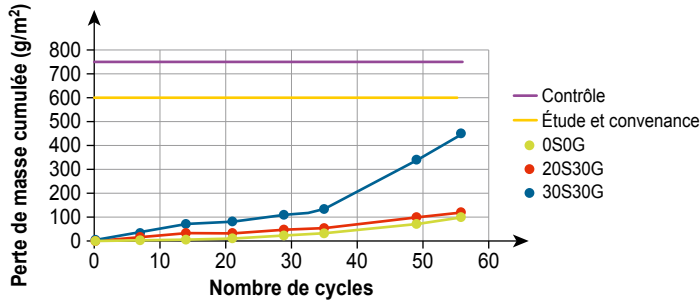
Cycles de gel/dégel imposés dans la troisième méthode, comparés à ceux des normes [NF P 18-424, 2008] et [NF P 18-425, 2008]



Pour la résistance à l'écaillage selon la norme [NF XP P 18-420, 2012], la perte de masse est inférieure à 500 g/m^2 . Les trois bétons ont également une bonne résistance aux cycles de gel/dégel en présence de sels de déverglaçage (Figure 12.8).

Figure 12.8

Perte de masse jusqu'à 56 cycles de gel/dégel avec sels de déverglaçage, selon la norme [NF XP P 18-420, 2012]



12.3.2.3. Conclusion

Sur la base de ces résultats expérimentaux, les conclusions et recommandations suivantes peuvent être formulées :

- les résultats de la littérature montrent que la résistance au gel des GBR est très dépendante des caractéristiques de l'ancien béton, c'est-à-dire la résistance au gel du granulat naturel, la teneur en air et le rapport E/L de la pâte de ciment,
- les résultats de Projet National RECYBETON montrent qu'il est possible de produire des bétons de GBR résistant aux cycles de gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçage. Il faut vérifier la résistance intrinsèque au gel des GBR et respecter les règles de formulation (teneur en liant, rapport E/L, teneur en air entraîné, etc.).

12.3.3. Réaction alcalis-silice (RAS) liée aux GBR – Caractérisation et prévention

12.3.3.1. Introduction

Cette étude comprend :

- la quantification et la localisation des alcalins et de la silice solubles dans les GBR ;
- l'évaluation du potentiel réactif des GBR à partir de la cinétique de dissolution des granulats et des essais sur mortier (autoclave et microbars) ;
- la vérification sur béton de GBR des principales méthodes permettant de limiter les expansions anormales provoquées par la RAS. Cette partie s'intéresse à la teneur en alcalins des GBR, ainsi qu'à l'utilisation de métakaolin (MK) ou de laitier moulu de haut-fourneau granulé broyé (LMHF) comme inhibiteurs de la RAS.

12.3.3.2. Alcalins et silice solubles dans les GBR

Cette partie de l'étude concerne neuf GBR (quatre sables et cinq gravillons) sélectionnés dans le cadre du Projet National RECYBETON. Leurs principales propriétés sont données dans le chapitre « Caractérisation des GBR » (voir § 3). Ces GBR sont caractérisés par une homogénéité minéralogique et chimique relativement bonne, malgré leurs provenances variées. L'étude minéralogique a montré que le quartz et la calcite sont toujours prépondérants. Selon l'environnement géologique des granulats naturels initiaux, des feldspaths et des plagioclases potassiques (K), des micas et de la dolomite peuvent aussi être présents. Des observations pétrographiques au microscope optique ont complété les observations. Elles ont permis de détecter d'autres minéraux en proportions plus faibles. Mais ces analyses sont indispensables pour détecter les phases siliceuses instables (calcédoine, quartz secondaire, etc.) ou des structures siliceuses instables (quartz ondulant, etc.). La plupart des GBR contiennent ces phases instables en très faibles proportions, à l'exception des gravillons de la plateforme n° 3 qui contiennent une quantité significative de silex. Les matériaux de la plateforme n° 1 contiennent également un taux significatif de fragments de briques, estimé à environ 17 %.

La caractérisation chimique réalisée par fluorescence X a montré que les teneurs en éléments majeurs des différents GBR évoluaient dans des plages similaires. Il existe cependant des différences significatives en GBR au niveau des composants alcalins (surtout Na_2O) et elles sont plus marquées pour les sables de GBR que pour les gravillons de GBR (Tableau 12.4). Ainsi, la teneur en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ évolue entre 4 600 à 15 000 mg/kg (0,46 à 1,5 %) pour les sables de GBR, et entre 6 300 à 13 800 mg/kg (0,63 à 1,38 %) pour les gravillons de GBR. Mais, d'un point de vue général, les teneurs moyennes en K_2O et Na_2O sont plutôt proches entre le sable et les gravillons de GBR, respectivement 8 100 et 4 200 mg/kg ($\approx 0,8 \%$ et $0,4 \%$).

Les alcalins solubles ont été mesurés selon la norme XPP 18-544 [AFNOR, 2015b]. L'essai consiste à attaquer 500 g de matériaux pendant 7 heures dans de l'eau en ébullition saturée en chaux. Les résultats (Tableau 12.5) montrent que les sables de GBR libèrent beaucoup plus d'alcalins que les gravillons de GBR. Les plus petites valeurs mesurées sur les sables ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} \approx 250\text{-}300 \text{ mg/kg}$) sont proches des valeurs les plus fortes mesurées sur les gravillons. Néanmoins, les alcalins solubles dans l'eau ne représentent qu'une faible part des alcalins totaux contenus dans chaque matériaux (1,7 à 9,8 % pour les sables de GBR ; 0,5 à 3,3 % pour les gravillons de GBR).

Par ailleurs, les GBR libèrent bien plus d'alcalins solubles dans l'eau que les granulats naturels [Lavaud, 2017]. En effet, à titre de comparaison, les teneurs en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ soluble dans l'eau des alluvions du Bassin Parisien sont de l'ordre de 20-40 mg/kg (sables) et de 5-15 mg/kg (gravillons), et pour de différents calcaires du sud de la France, de l'ordre de 10-45 mg/kg (sables) et 2-15 mg/kg (gravillons). Les teneurs en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ soluble des GBR correspondent plus (parfois même beaucoup plus) à celles des granulats marins, généralement comprises entre 60 et 400 mg/kg.

Tableau 12.4

Teneur en alcalins pour les neuf GBR testés (mg/kg). Moyenne et écart-type (mg/kg) sont calculés pour les sables et gravillons de GBR

	SR1	SR2	SR3	SR4	Moy.	Écart type	Coeff. de variation	GR1	GR2	GR3	GR3	GR4	Moy.	Écart type	Coeff. de variation
Coupure	0/6	0/6	0/4	0/4	0/4	0/4	4/20	4/20	4/20	4/10	10/20	4/20			
K ₂ O	7 800	10 500	4 700	9 900	8 200	2 600	31,8	9 400	8 800	5 600	5 600	11 100	8 100	2 400	30,0
Na ₂ O	3 000	8 100	1 500	5 000	4 400	2 900	64,8	3 300	5 100	2 800	2 600	6 500	4 100	1 700	41,5
Na ₂ O _{eq}	8 100	15 000	4 600	11 500	9 800	4 500	-	9 400	10 900	6 400	6 300	13 800	9 400	3 200	-

Tableau 12.5

Alcalins solubles (K₂O, Na₂O et Na₂Oeq) et taux de dissolution des neuf GBR testés

	SR1	SR2	SR3	SR4	Moy.	GR1	GR2	GR3	GR3	GR4	Moy.
Coupure	mm	0/6	0/6	0/4	0/4	4/20	4/20	4/10	4/20	4/20	
K ₂ O	mg/kg	596,8	149,9	232,4	227,6	301,7	249,5	140,9	164,5	151,0	152,5
Taux dissolution	%	7,65	1,43	4,94	2,30	4,1	2,66	1,61	2,95	2,67	2,1
Na ₂ O	mg/kg	402,6	158,5	246,7	206,9	253,7	147,7	94,6	83,1	76,3	85,0
Taux dissolution	%	13,42	0,81	16,44	4,14	8,7	4,50	1,85	3,00	2,93	2,5
Na ₂ O _{eq}	mg/kg	795,3	257,1	399,4	356,7	452,1	311,9	187,3	191,3	175,3	185,3
Taux dissolution	%	9,78	1,71	8,70	3,10	5,8	3,32	1,72	2,97	2,78	2,2

R = Sable de GBR ; GR = gravillons de GBR.

La silice soluble a été mesurée selon le protocole de l'annexe A de la norme NF P 18-594 [AFNOR, 2015a], qui classe les matériaux en trois catégories ; non réactif (NR), potentiellement réactif (PR) et potentiellement réactif avec effet pessimum (PRP). L'essai consiste à placer une petite quantité (25 g) de l'échantillon broyé dans une solution de soude (25 ml – 1M) pendant 24, 48 ou 72 heures. Le titrage de SiO_2 et de Na_2O dans la solution se fait par spectrométrie ICP. Les résultats de la silice soluble sont rapportés à la teneur en soude, soit $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ (Tableau 12.6 et Figure 12.9).

Les fractions les plus fines des GBR libèrent très peu de silice (matériaux NR) contrairement aux fractions plus grenues qui peuvent en libérer des quantités plus importantes. En particulier, les trois gravillons de GBR produits sur les plateformes n° 1 et n° 3 en libèrent des quantités importantes qui classent les matériaux comme potentiellement réactifs (PR), en raison aussi de la présence de phases instables (voir les prochains essais). Par contre, les sables et les gravillons de GBR des plateformes n° 2 et n° 4 libèrent des faibles quantités de silice, qui classent ces granulats comme matériaux non réactifs (NR).

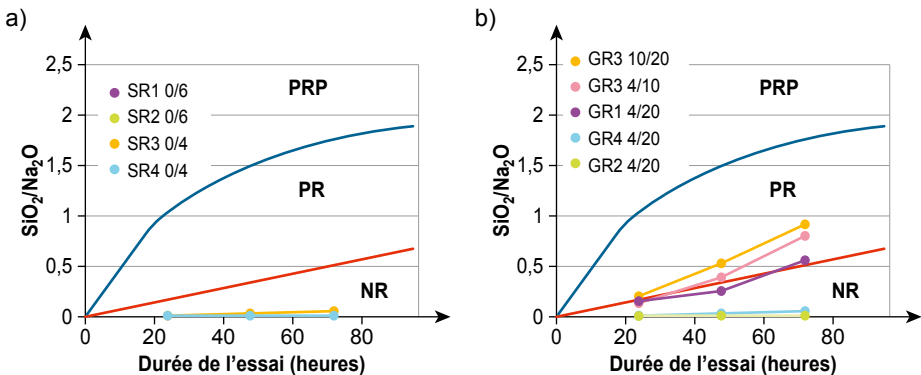
Tableau 12.6

Silice soluble ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) mesurée sur les neuf GBR testés

	SR1	SR2	SR3	SR4	Moy.	GR1	GR2	GR3	GR3	GR4	Moy.
$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	0/6	0/6	0/4	0/4		4/20	4/20	4/10	10/20	4/20	
24 h	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,16	0,02	0,13	0,20	0,02	0,11
48 h	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,27	0,04	0,41	0,55	0,05	0,26
72 h	0,03	0,05	0,05	0,02	0,04	0,55	0,06	0,81	0,94	0,07	0,49

Figure 12.9

Silice soluble ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) mesurée après 24, 48 et 72 heures



Afin de connaître l'origine de la silice et des alcalins solubles, les essais précédents ont été reconduits (Tableau 12.7 et Tableau 12.8) sur des gravillons de GBR artificiellement enrichis (tri visuel) en l'une ou en l'autre des deux phases constitutives, c'est-à-dire en pâte de ciment adhérente (PCA) ou en granulats naturels (GN). Un échantillon composé uniquement de fragments de tuiles et de briques collectés dans le GBR GR1 a également été testé.

Tableau 12.7

Alcalins solubles (K_2O , Na_2O et Na_2O_{eq}) mesurés sur les GBR enrichis

		GR1	GR2	GR3	GR4		
Coupure	mm	4/20	4/20		10/20		4/20
Enrichissement		Tuiles/briques	PCA	GN	PCA	GN	PCA
K_2O	mg/kg	149,4	501,6	69,0	445,0	40,1	260,2
Na_2O	mg/kg	64,5	346,7	24,2	110,8	19,6	69,9
Na_2O_{eq}	mg/kg	162,8	676,7	69,6	403,6	45,9	241,1

Par rapport aux valeurs initiales (Tableau 12.5 et Tableau 12.6), la teneur en alcalins solubles dans l'eau augmente fortement pour les GBR enrichis en pâte de ciment adhérente (PCA), contrairement aux GBR enrichis en granulats naturel (GN). L'échantillon entièrement composé de fragments de tuiles et de briques libère une forte quantité d'alcalins solubles dans l'eau, qui explique (en partie) la teneur élevée en alcalins solubles du GBR GR1.

Tableau 12.8

Silice soluble (SiO_2/Na_2O) mesurée sur les GBR enrichis

		GR1	GR3	
SiO_2/Na_2O		4/20		10/20
Enrichissement		Tuiles/briques	GN	PCA
2 4h		1,41	0,49	0,03
48 h		2,14	0,79	0,03
7 2h		2,03	1,05	0,04

Le taux élevé de silice soluble libérée par le gravillon de GBR GR3 (classe 10/20) est essentiellement lié à son granulats naturel, riche en silex. L'essai effectué sur le même matériau enrichi en pâte de ciment adhérente PCA (en excluant la présence de silex) conduit à un faible taux de silice soluble, proche de celui des sables de GBR. Comme pour l'essai d'alcalins solubles dans l'eau,

on observe à nouveau que la pollution en fragments de briques est la source d'une très haute teneur en silice soluble (pouvant engendrer une réaction alcali-silice). Ce matériau « polluant » est classé dans la catégorie PRP.

Ces essais montrent le rôle de la pâte de ciment adhérente dans la libération d'alcalins solubles. En effet, les composés alcalins qu'elle contient sont beaucoup moins stables que ceux associés aux minéraux des granulats naturels (tels les feldspaths), excepté pour les minéraux et les structures altérées. Le processus de concassage du béton tend à concentrer la PCA dans la fraction fine [Hansen, 1992b], ce qui explique la teneur élevée en alcalins solubles dans l'eau des sables. Mais des polluants, tels les fragments de tuiles et de briques, peuvent aussi libérer d'importantes quantités d'alcalins solubles.

La silice soluble est essentiellement libérée par les phases instables pouvant exister dans le granulat naturel d'origine de certains GBR. La PCA libère une faible quantité de silice soluble, voire même pas du tout. La pollution par les fragments de briques est, là aussi, une source critique de silice soluble.

12.3.3.3. Réactivité potentielle des GBR

Pour compléter les résultats précédents, des essais sur mortier (autoclave) et des essais « microbar » ont été réalisés sur les neuf GBR sélectionnés, afin de déterminer la réactivité potentielle de ces différents GBR selon la norme [NF P18-594, 2015a].

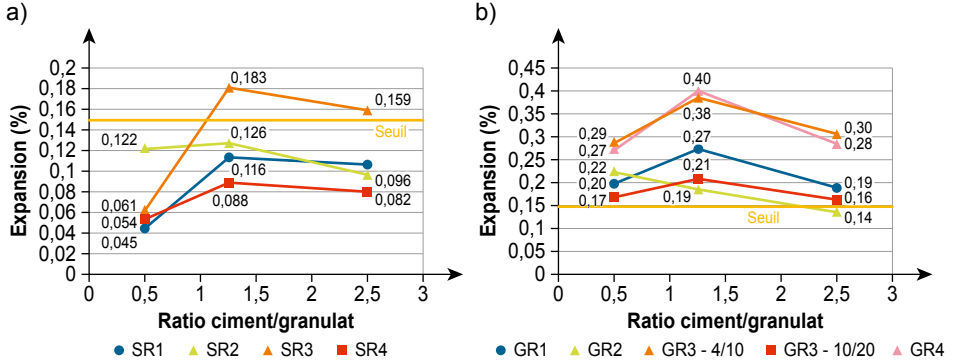
Les essais sur mortier (autoclave) ont été effectués sur la classe 0,16/5 mm obtenue par tamisage des sables et par broyage et tamisage des gravillons de GBR. Les mortiers avaient un rapport eau/ciment égal à 0,5 et des rapports ciment/granulat de 0,5, 1,25 et 2,5 respectivement. À noter que le protocole normalisé a été adapté pour tenir compte de la forte absorption d'eau des GBR ; une étape de présaturation des sables a été pratiquée selon le protocole décrit par Delobel [Delobel *et al.*, 2016].

Pour chaque mortier, l'expansion longitudinale a été mesurée sur trois éprouvettes prismatiques $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, après traitement à l'autoclave pendant 5 heures à $127 \text{ }^\circ\text{C}$. Selon la norme [NF FD P 18-542, 2015], qui fixe les critères d'acceptabilité de cet essai, les éprouvettes ne doivent pas présenter une expansion supérieure à 0,15 % pour que le granulat soit considéré comme NR, au regard de la RAS.

La Figure 12.10b montre que tous les gravillons de GBR sont classés comme potentiellement réactifs (PR), puisque quasiment toutes les valeurs d'expansion sont supérieures à la valeur seuil. Les résultats pour GR1 et GR3 confirment ceux obtenus avec l'essai de silice soluble (Figure 12.9b) et les essais de caractérisation des granulats. En effet, le granulat GR1 contient une forte teneur en fragments de briques et les granulats naturels des deux gravillons GR3 sont riches en silex. Par contre, les deux essais ne donnent pas la même hiérarchie pour GR2 et GR4.

Figure 12.10

Expansion des mortiers en fonction du rapport ciment/granulat ; a) mortier provenant de différents sables de GBR ; b) mortier provenant de différents gravillons de GBR



Pour tous les sable, excepté SR3, les expansions sur mortier (Figure 12.10a) sont inférieures au seuil spécifié, ce qui classe ces matériaux en catégorie « non réactif » (NR), conformément aux résultats de l'essai de silice soluble (Figure 12.10). Pour SR3, la présence probable de silex dans son granulat naturel peut expliquer sa classification dans la catégorie « potentiellement réactif » (PR). La même conclusion a été obtenue avec l'essai sur micro-mortier (microbars) (Figure 12.10a) et avec les essais à long terme sur béton, pour la formule A3 (voir Figure 12.12).

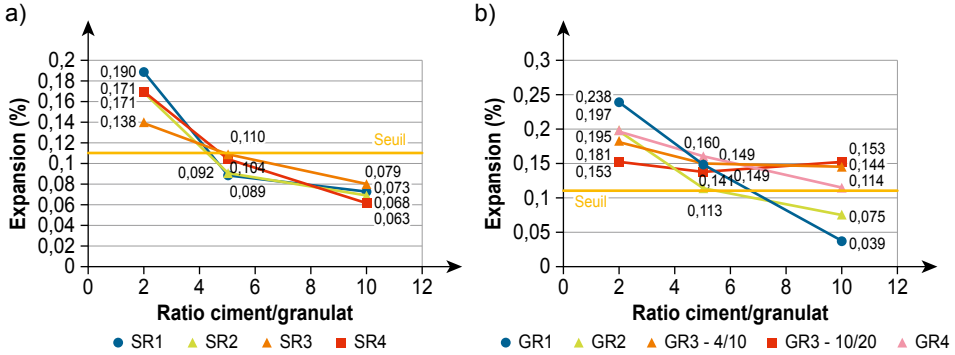
Les essais sur micro-mortier ont été effectués sur la classe 0,16/0,63 mm obtenue par broyage puis tamisage des sables et gravillons de GBR. Les micro-mortiers avaient un rapport eau/ciment égal à 0,3 et des rapports ciment/granulat de 2, 5 et 10 respectivement. Comme précédemment, le protocole normalisé a dû être adapté pour tenir compte de la forte absorption d'eau des GBR (une étape de pré-saturation des granulats a été effectuée selon le protocole décrit par Delobel [Delobel *et al.*, 2016]).

Pour chaque micro-mortier, l'expansion longitudinale après 4 heures de traitement à la vapeur, suivi d'un traitement alcalin pendant 6 heures à 150 °C, a été mesurée sur quatre prismes (10 × 10 × 40 mm³). Selon la norme [NF FD P 18-542, 2015], qui fixe les critères d'acceptabilité des résultats des essais sur micro-mortier, les prismes ne doivent pas présenter une expansion supérieure à 0,11 % pour que le granulat soit accepté au regard de la RAS.

La Figure 12.11 montre que tous les sables et gravillons de GBR sont classés « potentiellement réactifs » (PR) car au moins une valeur d'expansion est supérieure au seuil d'acceptabilité. Ce résultat contredit la classification obtenue avec l'essai de la silice soluble (Figure 12.9), pour tous les sables de GBR et pour les gravillons GR2 et GR4. Seuls les gravillons GR1 et GR3 corroborent les résultats de l'essai de la silice soluble. D'autre part, la classification

Figure 12.11

Expansion des micro-mortiers en fonction du rapport ciment/granulat ; a) micro-mortier à base des différents sables de GBR ; b) micro-mortier à base des différents gravillons de GBR



« potentiellement réactif » (PR) de tous les gravillons de GBR est confirmée à la fois par les essais sur mortier (autoclave) et microbars (Figure 12.10b). Pour les sables de GBR, seul le sable SR3 est classé de la même façon par les deux essais (Figure 12.10a et Figure 12.11a).

Le désaccord pour les sables de GBR entre les résultats de l'essai microbars et les essais sur mortiers et de silice soluble peut s'expliquer par les conditions sévères de l'essai microbars, mais aussi par l'utilisation de la fraction 0,16/0,63 mm. En effet, la production de cette fraction, par broyage et tamisage, conduit à éliminer la fraction la plus fine riche en pâte de ciment, et donc à accroître la proportion de granulat naturel qui contient les phases réactives.

12.3.3.4. Béton incorporant des GBR

Afin de vérifier sur béton l'effet des principales solutions pour limiter les expansions dues à la RAS, l'étude s'est focalisée sur la teneur en GBR et sur la teneur en alcalins, et sur l'utilisation de métakaolin MK ou de laitier moulu de haut-fourneau LMHF comme inhibiteurs de la RAS.

Les essais ont été réalisés conformément à la norme [NF P 18-454, 2004], qui étudie la réactivité alcaline d'une formulation de béton donnée en mesurant l'expansion longitudinale dans le temps de trois éprouvettes prismatiques de béton ($70 \times 70 \times 282 \text{ mm}^3$) conservées à $60 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ et à HR 100 %. Selon la norme [NF FD P 18-456, 2004], qui donne les critères d'interprétation des résultats des essais de performance, le béton doit présenter une expansion inférieure à 0,02 % après 5 mois (20 semaines) pour être accepté au regard de la RAS.

La composition des bétons est donnée Tableau 12.9, avec les informations concernant les matériaux. Les GBR utilisés pour ces bétons sont le sable SR3 et les gravillons GR3 4/10 et 10/20 (plateforme de production n° 3) dont

Tableau 12.9
Formulations des bétons incorporant du sable et des gravillons de GBR (plateforme n° 3)

Nom du béton	Teneur en GBR				Teneur en alcalis				Effet des additions minérales liantes			
	A1	A2	A3	A3	B1	B2	B2	B2	C1	C2	C3	C4
Constituants (kg/m ³)	30S30G	0S100G	100S100G	100S100G	0S100G	0S100G	0S100G	0S100G	0S100G	0S100G	0S100G	0S100G
Ciment	321 ⁽²⁾	336 ⁽²⁾	381 ⁽²⁾	336 ⁽¹⁾	336 ⁽¹⁾	336 ⁽¹⁾	336 ⁽¹⁾	336 ⁽¹⁾	336 ⁽¹⁾	280 ⁽¹⁾	184 ⁽¹⁾	336 ⁽²⁾
Fillers calcaires	44	53	70	53	53	53	53	53	53	-	-	53
Méakaolin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70	-	-
LHF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	184	-
Sable naturel	482	698	-	698	698	698	698	698	782 ⁽⁶⁾	782 ⁽⁶⁾	782 ⁽⁶⁾	782 ⁽⁶⁾
Sable de GBR	214	-	663	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gravillons naturels	720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gravillons de GBR	307	926	734	926	926	926	926	840	840	840	840	840
Eau totale	220	238	284	238	238	238	238	238	238	238	238	238
Superplastifiant	1,64	2,18	2,78	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,62	2,18	2,18
Retardateur	1,30	-	3,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	0,6	0,6	0,7	0,2	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	5,0	5,9	0,6
Teneur en alcalis (Na ₂ O _{eq})	2,5	2,6	3,2	2,9	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	2,7
Taux de GBR (%/total des granulats)	30	57	100	57	57	57	57	52	52	52	52	52

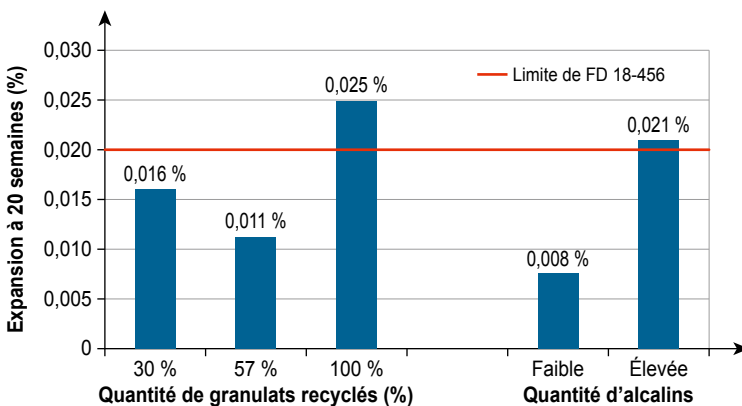
(1) CEM I 52,5R (4 500 cm²/g, 0,76 % Na₂O_{eq}) ; (2) CEM III/A-L 42,5N (11 % de fillers calcaires, 3 700 cm²/g, 0,59 % Na₂O_{eq}) ; (3) 4 600 cm²/g ; (4) cendres calcinées, 16 m²/g, indice d'activité (15 % à 28) : 1,05 ; (5) CaO/SiO₂ : 1,14, 4 300 cm²/g, Na₂O_{eq} solubles dans l'eau : 0,003 % ; (6) pour les bétons de la série C, le sable naturel était potentiellement réactif aux alcalis, selon NF P18-594 ; (7) 0/4 mm, absorption : 9,2 %, Na₂O_{eq} solubles dans l'eau : 0,04 % ; (8) 4/20 mm, absorption : 6,2 %, Na₂O_{eq} solubles dans l'eau : 0,02 % ; (9) polycarboxylate ether.

les principales propriétés sont présentées Tableau 12.1 et 12.2. Il convient de noter que les deux gravillons de GBR sont classés PR (Figure 12.9). Les granulats naturels sont tous classés NR au regard du risque de RAS, excepté pour le sable naturel utilisé dans le béton C1, qui est PR. Il convient de noter aussi que la classe de résistance des bétons est C35/45, et que l'état hydrique des sables et gravillons de GBR a toujours été maintenu à une valeur de 1 % supérieure à leur coefficient d'absorption d'eau.

La Figure 12.12 présente l'expansion des bétons conservé à 60 °C après 20 semaines, en fonction de la teneur en GBR et en alcalins. Ces deux paramètres ont des effets significatifs. D'une part, l'augmentation de la teneur en GBR entraîne une augmentation de l'expansion des bétons. Jusqu'à 100 % de gravillons de GBR pourraient être utilisés si la teneur en alcalins est inférieure à 3 kg/m³, mais l'utilisation de 100 % de GBR (substitution totale du sable et des gravillons naturels) doit être évitée, même avec une teneur en alcalins d'environ 3 kg/m³. En effet, ce type de béton est difficilement « coulable », en raison de la forte absorption d'eau des GBR. D'autre part, une teneur élevée en alcalins provoque une expansion au-delà de la limite admise, y compris pour les granulats naturels. À cet égard, plusieurs auteurs proposent une teneur seuil en alcalins pour les bétons de granulats naturels, comprise entre 3 et 5 kg d'alcalins par m³ [Oberholster, 1983 ; Rogers et Hooton, 1991 ; Hobbs, 1993 ; Thomas *et al.*, 1996 ; Shehata et Thomas, 2000 ; Multon *et al.*, 2008], en dessous de laquelle le risque d'apparition d'une RAS est faible. Les recommandations françaises pour la prévention de la réaction alcali-silice

Figure 12.12

Expansion à 20 semaines des bétons conservés à 60 °C et contenant des GBR, pour différentes teneurs en GBR et en alcalins



Béton	A1	A1	A3	B1	B2
Sable recyclé	30 %	0 %	100 %	0 %	0 %
Gravillons recyclés	30 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Quantité d'alcalins	2,5 kg/m ³	2,6 kg/m ³	3,2 kg/m ³	2,9 kg/m ³	6,2 kg/m ³

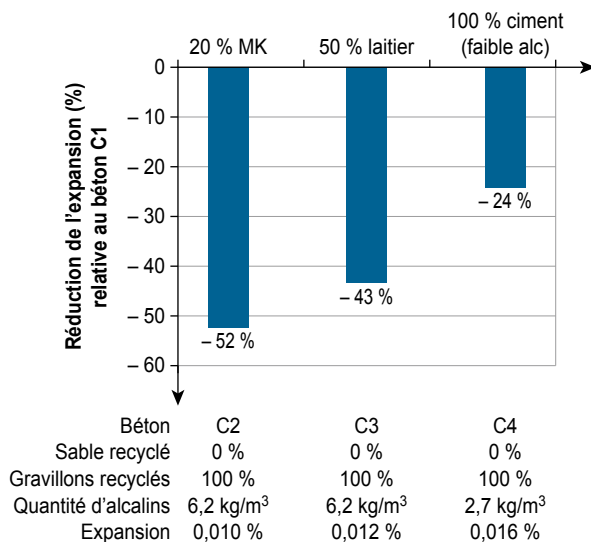
recommandent une valeur maximale de $3,5 \text{ kg/m}^3$, si le liant utilisé contient moins de 60 % de LHF [NF FD P 18-464, 2014]. On peut voir ici que ces valeurs conviennent également pour les GBR.

La Figure 12.13 montre l'effet du métakaolin (MK) et du laitier moulu de hauts fourneaux (LMHF) sur la réduction de l'expansion de bétons ayant une teneur élevée en alcalins, et formulés avec du ciment uniquement (CEM I et CEM II, voir Tableau 12.9). Il faut noter que le sable naturel utilisé dans ces formulations était réactif aux alcalins (expansion de 0,25 % sur mortiers, selon la norme NF P18-594, soit une valeur supérieure à la limite de 0,15 % fixant la catégorie NR ; le béton C1 a atteint une expansion de 0,021 %). Ces résultats confirment, sur bétons de GBR, que le MK et le LMHF, lorsqu'ils sont utilisés à des taux suffisamment élevés, permettent de réduire significativement l'expansion de formulations réactives (valeurs d'expansion indiquées sur la Figure 12.13). Dans le cas présent, l'utilisation 20 % de MK et 50 % de LMHF a permis de réduire l'expansion de 52 % et de 43 % respectivement, et de la ramener à des valeurs inférieures à la limite fixée par la norme. Le MK et le LMHF ont ici un effet encore plus efficace que la diminution de la teneur en alcalins de la formulation, la réduction de l'expansion obtenue atteignant 24 % pour une teneur résiduelle en alcalins de $2,7 \text{ kg/m}^3$.

Figure 12.13

Réduction de l'expansion par rapport à un béton contenant 100 % de ciment ($2,7 \text{ kg/m}^3$ d'alcalins), pour des bétons contenant 20 % de métakaolin (20 % MK) ou 50 % de laitier moulu de hauts fourneaux (50 % LMHF) en substitution du ciment et ayant une teneur en alcalins ajustée à $6,2 \text{ kg/m}^3$.

Tous les gravillons naturels ont été remplacés par des gravillons de GBR. Le sable naturel utilisé dans toutes les formulations était réactif aux alcalis



La Figure 12.14 résume tous les résultats d'expansion en termes de teneur en GBR et en alcalins. On voit qu'une zone de sécurité sans additions minérales peut être distinguée (bien qu'elle devrait être définie plus précisément), en fonction de deux paramètres :

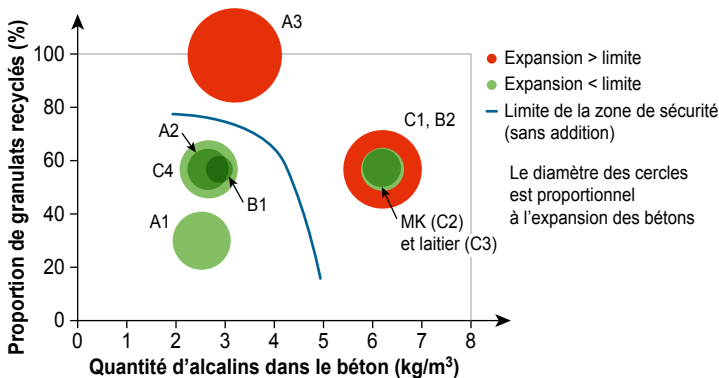
- la présence d'une grande quantité d'alcalins dans le béton limite le taux de substitution des granulats naturels par des GBR ;
- une plus grande quantité de GBR dans le béton implique une diminution de la teneur en alcalins pour rester en dessous de la limite d'acceptabilité de l'expansion.

L'utilisation d'additions minérales pouzzolaniques peut être une bonne solution pour accepter soit une augmentation de la teneur en alcalins sans avoir un effet significatif sur l'expansion (Figure C – cercles MK et LMHF), soit une augmentation de la teneur en GBR.

Tous les gravillons naturels ont été remplacés par des gravillons de GBR. Le sable naturel utilisé dans toutes les formulations était réactif aux alcalis.

Figure 12.14

Expansion des bétons (proportionnelle au diamètre des cercles) contenant différents taux de GBR, à teneur en alcalins variable. A1, A2, A3, B1, B2, C1, C2, C3 et C4 sont les dénominations des bétons



12.3.3.5. Conclusion

Les GBR peuvent être une source potentielle de composants alcalins solubles dans l'eau, en particulier les sables qui contiennent une part importante de pâte de ciment adhérente. Les gravillons contiennent souvent des composants alcalins qui sont stabilisés dans les minéraux silicatés (non altérés) du granulat naturel. La teneur en alcalins soluble dans l'eau des GBR peut atteindre des valeurs élevées > 400 mg/kg ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$). Ces valeurs sont plus élevées que celles de la plupart des granulats naturels et elles sont proches, voire supérieures à celles des granulats marins. Les minéraux naturels contenus dans les GBR

peuvent contenir un taux important de silice instable et/ou des structures cristallines qui peuvent développer une RAS. Ce problème est plus prégnant pour les gravillons de GBR car les sables sont souvent composés de phases silicatées non réactives : quartz naturel (alluvial) et pâte de ciment adhérente. La réactivité potentielle des GBR peut alors être détectée en mesurant les paramètres précédents ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ et silice instable) ou en réalisant des essais spécifiques sur mortiers, sachant que l'essai à l'autoclave paraît mieux adapté au GBR que l'essai microbar. L'absorption d'eau des GBR doit être prise en compte dans ce type d'essai.

Les essais réalisés sur béton (en utilisant des GBR classés Potentiellement Réactifs) montrent la possibilité d'utiliser jusqu'à 100 % de gravillons de GBR. Un béton où les granulats naturels sont substitués par 30 % de sable et de gravillons de GBR présente également une expansion acceptable ($< 0,02$ % après 5 mois) au regard de la RAS. En revanche le béton incorporant 100 % de sable et 100 % de gravillons de GBR n'est pas durable. Les résultats expérimentaux ont permis de définir une zone de sécurité correspondant à des bétons qui présentent des valeurs d'expansion inférieures à $0,02$ %. Les bétons situés dans cette zone sécuritaire possèdent tous une teneur maximale en granulats de GBR inférieure ou égale à 60 %, une teneur maximale en sable de GBR inférieure ou égale à 30 % et une teneur en alcalins inférieure à 3 kg/m^3 . Au-delà de ces limites, il est observé que l'expansion peut aussi être considérablement réduite jusqu'à des valeurs acceptables en introduisant du MK et du LMHF à des taux suffisants. Dans tous les cas, ces produits peuvent réduire l'expansion du béton causée par une RAS, jusqu'à 50 % de la valeur initiale.

Tous les résultats obtenus dans cette étude montrent que les règles et recommandations actuelles pour éviter une RAS peuvent être appliquées pour les bétons de GBR, en tenant compte de modifications nécessaires sur les protocoles, et de la variabilité des GBR qui peut être plus importante que pour les granulats naturels.

12.3.4. Effet des GBR sur les attaques sulfatiques dans le béton

12.3.4.1. Introduction

Ce sous-chapitre présente les principaux résultats concernant les attaques sulfatiques observées dans la cadre du Projet National RECYBETON. Les essais ont été réalisés sur mortiers et bétons. L'objectif était de se placer en conditions défavorables, en utilisant des GBR ayant des taux élevés de sulfates solubles dans l'eau, avec ou sans pollution supplémentaire en plâtre (simulant une pollution provenant de la démolition de bâtiment). L'étude comportait trois objectifs principaux :

- étudier l'influence des GBR vis-à-vis du risque de formation différée d'ettringite (RSI). Les essais ont été réalisés sur des mortiers étuvés à

80 °C. Les variations dimensionnelles des éprouvettes ont été mesurées sur une durée de plus de 450 jours ;

- étudier l'influence des GBR sur le risque d'attaque par formation d'ettringite secondaire non liée à un échauffement du béton au jeune âge. Les essais ont donc été réalisés sur bétons non étuvés conservés dans l'eau à 20 °C. L'évolution de la longueur des éprouvettes a été mesurée sur une durée de plus de 300 jours ;
- étudier l'influence des GBR sur le risque de désordres liée à la formation de thaumasite. Les essais ont été réalisés sur des bétons non étuvés conservés dans l'eau à 4 °C. L'évolution de longueur des éprouvettes a été mesurée sur une période d'essai de plus de 300 jours.

12.3.4.2. Caractérisation des bétons de GBR et de la pollution par des plâtres

12.3.4.2.1. GBR

La minéralogie et la composition chimique des différents GBR ont été présentées dans un chapitre précédent (voir partie 3). Il y est montré que les GBR sélectionnés pour le Projet National RECYBETON contiennent principalement des bétons sans pollution visible en plâtres. Les minéraux silicatés et carbonatés sont prédominants, comme confirmé par les identifications par DRX et par microscopie optique.

Dans cette partie dédiée aux attaques sulfatiques, les sables de GBR issus de quatre plateformes (n° 1, 2, 3 et 4) et les gravillons de GBR de la plateforme n° 3 ont été retenus. L'analyse de leur composition chimique a montré la présence d'une faible quantité de sulfate (SO_3) et d'alcalins (K_2O , Na_2O). Rappelons que les alcalins jouent un rôle important dans l'amplification de la RSI [Leklou, 2008 ; Nguyen *et al.*, 2013]. La section précédente, consacrée à la RAS, a montré la grande solubilité de ces alcalins, en particulier pour les sables de GBR des plateformes n° 2 et n° 3. Le Tableau 12.10 regroupe ces différents paramètres.

La teneur en sulfate soluble dans l'eau des GBR a été déterminée conformément à la norme NF EN 1744-1, § 10. La méthode d'essai consiste à mélanger 25 grammes de granulats broyés (taille inférieure à 4 mm) avec 1 litre d'eau à 65 °C (± 5 °C) sous agitation pendant 15 minutes. Les résultats (Tableau 12.10) montrent que les GBR libèrent une quantité très variable de sulfate solubles dans l'eau (< 0,08 % à 0,24 %). L'essai réalisé sur les GBR de la même plateforme n° 3 montrent que le sable (SR3) libère plus de sulfate que les gravillons (GR3), probablement parce qu'il contient plus de pâte de ciment adhérente (PCA) qui intègre les composants cimentaires initiaux.

Tableau 12.10

Teneurs (%) en Al_2O_3 , SO_3 , K_2O et Na_2O des sables de GBR des quatre plateformes et des gravillons de GBR de la plateforme n° 3. Les quantités d'alcalins solubles dans l'eau (mg/kg) sont également données

			SR1	SR2	SR3	SR4	GR3	
Coupure			0/6	0/6	0/4	0/4	4/10	10/20
Al_2O_3	Total	%	4,54	5,58	2,47	7,76	2,47	2,39
SO_3	Total	%	0,62	0,39	0,47	0,35	0,12	0,14
	Soluble dans l'eau	%	0,20	< 0,08	0,24	0,11	0,10	0,12
K_2O	Total	%	0,78	1,05	0,47	0,99	0,56	0,56
	Soluble dans l'eau	mg/kg	596,8	149,9	232,4	227,6	164,5	151,0
Na_2O	Total	%	0,30	0,81	0,15	0,50	0,28	0,26
	Soluble dans l'eau	mg/kg	402,6	158,5	246,7	206,9	83,1	76,3

Afin de déterminer l'origine des sulfates, un essai spécifique a été effectué. Il a consisté à enrichir les gravillons de GBR (4/10 et 10/20) de la plateforme n° 1 avec soit leur propre PCA soit leur propres granulats naturels (GN). Ces « enrichissements » ont été réalisés en triant visuellement les grains selon leur aspect. Les résultats (Tableau 12.11) montrent que les gravillons de GBR enrichis en PCA libèrent au moins deux fois plus de sulfates à 60 °C (4/10) ou à 20 °C (10/20) que les gravillons de GBR enrichis en granulats naturels.

Tableau 12.11

Sulfates solubles dans l'eau des gravillons de GBR GR3 enrichis manuellement en PCA ou en granulats naturels, testés à 60 °C (4/10) ou à 20 °C (10/20)

	60 °C – GR3 (4/10) 25 g broyés (0/4) – 1 L d'eau – 15 minutes	20 °C – 2 kg GR3 (10/20) 4 L d'eau – 7 jours
Enrichissement en GN	< 0,08	0,036
Sans triage (référence)	0,10	0,065
Enrichissement en PCA	0,18	0,080

La dissolution des sulfates a également été étudiée, selon la température, le type d'agitation, le rapport eau/GBR, etc. Par exemple (Tableau 12-12), sans broyage des GBR, à 20 °C et après 1 jour, les sulfates dissous représentent près de 20 % des sulfates solubles mesurés à 60 °C sur GBR broyés. La dissolution dans l'eau à 20 °C est un processus long : entre 1 jour et 1 semaine, la quantité dissoute est multipliée par 2 à 3.

Tableau 12.12

Comparaison des sulfates solubles dans l'eau à 20 °C et à 60 °C
(NF EN 1744-1, § 10.2)

GR3	Conditions	Sulfates solubles (%)			
		15 minutes	1 jour	2 jours	7 jours
4/10	20 °C – 2 kg GR (10/20) – 4 L d'eau	/	0,025	0,038	0,055
	60 °C – 25 g broyés (0/4) – 1 L d'eau	0,10			/
10/20	20 °C – 2 kg GR (10/20) – 4 L d'eau	/	0,024	0,040	0,065
	60 °C – 25 g broyés (0/4) – 1 L d'eau	0,12			/

La nature et la localisation des sulfates ont été déterminées par analyses MEB. Elles ont confirmé la présence de sulfates dans la PCA et leur combinaison avec l'alumine et le calcium. Les sulfates dans les GBR sont ainsi associés à l'ettringite et/ou au monosulfoaluminate (ou à leurs produits carbonatés : calcaire, gibbsite et gypse). Pour les échantillons conservés sous eau pendant un mois, la surface exposée à l'eau contient moins de sulfates que le cœur non exposé.

12.3.4.2.2. Plâtre utilisé comme source de pollution

Afin de prendre en compte les sources potentielles de pollution en sulfates provenant de la démolition des bâtiments, trois type de plâtre habituellement utilisés ont été caractérisés : un enduit-colle, des plaques et des carreaux de plâtre. Leur minéralogie respective (analyses DRX) et leur composition chimique (analyses FX) sont quasi-identiques. Ils sont composés de gypse et d'une faible quantité de quartz (< 1,5 %). Les impuretés (Al_2O_3 , MgO et ZrO) représentent moins de 1 %. La teneur en sulfate soluble dans l'eau de ces trois produits a également été mesurée, en prenant en compte leur solubilité élevée. Les valeurs présentées dans le Tableau 12.13 résultent d'une modification du protocole normalisé utilisé pour les GBR. Seul 0,5 ou 0,25 grammes de produit a été introduit dans 1 litre d'eau. Ils montrent que la solubilité n'augmente pas, voire même décroît avec la masse testée, en raison de la saturation en sulfate rapidement atteinte avec ces produits. Les plaques et les carreaux de plâtre ont des valeurs de solubilité similaires (40 à 45 %) légèrement supérieures à celle de la colle (37 %).

Compte tenu de ces résultats, un mélange a été préparé, représentatif de la pollution par le plâtre, pour étudier ses effets sur les mortiers et bétons. Ce mélange, composé de 2/3 de carreaux de plâtre et de 1/3 d'enduit-colle préalablement hydratée, a été réduit par broyage et tamisage en une poudre fine homogène de deux granulométries : 0/100 μm et 0,1/2 mm. La teneur en sulfates solubles dans l'eau de ce mélange a été mesurée dans les mêmes conditions que pour les différents plâtres seuls (0,5 et 0,25 g). Les valeurs

résultantes, 41,6 et 45,6 %, sont légèrement supérieures à celles des carreaux (probablement en raison d'une plus grande finesse de la poudre) mais elles sont conformes aux valeurs de ses constituants (Tableau 12.13).

Tableau 12.13

Solubilité dans l'eau des plâtres utilisés comme polluant et solubilité du mélange (2/3 de carreaux et 1/3 de colle)

		Plaques BA13		Carreaux		Enduit-colle		Pollution plâtre = 2/3 carreaux + 1/3 colle	
Masse testée	g	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25
Sulfates solubles dans l'eau (SO ₄ ²⁻)	%	41,2	44,0	40,8	45,2	37,5	37,6	41,6	45,6
Moyenne	%	42,6		43,0		37,5		43,6	

Une pollution expérimentale des GBR par le plâtre a ensuite été provoquée en introduisant cette poudre dans certains mélanges (en substitution des granulats) afin d'obtenir au total 0,4 %, 0,8 % ou 1,2 % de sulfates solubles dans l'eau, en tenant compte des sulfates déjà présents dans les GBR. La répartition de cette pollution au sein des granulats a été obtenue par un brassage à sec dans une bétonnière, en un temps assez court pour éviter l'attrition, afin d'obtenir un produit homogène sans modification de la granulométrie des constituants.

12.3.4.3. Principaux résultats obtenus dans le cadre du Projet National RECYBETON

Trois ciments ont été sélectionnés pour fabriquer les mortiers et les bétons :

- un CEM I ayant une très faible teneur en C₃A (1 %), désigné « CEM I – 1 % »,
- un CEM I ayant une teneur très élevée en C₃A (10 % environ), désigné « CEM I – 10 % »,
- un mélange du même CEM I – 10 % avec des fillers calcaires (26 %), sans autre ajout, désigné comme un liant analogue à un CEM II.

Deux sables de GBR, désignés SR1 et SR3 (plateformes n° 1 et n° 3) ont été choisis pour fabriquer les mortiers. Ces sables contiennent respectivement 0,2 et 0,24 % de sulfates solubles dans l'eau (Tableau 12.10) ainsi que des teneurs élevées en alcalins solubles (Tableau 12.10). Ils ont été tamisés à 2,5 mm, de façon à obtenir une granularité quasi-identique à celle du sable normalisé NF EN 196-1, et leurs propriétés ont été à nouveau mesurées (Tableau 12.14). L'élimination des plus gros grains provoque une augmentation de l'absorption d'eau et de la teneur en sulfates solubles dans l'eau, en raison de la teneur plus élevée en PCA.

Pour les mortiers, le rapport eau/ciment a été fixé à 0,5 et le rapport sable/ciment à 3. Les éprouvettes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ont été préparées selon la norme NF EN 196-1. Après coulage, certaines d'entre elles ont subi un traitement thermique à $80 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 72 heures, pour évaluer le risque potentiel de DEF [Taylor *et al.*, 2001 ; Pavoine *et al.*, 2012 ; Nguyen *et al.*, 2013]. Les autres ont été conservées dans l'eau à $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, pour suivre la formation éventuelle d'ettringite secondaire.

Tableau 12.14

Caractéristiques des sables utilisés dans les mortiers

	Masse volumique	Ab_{24}	Sulfates solubles dans l'eau (SO_4^{2-})
SR1 tamisé 0/2,5	1,961	12,9	0,28
SR3 tamisé 0/2,5	2,070	9,9	0,27

12.3.4.4. Résultats relatifs à la formation de l'ettringite

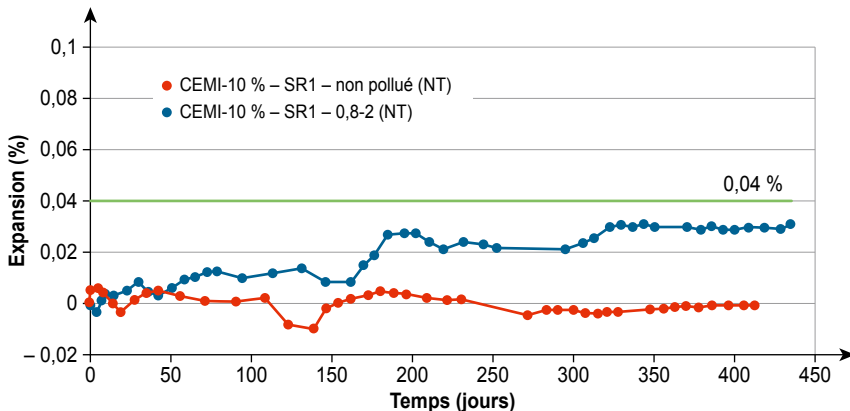
12.3.4.4.1. Analyse des résultats des mortiers incorporant des sables de GBR

Les résultats obtenus sur mortier ont révélé plusieurs points importants.

Tout d'abord, concernant la formation d'ettringite secondaire (absence de traitement thermique (NT)) (Figure 12.15), les mortiers non pollués par le plâtre (CEMI-10 % – SR1 – non pollué (NT)) présentent, après plus de 400 jours d'observation, des expansions toujours inférieures au seuil de 0,04 % (valeur

Figure 12.15

Expansions des mortiers fabriqués avec le sable de GBR SR1, le CEM I-10 %, sans traitement thermique, avec et sans pollution par le plâtre 0,1/2 (Échelle non linéaire)



critique pour le béton, correspondant à une expansion importante). Ce seuil est utilisé dans de nombreuses études ([Pavoine *et al.*, 2007 ; Brunetaud, 2005 ; Leklou, 2008 ; Nguyen *et al.*, 2013]). Pour l'essai de performance sur béton, développé en commun par l'ATILH, l'IFSTTAR et le CERIB, ce seuil de 0,04 % est aussi identifié comme valeur critique au-delà de laquelle le béton est jugé non conforme [Méthode d'essai des LPC n° 66, Pavoine *et al.*, 2007]. Ce seuil est également retenu dans le Guide Technique de l'IFSTTAR « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne » [IFSTTAR, 2017]. Avec la pollution par les plâtres (CEMI-10 % – SR1 – 0,8-2 (NT)), l'expansion des mortiers est toujours inférieure au seuil de 0,04 %, mais elle augmente progressivement avec le temps.

Le deuxième point important concerne l'effet du traitement thermique. Les mortiers ayant subi un traitement thermique présentent un risque plus élevé de formation différée d'ettringite (DEF). Les résultats de la Figure 12.16 relatifs aux mortiers fabriqués avec le sable SR3 et les deux ciments CEM I (1 % et 10 % de C_3A) montrent que la teneur en C_3A (1 % ou 10 %) du ciment n'affecte pas significativement les expansions, quel que soit le taux de pollution par le plâtre. Un faible surcroît d'expansion est observé avec l'augmentation de la teneur en C_3A , mais les comportements restent proches.

La Figure 12.17 présente les expansions des mortiers fabriqués avec le sable de GBR SR1 (CEM I-10 %-SR1). On constate que les éprouvettes développent des expansions importantes qui se stabilisent à des valeurs comprises entre 0,06 et 0,08 % après 400 jours d'essai. Les mortiers fabriqués avec le sable de GBR SR3 (CEM I-10 %) (Figure 12-16) ont montré des expansions beaucoup plus faibles et stabilisées entre 0,03 et 0,05 % après 400 jours d'essai. La teneur en alcalins solubles explique manifestement la différence de comportement entre les mortiers fabriqués avec les sables SR1 et SR3. Leur taux de sulfate soluble dans l'eau sont identiques (Tableau 12.14), mais le sable SR1 libère deux fois plus d'alcalins solubles dans l'eau que le sable SR3 (Tableau 12.10), soit respectivement 795,3 mg Na_2O_{eq}/kg et 399,5 mg Na_2O_{eq}/kg . De nombreux auteurs ont montré que plus les alcalins sont lessivés, plus les phénomènes de RSI sont amplifiés [Aubert *et al.*, 2009 ; Leklou, 2008 ; Aubert *et al.*, 2013]. La teneur en aluminates solubles des sables de GBR peut également expliquer ce phénomène. En effet, plusieurs auteurs ont montré que le risque de RSI augmentait concomitamment à la teneur en aluminates solubles [Odler *et al.*, 1995 ; Hanehara *et al.*, 2008a ; Hanehara *et al.*, 2008b]. La quantité de produits expansifs formés est corrélée à la teneur en aluminates solubles, ce qui influence le taux de dégradation. En valeur absolue, le sable SR1 contient deux fois plus d'alumine que le sable SR3 (Tableau 12.10), mais il faut toutefois déterminer les quantités pouvant être réellement mobilisées dans ces deux sables. La Figure 12.17 montre également l'effet de la finesse (gros et fin) du plâtre. À cet égard, on notera que la plus grande finesse (0/100 μm) du plâtre de déconstruction ajouté au sable SR3 n'a pas une forte influence sur la cinétique et l'amplitude des expansions, quelle que soit la formulation.

Ce phénomène s'explique par le fait que la finesse élevée du plâtre ($0/100\ \mu\text{m}$) favorise et accélère les réactions entre les sulfates et les aluminates dans les premières heures, pour former de l'ettringite primaire, et limite ainsi la quantité de sulfates adsorbés par les C-S-H et pouvant être disponibles par la suite pour former de l'ettringite différée [Yang *et al.*, 1996 ; Divet *et al.*, 1998 ; Taylor *et al.*, 2001]. Cependant, les expansions peuvent apparaître et se développer après une plus longue période de temps, comme le montre une étude [Aubert *et al.*, 2009] où les expansions ont seulement débuté après 5 ans de conservation.

Figure 12.16

Expansions des mortiers fabriqués avec le sable de GBR SR3, les CEM I-1 % et CEM I-10 % et ayant une pollution variable en plâtre 0,1/2 : cure précoce à 80 °C pendant 72 h puis conservation dans l'eau à 20 °C

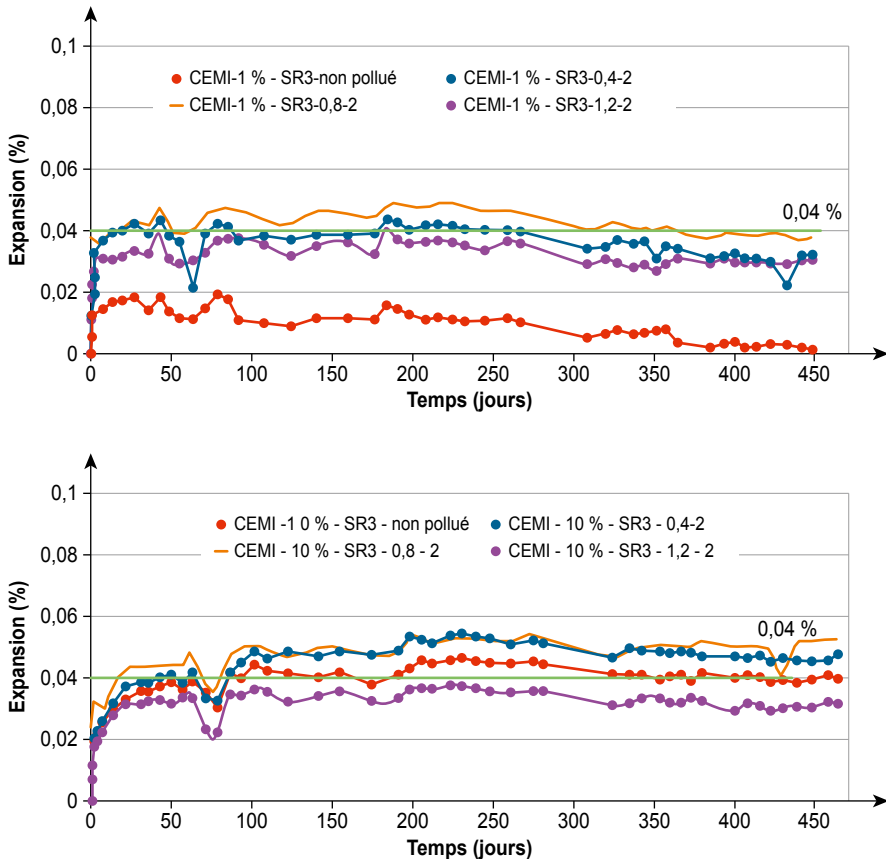
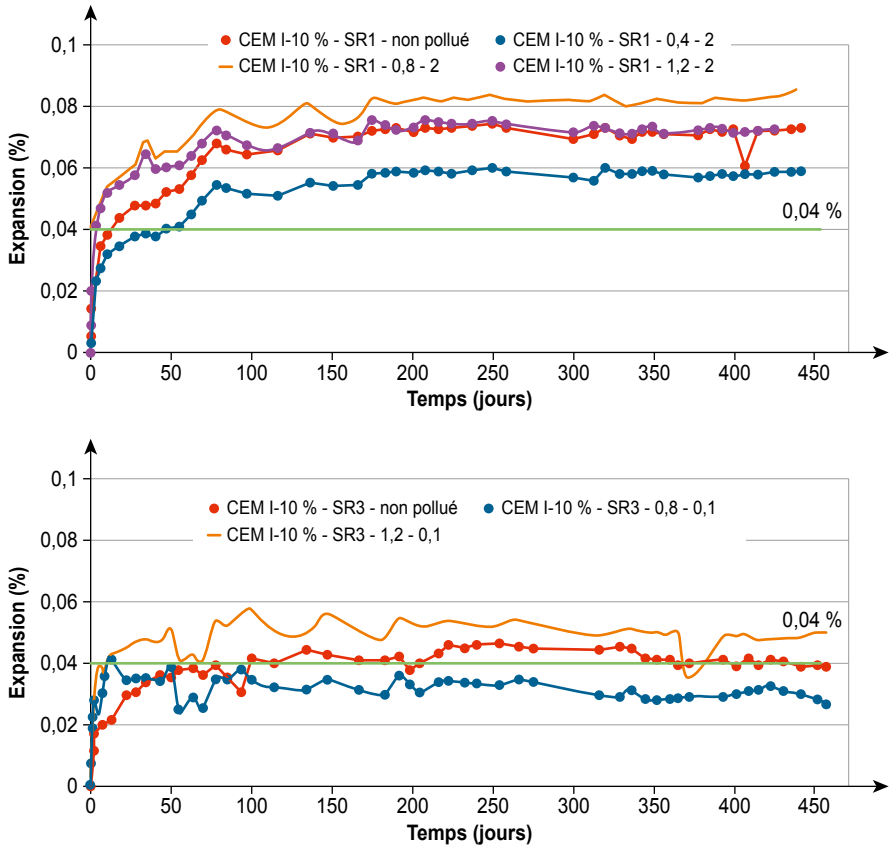


Figure 12.17

Expansions des mortiers réalisés avec le sable de GBR SR1 (CEM I-10 %-SR1), avec une pollution variable en plâtre 0,1/2, et expansions des mortiers réalisés avec le sable de GBR SR3 avec une pollution variable en plâtre 0/100µm. Cure précoce à 80 °C pendant 72 h puis conservation dans l'eau à 20 °C



12.3.4.5. Analyse des résultats sur bétons incorporant des gravillons de GBR

Pour les bétons, deux formules ont été utilisées, contenant 30 % ou 100 % de gravillons de GBR et 0 % de sable de GBR. Leurs compositions sont détaillées dans le Tableau 12.15.

Le référencement des éprouvettes de béton est défini comme suit : OS100G-CEM I-10 %-P-0,27 (OS : teneur en sable de GBR ; 100G : teneur en gravillon de GBR ; CEM I-10 % : type de ciment et teneur en C₃A ; P : origine du gravillon de GBR, avec P pour Paris ; 0,27 : teneur en sulfate soluble dans l'eau du gravillon de GBR).

Tableau 12.15

Compositions des bétons

Teneur en gravillons de GBR	100 %	30 %
Constituants	Dosage (kg/m ³)	
Ciment	282	276
Fillers calcaires	31	31
Sable naturel	806	813
Gravillons naturels 4/10	–	228
Gravillons naturels 6,3/20	–	462
Gravillons de GBR 4/10	163	–
Gravillons de GBR 10/20	701	296
Superplastifiant	1,167	1,14
Eau efficace	164	161

Huit bétons ont été étudiés pour l'essai de formation d'ettringite secondaire, avec trois teneurs en sulfates dans les gravillons (0,27, 0,8 et 1,2), deux ciments (CEM I avec 1 % ou 10 % de C₃A) et deux teneurs en gravillons de GBR (30 % et 100 %).

Les bétons ont été malaxés et coulés à 20 °C ; des éprouvettes prismatiques 7 × 7 × 28 cm ont été confectionnées. En raison de leur forte absorption d'eau, les gravillons de GBR ont été saturés pendant 24 heures, en présence d'une quantité d'eau correspondant à leur absorption d'eau + 1 %. Après coulage, les éprouvettes ont été conservées dans leur moule pendant 24 heures à 20 °C, puis dans l'eau jusqu'à 28 jours. Après cette cure, elles ont été soumises à deux cycles de 7 jours de séchage à 38 ± 2 °C et d'HR < 30 % interrompus par 7 jours d'immersion dans l'eau à 20 ± 2 °C. Les mesures d'expansion ont commencé après la dernière période d'immersion.

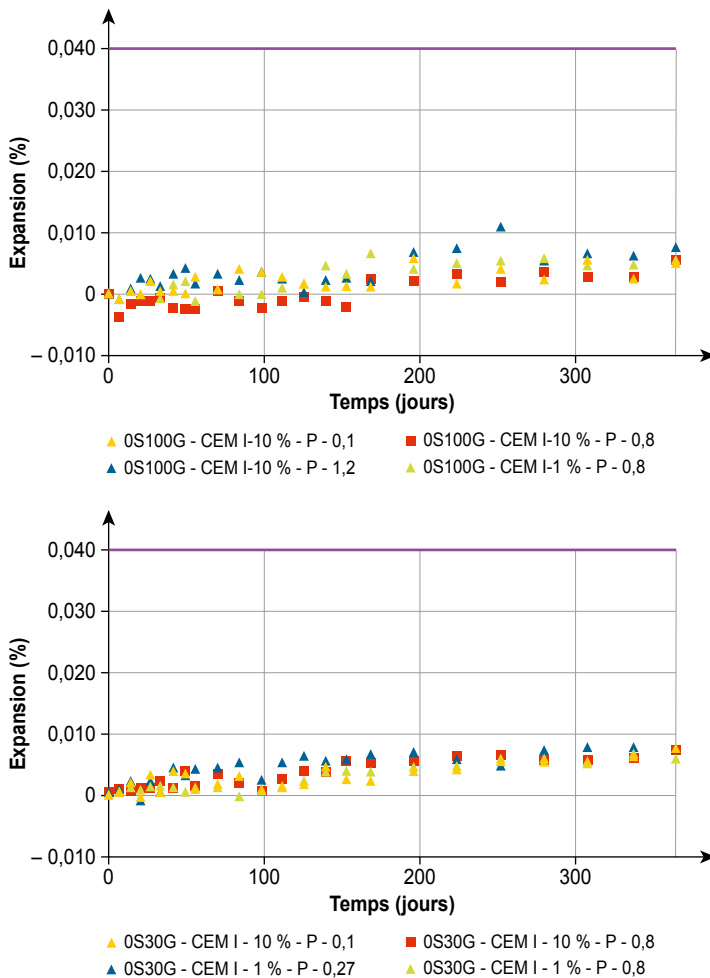
La Figure 12.18 montre l'expansion des bétons fabriqués avec 30 % et 100 % de gravillons de GBR de Paris, et les ciments « CEM I-1 % » et « CEM I-10 % ». Les éprouvettes de béton ont été conservées dans l'eau à 20 °C pendant près d'un an. Leur expansion a été très limitée et inférieure au seuil de 0,04 %. Aucune différence significative n'a été observée entre les compositions, quel que soit le type de ciment et la teneur en sulfates des gravillons de GBR.

Des analyses par microscopie électronique à balayage (MEB) ont été effectuées sur un échantillon du béton « 0S100G-CEM I-10 %-P 1,2 » ayant un an. Cette formule contient les gravillons de GBR ayant la plus forte teneur en sulfates. L'ettringite a été observée dans la microporosité de la pâte de ciment et, plus rarement, dans les bulles d'air. La faible quantité d'ettringite observée est conforme à la très faible expansion du béton. L'ettringite apparaît sous forme non-expansive.

La résistance à la compression a été mesurée sur cylindres 11 × 22 (Ø 11 cm, h 22 cm) à 28 jours et à un an. Les éprouvettes « 0S100G-CEM I-10 %-P0,27 » présentent une résistance à la compression de 31,3 MPa à 28 jours et 35,8 MPa à un an. Ces résultats corroborent les mesures d'expansion et confirment l'absence d'endommagement des éprouvettes de béton.

Figure 12.18

Expansions des bétons fabriqués avec les gravillons de GBR de Paris, les ciments « CEM I-1 % » et « CEM I-10 % », et trois teneurs en sulfates. Cure au jeune âge à 20 °C suivi d'une conservation dans l'eau à 20 °C



12.3.4.6. Résultats liés à la formation de thaumasite

Trois bétons ont été étudiés pour l'essai de la thaumasite, avec trois teneurs en sulfates dans les gravillons de GBR (0,27, 0,8 et 1,2 %), le ciment CEM II/B-LL et 100 % de gravillons de GBR (0S100G).

Pour les essais liés à la formation de la thaumasite, les bétons ont été malaxés et coulés à 20 °C, avec la même saturation en eau des gravillons de GBR que précédemment. Après coulage, les éprouvettes ont été conservées dans leur moule pendant 24 heures à 20 °C, puis dans l'eau à 4 °C. Les mesures d'expansion ont commencé à la suite. Des éprouvettes témoin ont été conservées dans l'eau à 20 °C.

La Figure 12.19 montre l'expansion des éprouvettes de béton stockées dans l'eau à 4 °C pendant un an. Les bétons ont été fabriqués avec 100 % de gravillons de GBR de Paris, le ciment CEM II/B-LL et trois teneurs différentes en sulfates. Plus la teneur en sulfates est élevée, plus les éprouvettes présentent une expansion importante. En effet, après un an d'immersion, l'expansion du béton avec les gravillons de GBR contenant 0,27 % de sulfates est très faible, de l'ordre de 0,01 %, alors que l'expansion des bétons avec les gravillons de GBR contenant 0,8 % et 1,2 % de sulfates sont proches de 0,1 % et 0,8 %, respectivement. Les éprouvettes contenant les gravillons de GBR à 1,2 % de sulfates étaient fissurées à la fin de l'essai, comme illustré Figure 12.20.

Figure 12.19

Expansions des bétons fabriqués avec le gravillon de GBR de Paris, le ciment CEM II/B-LL et trois teneurs en sulfates. Conservation au jeune âge à 20 °C, puis dans l'eau à 4 °C

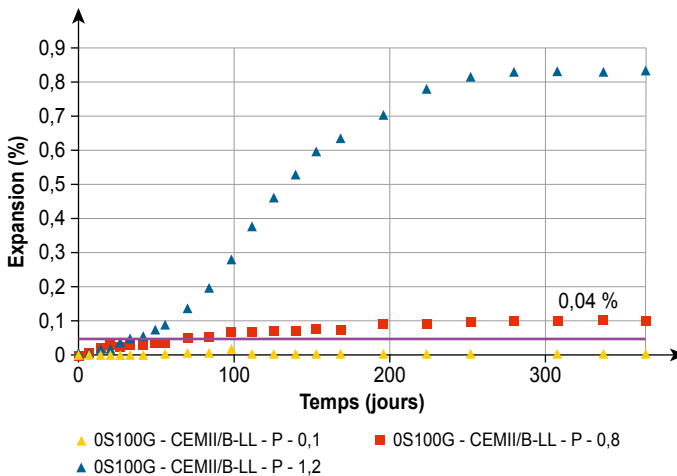


Figure 12.20

Photographie de la surface fissurée de l'échantillon « 0S-100G-CEM II/B-LL-P 1,2 » à un an



Des analyses MEB ont été réalisées sur le béton « 0S100G-CEM II/B-LL-P 1,2 » à 28 jours et à un an. Cette formule de béton contient les gravillons de GBR ayant la plus forte teneur en sulfates. Après un an d'immersion, la pâte de ciment de cet échantillon était fissurée et friable à la main. De nombreux amas sphériques formés par des cristaux de thaumasite et d'ettringite ont été observés dans des bulles d'air de la pâte de ciment. De plus, des cristaux de thaumasite et d'ettringite ont également été observés au sein de la microporosité de la pâte de ciment.

Figure 12.21

Image MEB du béton « 0S100G-CEM II/B-LL-P 1,2 » à un an. Détail des cristaux de thaumasite et d'ettringite dans une bulle d'air de la pâte de ciment

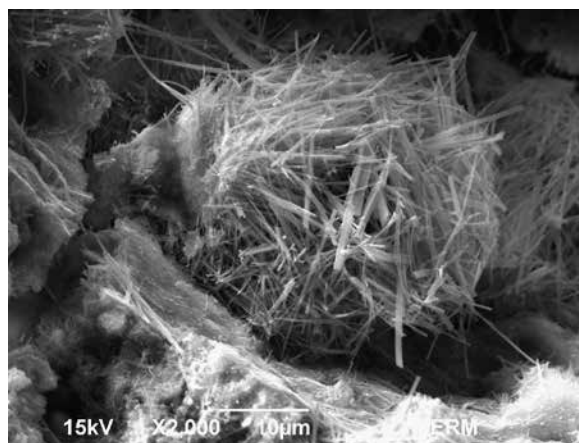
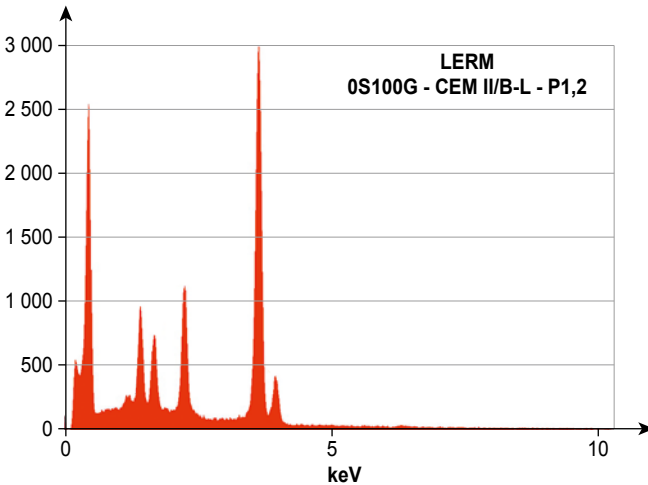


Figure 12.22

Analyse élémentaire par spectrométrie par dispersion en énergie (EDS) de cristaux de thaumasite et d'ettringite



Par ailleurs, la résistance à la compression des bétons a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques 11×22 (\varnothing 11 cm, h 22 cm) stockés un an à 4 °C et à 20 °C. Le béton « 0S100G-CEM II/B-LL-P 1,2 » conservé à 4 °C présente une résistance à la compression de seulement 8,3 MPa, alors que celui conservé à 20 °C présente une résistance à la compression de 21,8 MPa. Cette perte de résistance est manifestement due aux fissures qui ont affecté les éprouvettes conservées à 4 °C (les éprouvettes conservées à 20 °C n'ont pas présenté de fissures visibles à l'œil nu).

12.3.4.7. Conclusion

L'utilisation de GBR ayant des teneurs élevées en sulfates solubles dans l'eau en substitution des granulats naturels pour fabriquer des mortiers et des bétons a été analysée. Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

- les essais sur mortiers ont montré que sans traitement thermique au jeune âge, et même en présence de facteurs défavorables (ciment riche en C_3A , teneur en SO_4^{2-} total de 0,8 %), les mortiers avec les sables de GBR présentent une expansion modérée ;
- lorsqu'une température de 80 °C pendant 72 h est appliquée dans le cadre d'un traitement thermique au jeune âge, le risque d'expansion augmente. Les mélanges pollués par du plâtre (sulfate total entre 0,4 et 1,2 %) présentent des expansions plus élevées qui se stabilisent à terme autour de 0,03 à 0,05 %. La présence d'un taux élevé d'alcalins solubles conduit à des expansions supérieures à 0,08 %. Malgré des teneurs en sulfates solubles proches de 1 %, la RSI induite par les GBR est contenue, le taux de dissolution des sulfates (c'est-à-dire leur finesse) étant favorable

à la formation d'ettringite non-expansive à un âge précoce. Finalement, les effets des ajouts de plâtre sur les performances mécaniques des mortiers (R_c et E_{dyn}) sont très limités.

La formation d'ettringite et de thaumasite est observée pour les bétons formulés avec des gravillons de GBR contenant 0,8 % et 1,2 % de sulfates (pollution par du plâtre) conservé dans de l'eau à 4 °C. La formation de ces minéraux entraîne une expansion du béton, une perte de résistance et l'apparition de fissures. Ces résultats apportent des réponses et une contribution pour définir et fixer une teneur limite en sulfates solubles dans les GBR.

12.4. Besoins de recherche

Les besoins futurs en matière de recherche sont liés notamment à :

- l'approche performantielle. Une première question est de savoir si les indicateurs de durabilité, les essais de performance et les valeurs seuil établies pour les bétons de granulats naturels sont toujours pertinents pour les bétons de GBR. Par exemple, la porosité de l'eau apparaît inadéquate pour les bétons de GBR, en raison de la porosité plus élevée des GBR. Une autre question est de déterminer la façon de considérer la variabilité spécifique des GBR et son influence sur les propriétés de durabilité des bétons de GBR ;
- la modélisation de la durabilité. Les modèles actuels (modèles de carbonatation et de propagation des chlorures) sont définis pour les bétons de granulats naturels et ne sont pas étalonnés pour les bétons de GBR. Des études sont donc nécessaires pour déterminer les adaptations spécifiques éventuellement requises pour la modélisation des bétons de GBR.

12.5. Conclusion

Les études réalisées dans le cadre du Projet National RECYBETON et de l'ANR ECOREB confirment les recherches précédentes : des bétons durables peuvent être fabriqués avec des GBR, même à des taux de substitution importants. Les caractéristiques physico-chimiques intrinsèques des GBR et leur taux de substitution sont des facteurs déterminants vis-à-vis des propriétés de durabilité du nouveau béton.

Il existe de nombreuses études dans la littérature, avec des résultats parfois contradictoires qui proviennent de la diversité des GBR utilisés, des différentes méthodologies déployées pour maintenir constants les paramètres de composition, et de la diversité des modes opératoires.

Les études menées dans le cadre du Projet National RECYBETON sur les propriétés de durabilité conduisent aux conclusions suivantes :

- en raison de l'hétérogénéité et de la variabilité des sources de GBR, il faut accorder plus d'attention au contrôle de la régularité des caractéristiques des GBR. La variabilité « naturelle » des GBR doit être prise en compte pour la détermination des fréquences de mesure de contrôle, ainsi que pour les valeurs seuils ;
- comme pour les autres granulats à forte porosité (granulats légers par exemple), la porosité accessible à l'eau ne paraît pas être un indicateur de durabilité pertinent en soi pour prédire les risques de corrosion avec suffisamment de précision. Il est plus rigoureux de considérer au moins le coefficient de diffusion des chlorures et la résistance du béton à la pénétration de la carbonatation ;
- les GBR réduisent de façon prévisible les performances du béton en matière de propriétés de transfert, selon une intensité qui dépend des caractéristiques intrinsèques des GBR (porosité), du taux de substitution et de la compacité de la matrice cimentaire du nouveau béton. En optimisant la formulation du béton (réduction du rapport E/L notamment), il est cependant possible d'obtenir des bétons aussi durables que les bétons de granulats naturels ;
- la résistance au gel des GBR dépend des caractéristiques du béton d'origine. Les bétons de GBR sont résistants aux cycles de gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçage, du moment que la résistance au gel des GBR est vérifiée, et que les règles de formulation sont respectées (teneur en liant, rapport E/L, teneur en air entraîné, etc.) ;
- concernant les risques de réaction alcali-silice, les GBR peuvent libérer des quantités importantes d'alcalins solubles dans l'eau, en particulier les sables de GBR qui contiennent une part importante de pâte de ciment adhérente. Les GBR peuvent également contenir des phases de silice instables contenues dans certains granulats naturels spécifiques, et d'éventuels polluants (fragments de tuiles). Les études montrent également que les principaux essais habituellement utilisés pour les granulats naturels doivent être adaptés (grande absorption d'eau des GBR) et certains d'entre eux (essai microbar) ne conviennent pas pour les GBR ;
- pour le risque de formation d'ettringite ou de thaumasite lié aux réactions sulfatiques, compte tenu des résultats des études effectuées et des recherches antérieures (en particulier [Orsetti, 1997]), les recommandations proposées sont les suivantes :
 - teneur maximale en sulfates solubles dans l'eau pour les GBR : 0,3 %,
 - teneur maximale en sulfates solubles dans l'eau pour un mélange GBR + GN : 0,2 %.

