

Microstructure du béton recyclé

Eric Garcia-Diaz, A. Djerbi, Gwenn Le Saout

▶ **To cite this version:**

Eric Garcia-Diaz, A. Djerbi, Gwenn Le Saout. Microstructure du béton recyclé. Le béton recyclé, Ifsttar, pp.193-210, 2018, 978-2-85782-747-4. hal-02928239

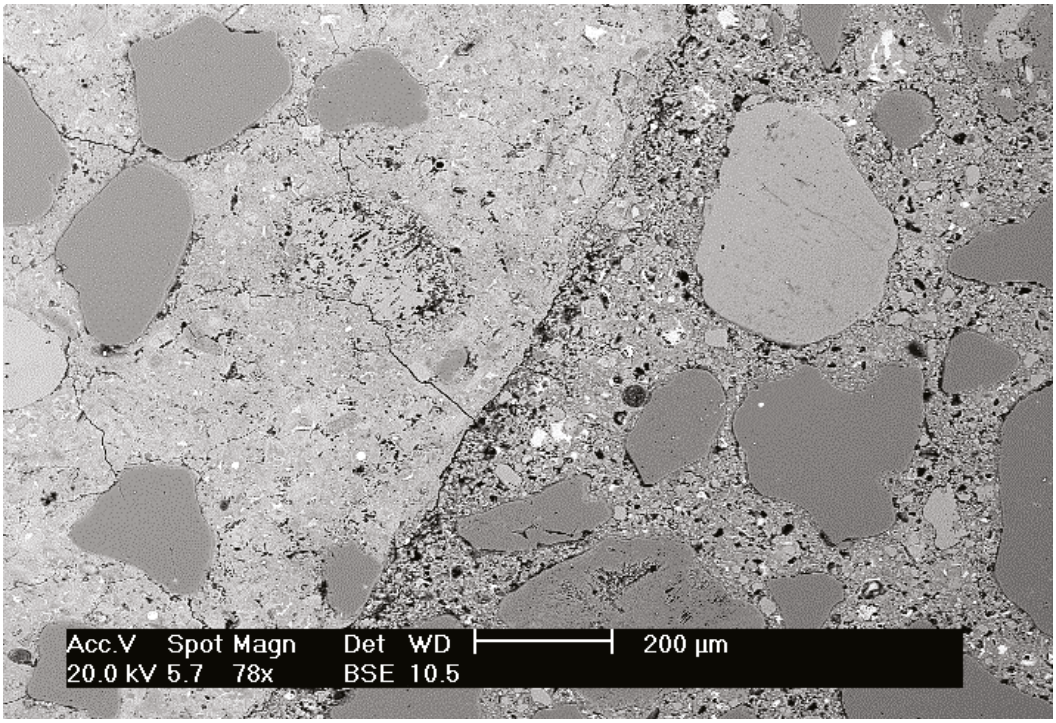
HAL Id: hal-02928239
https://imt-mines-ales.hal.science/hal-02928239

Submitted on 2 Sep 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.

Le béton recyclé



sous la direction de
François DE LARRARD et Horacio COLINA

François de Larrard et Horacio Colina

Le béton recyclé

Traduit de l'anglais par André Lecomte

IFSTTAR

Sous la direction de :

François DE LARRARD
Directeur Scientifique, Groupe LafargeHolcim, Directeur scientifique du projet national RECYBETON

Horacio COLINA
Directeur du Pôle Recherche, ATILH, Directeur du projet national RECYBETON

Comment citer cet ouvrage :

de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.

Comment citer une partie de cet ouvrage :

[Auteurs], 2018, Titre du chapitre. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux - Ifsttar
14-20 boulevard Newton - Cité Descartes - Champs-sur-Marne - 77447 Marne-la-Vallée cedex 2
www.ifsttar.fr
Les collections de l'Ifsttar
ouvrages scientifiques
Réf : OSI4
ISBN 978-2-85782-747-4 - ISSN 2558-3018
Novembre 2018

En application du code de la propriété intellectuelle, l'Ifsttar interdit toute reproduction intégrale ou partielle du présent ouvrage par quelque procédé que ce soit, sous réserve des exceptions légales.

Cet ouvrage est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International. Les termes de cette licence sont accessibles à l'adresse http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

Chapitre 9.
Microstructure du béton recyclé

E. Garcia-Diaz[1], *A. Djerbi*[2], *G. Le Saout*[1]

Résumé – L'auréole de transition existant dans les mortiers et bétons incorporant des granulats de béton recyclé (GBR), à l'interface entre l'ancienne et la nouvelle pâte de ciment, a été finement caractérisée. Pour les mortiers, sa microstructure a été analysée durant la première phase de durcissement (2 et 28 jours). Pour les bétons, elle a été étudiée après un an de durcissement. Les mortiers et bétons fabriqués avec des sables et gravillons de GBR sursaturés développent une auréole de transition plus poreuse et plus pauvre en phases anhydres (profils directionnels moins prononcés). Ce phénomène est expliqué a priori par le transfert de l'eau depuis les GBR sursaturés vers la pâte de ciment, et aussi par la formation de lentilles d'eau sous les grains, dues au ressuage. D'autre part, les mortiers réalisés avec les sables de GBR secs développent une auréole de transition plus « dense » et ayant un même profil de phases anhydres que ceux observés sur mortiers fabriqués avec les sables naturels initialement secs, à même rapports e/c. Un transport de Portlandite depuis la nouvelle pâte de ciment vers l'ancienne pâte de ciment a été observé durant les 28 premiers jours de durcissement. Ce phénomène est plus prononcé pour les mortiers réalisés avec les sables sursaturés. La diminution du rapport e/c, pour passer de la classe de béton recyclé C25 aux classes C35 et C45, améliore légèrement les profils directionnels de porosité. Mais, pour ces classes, les bétons contenant 100 % de gravillons de GBR ont une auréole de transition plus poreuse que les bétons contenant 30 % de sables et gravillons de GBR. La faible porosité de l'auréole de transition du béton C45 contenant 30 % de sable et gravillons de GBR pourrait être due à une « cure positive » où l'eau des GBR vient contribuer à l'hydratation de la pâte de ciment, partiellement désaturée au cours du durcissement, en raison du faible rapport e/c initial de ce béton (e/c = 0,41). Une valeur seuil de porosité d'interphase séparant le domaine peu connecté (la perméabilité augmente peu avec la porosité) du domaine très connecté (la perméabilité augmente fortement avec la porosité) a été identifiée. Ce seuil est proche de 17/18 % de porosité.

1. IMT Mines d'Alès, C2MA, Alès.
2. IFSTTAR, Paris.

9.1. Introduction

Les granulats de béton recyclé (GBR) sont composés d'un mélange de granulats naturels plus ou moins recouverts de pâte de ciment ou de mortier durcis. Dans un béton de résistance normale, la présence de cette ancienne pâte carbonatée et poreuse peut modifier les mécanismes régissant la formation de l'auréole de transition (AT) existant à l'interface entre le granulat et la pâte de ciment. La conséquence peut être alors l'apparition d'une microstructure spécifique entre l'ancienne et la nouvelle pâte de ciment. L'objectif de ce chapitre est de caractériser par microscopie électronique à balayage (MEB) la phase intermédiaire (ou interphase) entre ancienne et nouvelle pâte, par mesures semi-quantitatives réalisées sur des mortiers et des bétons contenant différents sables et gravillons. Des granulats totalement séchés ou sursaturés ont été utilisés pour apprécier l'effet des transferts hydriques entre GBR et nouvelle pâte de ciment, dans cette auréole de transition. Finalement la porosité des AT est corrélée à la perméabilité au gaz des bétons afin d'identifier le domaine de composition (rapport Eeff/L) correspondant à un réseau poreux peu connecté.

9.2. État de l'art

L'auréole de transition est la zone située à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment dense. Plusieurs auteurs [Barnes *et al.*, 1978 ; Crumbie, 1994 ; Kjellsen *et al.*, 1998 ; Langton et Roy, 1980 ; Monteiro *et al.*, 1985 ; Olivier *et al.*, 1995 ; Scrivener *et al.*, 1988 ; Scrivener et Gartner, 1987 ; Scrivener et Pratt, 1996 ; Zimbelman, 1985] ont étudié en détail la microstructure de l'auréole de transition et les mécanismes de sa formation. Cette zone est caractérisée par un gradient de microstructure : la porosité augmente progressivement, en allant de la pâte de ciment compacte jusqu'à la paroi des grains. Cette microstructure résulte principalement de « l'effet de paroi » exercé par le granulat (gros) sur les particules de ciment (fines). En raison de cet effet, à la périphérie du granulat, dans la pâte de ciment, la teneur initiale en eau augmente et la teneur initiale en ciment diminue. L'épaisseur initiale de la zone perturbée par « l'effet de paroi » est de l'ordre de plusieurs dizaines microns (épaisseur initiale de l'auréole de transition). Durant le durcissement, en raison d'un remplissage de la porosité par les produits d'hydratation, l'épaisseur de l'auréole de transition diminue généralement. Durant cette période, un mécanisme de transfert des produits hydratés (Portlandite notamment) s'instaure entre les zones riches et pauvres du ciment. Il induit la formation d'un « film duplex » riche en Portlandite, de quelques microns d'épaisseur, qui peut s'observer à la surface des grains. D'autres mécanismes peuvent aussi jouer un rôle dans la formation de la porosité de l'auréole de transition, parmi lesquels un micro-ressuage autour des grains, qui apparaît lors du coulage et de la vibration du béton [Metha, 1986 ; Crumbie, 1994], ainsi que la croissance orientée de la Portlandite dans le « film duplex » [Garboczi et Bentz, 1996].

En présence de granulats poreux fortement absorbants, les mécanismes de formation de l'auréole de transition sont influencés par les échanges d'eau entre le granulat et la pâte de ciment fraîche. Pour les granulats légers possédant un réseau de macropores (tailles allant de plusieurs centaines de microns à quelques millimètres), tels les granulats d'argile et de schiste expansés, un état sec initial provoque, durant la fabrication et la mise en place du béton, une absorption d'eau qui conduit à une auréole de transition plus compacte et plus « adhérente » [Wasserman et Bentur, 1996 ; Elsharief *et al.*, 2005 ; Lo *et al.*, 2005]. Selon [Nguyen *et al.* 2014], pour un rapport eau/ciment donné, les mortiers à base de granulats calcaires poreux sursaturés ont une auréole de transition plus poreuse que les mortiers à base des mêmes granulats secs. En revanche, l'auréole de transition de mortiers à base de granulats calcaires non poreux secs ou sursaturés a la même porosité. [Zhao *et al.*, 2013] ont obtenu des résultats similaires avec des mortiers contenant des sables de GBR. À l'inverse, [Tam *et al.*, 2005] ont montré que la qualité de l'auréole de transition, entre la pâte de ciment ancienne et nouvelle, est améliorée par l'utilisation de granulats humides.

9.3. Résultats recybeton

9.3.1. Microstructure du mortier

9.3.1.1. Matériaux et méthodes

9.3.1.1.1. Mortiers

Les sables de GBR ont été tamisés en six classes granulométriques distinctes qui ont servi à recomposer des sables ayant la même granularité que le sable naturel. Le sable naturel et les sables de GBR ont été utilisés soit secs, soit sursaturés pour la fabrication des mortiers. L'état sursaturé correspond à la valeur de l'absorption d'eau majorée de 10 % (Ab_{24} + 10 %). Les sables de GBR et naturels ont une absorption d'eau proche de 10 % et 0,5 % respectivement (voir partie III : Caractérisation des granulats de béton recyclé). Un rapport eau efficace/ciment (E_{eff}/C) égal à 0,5 a été retenu. La fraction volumique du sable dans le mortier a été gardée constante et égale à 60 %. Le ciment était un CEM II/A-L 42,5 N.

9.3.1.1.2. Caractérisations microstructurales

Pour les investigations microstructurales, des échantillons de dimensions $1 \times 2 \times 2$ cm^3 ont été découpés au cœur des éprouvettes de mortier hydraté. Leur hydratation a été stoppée par immersion pendant une semaine dans un solvant (isopropanol-2). Le solvant a été éliminé par séchage sous vide. Les éprouvettes ont été ensuite stockées dans un dessiccateur en présence de gels de silice, puis imprégnées dans une résine époxy de faible viscosité, avant d'être polies jusqu'à 0,25 µm à l'aide d'une pâte diamantée. Les échantillons ont alors été recouverts de carbone (~ 5 nm) puis analysées avec un MEB FEI

Quanta 200 FEG couplé à un analyseur spectroscopique Oxford INCA X-sight Energy Dispersif X-ray (EDX). La tension de travail a été fixée à 15 kV, pour une observation optimale par analyse des électrons secondaires et des électrons rétrodiffusés. L'imagerie par électrons rétrodiffusés (BSE) a été utilisée pour étudier l'auréole de transition dans les mortiers, selon le protocole de [Scrivener et Gartner, 1987]. Environ 30 images BSE de champ 182×167 µm^2 (résolution de 0,18 µm par pixel) ont été acquises afin de pouvoir détecter des éléments de dimensions supérieures à 0,03 µm^2. Les taux de phases anhydres, d'hydrates et de porosité ont été évalués sur 8 bandes de 10 µm de largeur chacune. Les résultats, moyennés sur les 30 images, ont été reportés en fonction de la distance au grain. La surface relative de chaque composant dans chaque bande a été calculée à partir de l'histogramme des niveaux de gris. Le niveau seuil inférieur des pores a été pris égal à zéro (pixel noir). Les points d'inflexion ont été utilisés pour déterminer le seuil des produits anhydres et hydratés, tel que proposé par [Wong *et al.*, 2006].

9.3.1.1.3. Tests de nano-indentation

Pour les mesures de nano-indentation, la préparation des échantillons a été la même que pour celle des échantillons destinés au MEB. La différence est leur taille ($1 \times 1{,}5 \times 1{,}5$ m^3) et la présence d'une feuille d'aluminium recouvrant partiellement l'échantillon, destinée à servir de référence pour le laser. L'appareil est un MEB HITACHI S-4300SE/N comportant une pointe d'indentation développée par le Département Génie Civil et Environnemental de l'École des Mines de Douai. Cette pointe est de type Berkovich modifiée ayant un diamètre maximum de 20 µm, permettant d'obtenir un cône équivalent à celui d'une pointe Vickers. Une table mobile 3D incluse dans l'instrument d'indentation a été utilisée pour sélectionner la zone à indenter et mesurer la profondeur d'indentation avec une précision de 10 nm. Le déplacement vertical de la pointe a été mesuré avec un laser. Une cellule de force de 1 N maximum de charge et d'une précision de 0,5 mN a été associée à l'instrument d'indentation. L'effort maximum de 100 mN a été choisi pour obtenir une marque de taille raisonnable, avec une vitesse de charge de 3 mN/s. Pour sélectionner une zone de mesures, une observation MEB a tout d'abord été faite. La pointe a ensuite été déplacée au droit de cette zone, puis les tests ont été effectués. L'effort appliqué et le déplacement vertical de la pointe (profondeur de pénétration), enregistrés en continu, ont permis de tracer les courbes chargement-déplacement. L'essai a été réalisé au moins sur 12 points pour chaque phase identifiée. La valeur de microdureté Martens (H_M), basée sur la profondeur maximale obtenue durant l'essai de microdureté, a été choisie pour analyser les résultats (équation 9.1).

$$H_M(\text{GPa}) = \frac{P_{max}}{A_r} = \frac{P_{max}}{26.968 * h_m^2} \qquad (9.1)$$

Pmax (mN) est la charge maximale appliquée ; h_m (µm) est la profondeur maximale de pénétration mesurée ; $A_r = 26{,}968*h^2_m$ correspond à la surface de contact de l'aiguille pour la profondeur maximale de pénétration mesurée.

9.3.1.2. Résultats

On trouvera des exemples de microstructure à 2 et 28 jours sur les Figures 9.1 et 9.2. À 2 jours, le contraste d'aspect entre la mésoporosité de la jeune et nouvelle pâte, et la microporosité de l'ancienne pâte carbonatée permet de définir la frontière entre les deux pâtes. Une précipitation de Portlandite est observée à proximité de cette frontière et forme un film duplex. L'épaisseur de ce film duplex est plus importante pour les mortiers contenant des sables de GBR sursaturés et ce film est encore perceptible à 28 jours pour ces mortiers. En revanche, pour les mortiers réalisés avec le sable de GBR sec, une excellente continuité est observée à 28 jours et il n'est plus possible de distinguer la limite entre ancienne et nouvelle pâte.

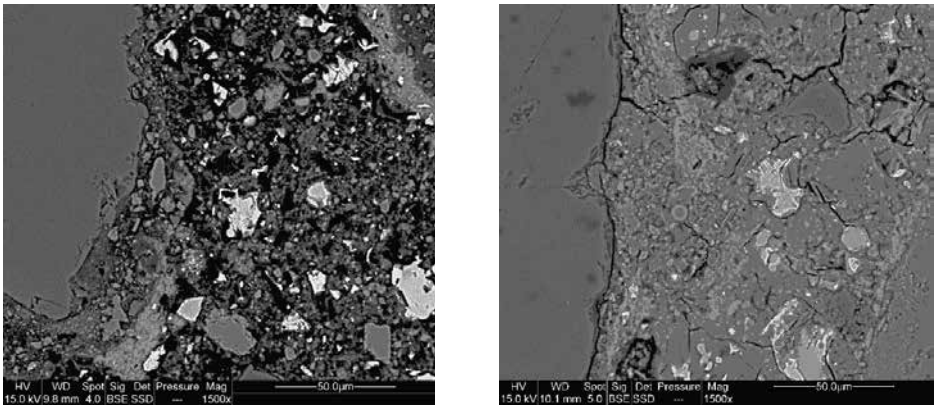
La distribution des phases anhydres après 2 jours de durcissement est donnée Figure 9.3. Les mortiers incorporant le sable naturel sec et le sable de GBR sec ont la même distribution. Dans les deux cas, la pâte entourant les grains est impactée par le même effet de paroi et la répartition du rapport eau/ciment initial est similaire dans la zone interfaciale. Les mortiers incorporant les sables de GBR sursaturés ont une distribution différente des phases anhydres, caractéristique d'une pâte de ciment ayant un rapport eau/ciment plus élevé. Des résultats similaires ont été observés par [Nguyen *et al.*, 2014] avec des granulats calcaires sursaturés. Pour ce mortier, le rapport eau/ciment initial n'a pu être retrouvé, la quantité d'eau apportée à la pâte de ciment par le sable de GBR sursaturé ayant probablement été sous-estimé : une partie de l'eau absorbée a pu migrer dans la pâte durant cette période. [Bello *et al.*, 2017] ont montré que des granulats d'argile expansée préalablement saturés à l'état surface sèche (teneur en eau d'environ 30 %) peuvent libérer dans la pâte de ciment, durant les cinq premières minutes du mélange, une quantité d'eau égale à 5 % de leur masse sèche.

La distribution de la méso-porosité à deux jours est donnée Figure 9.4. Les mortiers incorporant des sables de GBR sont plus denses dans les dix premiers microns autour des grains, en raison de la formation du film duplex de Portlandite. Cette fois, la distribution dans les mortiers incorporant du sable de GBR sec est différente de celle des mortiers incorporant du sable naturel sec, et elle est caractéristique d'une pâte plus poreuse. Cet excès de porosité peut être induit par le transport de la Portlandite, de la nouvelle vers l'ancienne pâte. Comme l'analyse de la distribution des phases anhydres le montre, l'interphase avec les sables de GBR sursaturés est plus poreuse. Cette porosité plus élevée pourrait être la combinaison d'un rapport eau/ciment plus élevé et du transport de la Portlandite.

Les valeurs de micro-dureté des nouvelles pâtes de ciment sont inférieures à celles des anciennes pâtes de ciment carbonatées (Figure 9.4). Il n'y a pas d'influence significative du degré de saturation initial (sec ou sursaturé) des sables de GBR sur la micro-dureté de la nouvelle pâte de ciment. Cependant, le contraste principal se situe entre l'inclusion rigide qui est le granulat original et les deux pâtes de ciment plus déformables.

Figure 9.1

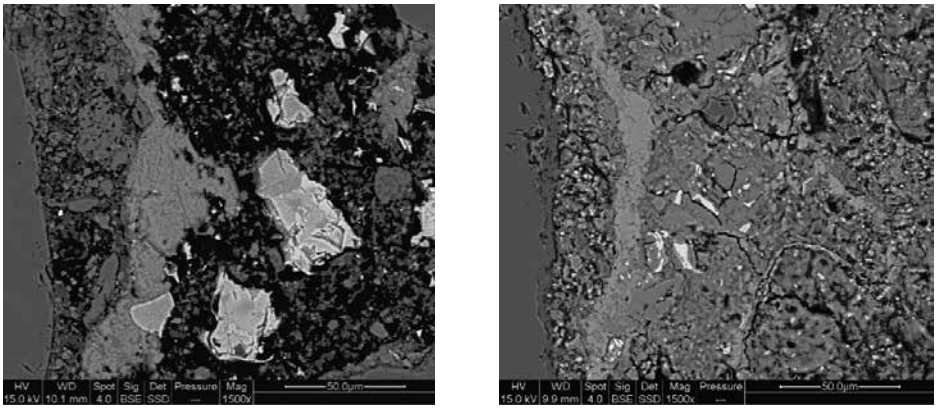
Mortiers à base d'un sable de GBR sec (gauche : à 2 jours ; droite : à 28 jours)



Crédit photo : G. Le-Saout, C2MA.

Figure 9.2

Mortiers à base d'un sable de GBR sursaturé (gauche : à 2 jours ; droite : à 28 jours)



Crédit photo : G. Le-Saout, C2MA.

Tableau 9.1

Résultats des essais de nano-indentation des mortiers incorporant du sable de GBR

Mortiers	Phases analysées	H_M (MPa)	
		Moyenne	Écart Type
GBR secs à 28 jours	Ancienne pâte de ciment	0,67	0,13
	Nouvelle pâte de ciment	0,41	0,18
	Granulat naturel	2,51	1,13
GBR saturés à 28 jours	Ancienne pâte de ciment	0,64	0,30
	Nouvelle pâte de ciment	0,43	0,15
	Granulat naturel	1,82	0,53

Figure 9.3

Distribution des phases anhydres dans l'auréole de transition à 2 jours

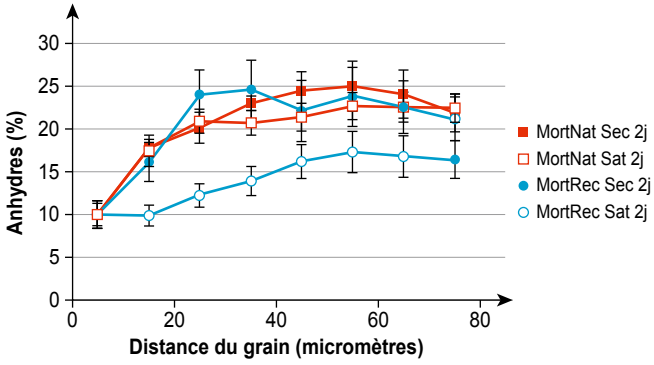
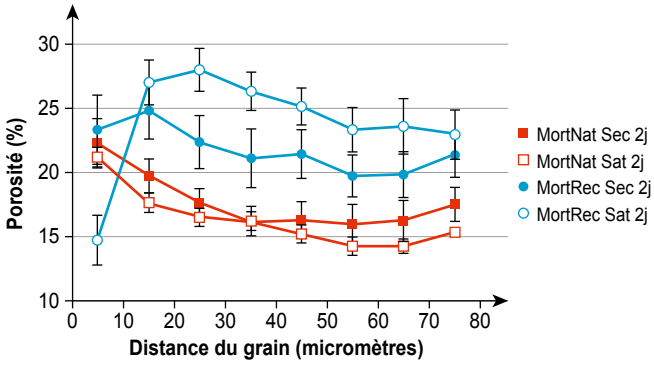


Figure 9.4

Distribution de la porosité dans l'auréole de transition à 2 jours



9.3.2. Microstructure du béton

L'objectif est d'étudier l'effet du rapport e/c et du type de granulat sur l'auréole de transition, et de comparer l'évolution de la microstructure de l'auréole de transition à celle de la pâte massive. Les paramètres utilisés pour la caractérisation et la comparaison ont été les profils de porosité et de phases anhydres.

9.3.2.1. Matériaux et méthodes

9.3.2.1.1. Composition des mélanges

Neuf mélanges ont été étudiés au total :

- trois bétons de référence avec des granulats naturels, correspondant à trois classes de résistance C25/30, C35/45 et C45/55 selon les spécifications de l'EN 206-1, repérés C25, C35 et C45 0S0G,
- trois bétons pour lesquels 30 % du sable naturel a été substitué par du sable de GBR et 30 % des gravillons naturels par des gravillons de GBR, repérés C25, C35 et C45 30S30G,
- trois bétons dont 100 % des gravillons naturels ont été substitués par des gravillons de GBR, repérés C25, C35 et C45 0S100G.

Un ciment Portland CEM II/A-L 42,5 N et des fillers calcaires ont été utilisés comme liant et addition, respectivement. Un granulat calcaire concassé a été utilisé comme granulat naturel. Les granulats de GBR provenaient de déchets de construction et de démolition (DCD). Les propriétés des granulats et les formules de bétons sont présentées dans la partie V : formulation des bétons de GBR. En raison de l'absorption d'eau plus élevée des GBR, par comparaison aux granulats naturels, une pré-saturation des GBR a été pratiquée avant leur ajout au mélange. Dans cette étude, les GBR ont été sursaturés de 1 %, c'est-à-dire que leur teneur en eau a été portée à leur valeur de leur absorption d'eau, plus 1 %.

9.3.2.1.2. Coulage et conservation des éprouvettes

Pour chaque composition, des éprouvettes cylindriques 11×22 cm ont été coulées dans des moules en acier et compactées à l'aide d'une table vibrante. Elles ont été démoulées à 24 heures et immergé dans l'eau. Après 1 an de cure, de petits échantillons de taille $35 \times 35 \times 10$ mm^3 ont été prélevés dans ces éprouvettes. Ces échantillons ont été séchés à 45 °C sous vide, en présence de gel de silice, pendant 14 jours pour éliminer l'eau libre. Le séchage à cette température ne provoque *a priori* pas de fissuration [Baroghel-Bouny *et al.*, 2002]. Les échantillons secs ont été imprégnés de résine époxyde, polis en différentes étapes pour obtenir une surface lisse et plane pour l'imagerie MEB. Comme les échantillons ne sont pas conducteurs, ils ont été recouverts d'une très fine couche métallique.

9.3.2.1.3. Observations MEB de la microstructure des bétons

La technique d'imagerie par électrons rétrodiffusés (BSE) a été appliquée pour évaluer les propriétés de la microstructure de l'auréole de transition, tant dans le béton de référence que dans les bétons de GBR. L'analyse d'image peut ainsi être utilisée pour quantifier les différentes phases de la microstructure. Le protocole d'acquisition de l'image a été réalisé à proximité des granulats ; il a consisté à obtenir l'image BSE pour l'ensemble de l'auréole de transition avoisinant le grain sélectionné. Tout d'abord, une capture d'image à faible grossissement a permis de localiser l'auréole de transition, puis des images à fort grossissement ($\times$ 500) ont été prises afin de pouvoir quantifier par la suite les profils de porosité et de phases anhydres du ciment. Ils ont été établis sur des bandes de 10 µm de largeur, en partant du bord du grain (ou de l'ancienne pâte pour les GBR), jusqu'à une distance de 100 µm du grain. La segmentation et le seuillage de la bande ont été effectués avec le logiciel Olympus Stream IMS, afin de quantifier les différentes phases de la microstructure. Le pourcentage de la surface correspondant à la porosité ou au ciment anhydre a été déterminé pour la bande. Dans cette étude, la porosité apparaît en rouge et le ciment anhydre en bleu, comme illustré sur la Figure 9.5. Il a fallu environ 10 images pour couvrir l'auréole de transition autour d'un grain, opération répétée sur trois échantillons de chaque type de béton.

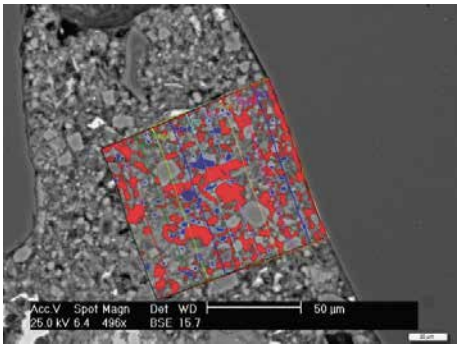
9.3.2.2. Résultats

9.3.2.2.1. Auréole de transition des bétons de référence 0S0G

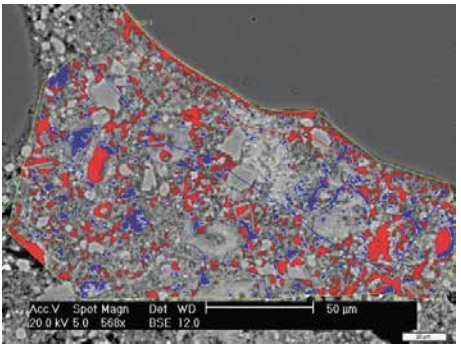
Les Figures 9.5 montrent la microstructure de l'auréole de transition dans les bétons de référence C25, C35 et C45 0S0G. Leurs profils de porosité et de phases anhydres dans cette zone sont donnés Figure 9.6. Il est bien connu que les propriétés de la microstructure de la pâte de ciment dépendent de différents paramètres, dont le rapport e/c ; une augmentation du rapport e/c provoque une augmentation de la porosité. Le profil de porosité du béton C25 révèle que sa porosité est plus élevée que celle des bétons C35 et C45. Les profils des trois bétons montrent la même tendance ; une porosité plus élevée à l'interface avec le grain, qui diminue en s'éloignant du grain.

Ce résultat s'explique par l'effet de paroi [Scrivener, 1999 ; Bentur *et al.*, 2000] qui engendre un volume de vide plus grand à l'interface avec le granulat, et donc aussi une augmentation locale du rapport e/c. Le rapport entre la porosité à l'interface et la porosité dans la pâte massive de ciment, augmente lorsque le rapport e/c diminue. Il atteint un facteur 3 environ pour le béton C45. La teneur en phases anhydres dépend de l'hydratation du ciment, qui est meilleure pour les rapports e/c élevés ; l'hydratation du béton C25 est la plus avancée. Ce béton a la plus faible teneur en phases anhydres par rapport aux autres bétons ; 2,8 % pour l'interface avec le granulat, contre 6,7 % et 12,7 % pour les bétons C35 et C45 respectivement.

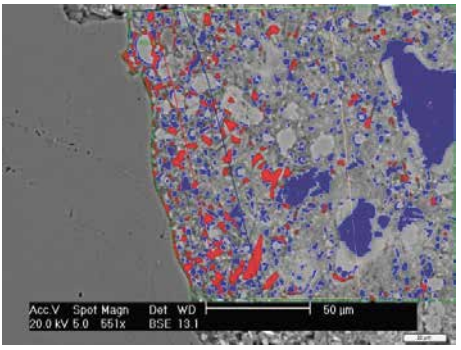
Figure 9.5
Analyse d'image des bétons de référence 0S0G



C25 - 0S0G



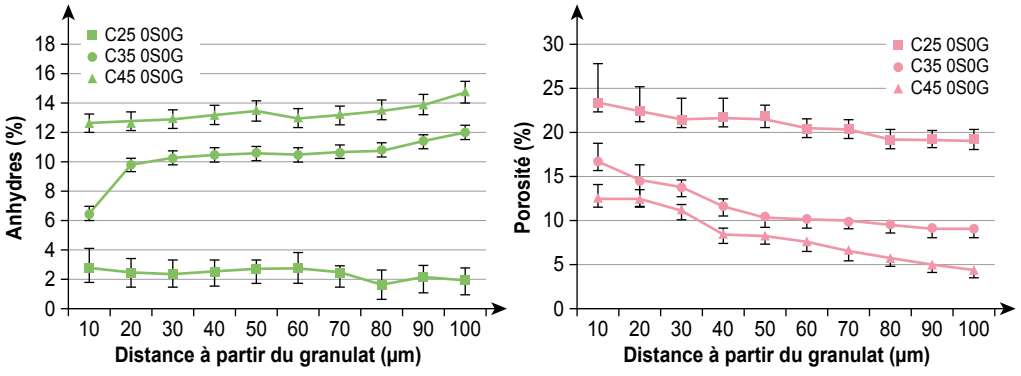
C35 - 0S0G



C45 - 0S0G

Crédit photo : A. Djerbi, IFSTTAR.

Figure 9.6
Profils de porosité et des phases anhydres des bétons de référence 0S0G



9.3.2.2.2. Auréole de transition des bétons de GBR C25/30

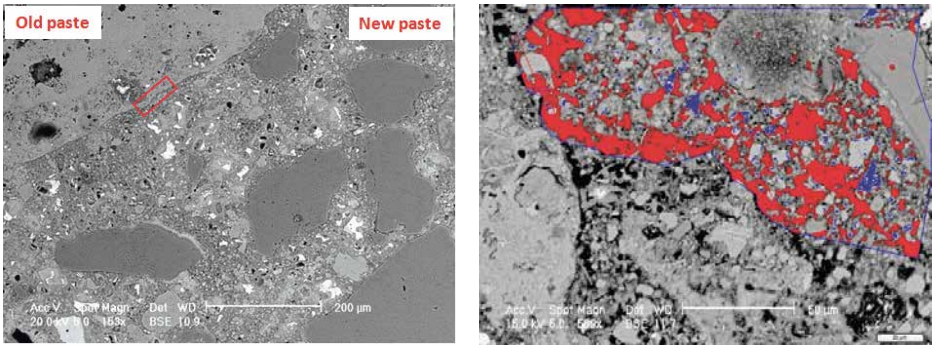
La microstructure de l'auréole de transition des bétons de GBR 30S30G et 0S100G a été examinée à proximité des gravillons (classe 10/16 mm). Le paramètre de comparaison est le rapport e/c. Les bétons avaient un an d'âge environ. Malgré cet âge, il a été possible de distinguer l'ancienne et la nouvelle pâte de ciment. La nouvelle pâte est légèrement poreuse et elle contient encore des phases anhydres, tandis que l'ancienne pâte à un aspect plus compact et elle est fissurée (Figure 9.7), ces fissures étant probablement liées au concassage des GBR. Contrairement à l'étude de [Medina *et al.*, 2012], une plus grande porosité et une plus forte microfissuration ont été observées dans l'auréole de transition située entre l'ancienne et la nouvelle pâte de ciment.

Les profils présentés Figure 9.8 sont issus de l'analyse d'images des photos de la Figure 9.8. Les bétons ont ici différents rapports e/c : 0,67 pour C25 0S0G, 0,63 pour C25 30S30G et 0,66 pour C25 0S100G. Les GBR avaient été pré-saturées avant leur incorporation. Malgré la diminution du rapport e/c, le profil de porosité allant de l'interface GBR/pâte jusqu'à 100 µm est plus élevé pour les bétons de GBR que pour le béton de référence, la pente marquant l'évolution de la porosité étant plus forte pour les bétons de GBR que pour le béton de référence. Le rapport de porosité entre l'interface et la pâte massive est de 2,3 pour C25 30S30G et de 1,6 pour C25 0S100G, alors qu'il n'est que de 1,2 pour C25 0S0G. Cela s'explique probablement par un mouvement d'eau depuis le GBR (l'ancien mortier/pâte) vers le nouveau mortier/pâte. L'observation des profils de porosité et de phases anhydres suggère les interprétations suivantes :

- les GBR peuvent diffuser de l'eau qui augmente alors localement le rapport e/c, à l'interface avec l'ancienne pâte. Ce phénomène se traduit par une porosité plus élevée et une quantité moindre d'anhydres dans la nouvelle pâte, jusqu'à une distance de 60 µm des grains (pour C25 30S30G), comparativement au béton de référence,
- dans cette étude, la diminution du rapport e/c n'améliore pas la porosité jusqu'à une distance de 100 µm de l'interface avec les GBR.

On observe que les bétons C25 30S30G et C25 0S100G ont une porosité qui évolue de façon comparable jusqu'à une distance de 35 µm de l'interface. La porosité se stabilise à une distance de 35 µm pour le béton C25 30S30G, alors qu'elle évolue encore jusqu'à 60 µm pour le béton C25 0S100G, ces distances pouvant représenter l'épaisseur de l'auréole de transition de ces bétons.

Figure 9.7
Analyse d'image des bétons de GBR C25

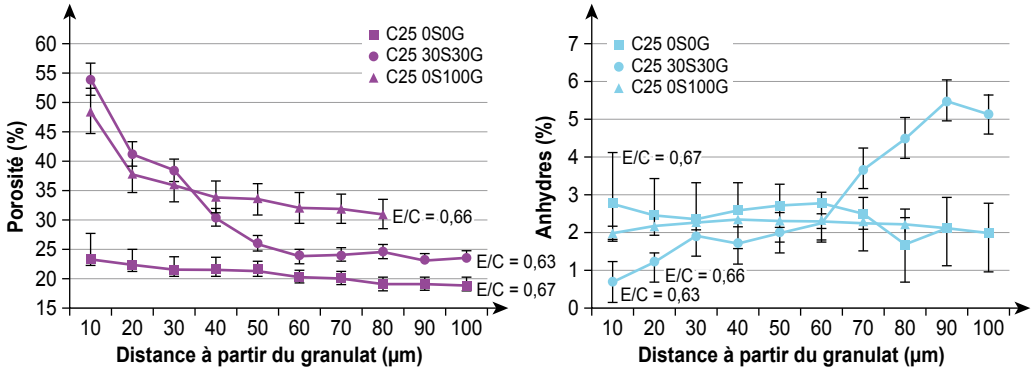


C25 30S30G

C25 0S100G

Crédit photo : A. Djerbi, IFSTTAR.

Figure 9.8
Profils de porosité et de phases anhydres des bétons de GBR C25



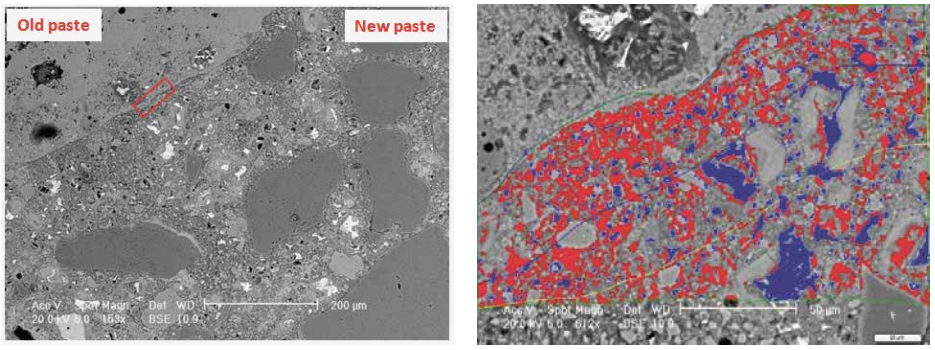
9.3.2.2.3. Auréole de transition des bétons de GBR C35

Les profils présentés Figure 9.10 sont issus de l'analyse d'images des photos de la Figure 9.9. Une augmentation de la porosité et une diminution de la teneur en phases anhydres, par rapport au béton de référence, sont observées malgré un rapport e/c plus faible : 0,58 pour C35 0S0G, 0,53 pour C35 30S30G et 0,54 pour C35 0S100G. Ce résultat peut être expliqué par un apport d'eau du GBR, qui génère plus de pores et moins d'anhydres.

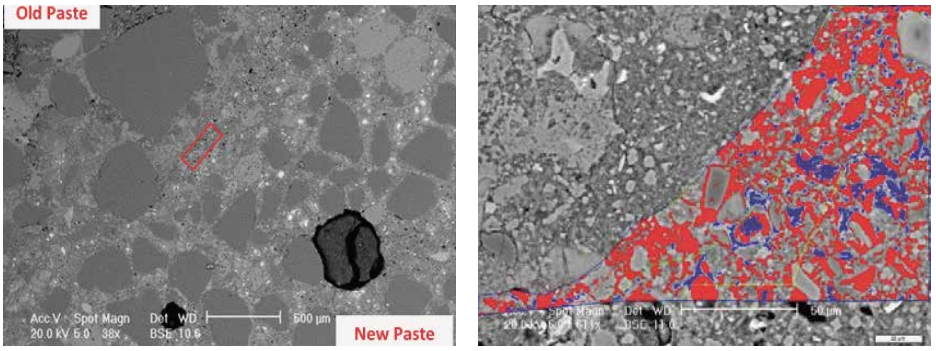
La comparaison entre les bétons montre que la porosité et la teneur en phases anhydres dépendent du rapport e/c. La porosité du béton C35 0S100G est plus élevée que celle du béton C35 30S30G, et la teneur en phases anhydres du béton C35 0S100G est inférieure à celle du béton C35 30S30G. La porosité du béton C35 0S100G se stabilise à une distance de 60 µm de l'interface avec l'ancienne pâte, alors qu'elle continue de décroitre pour le béton C35 30S30G. Une stabilisation de la teneur en phases anhydres des bétons de GBR est observée au-delà de 60 µm.

Figure 9.9

Analyse d'image des bétons de GBR C35



C35 30S30G

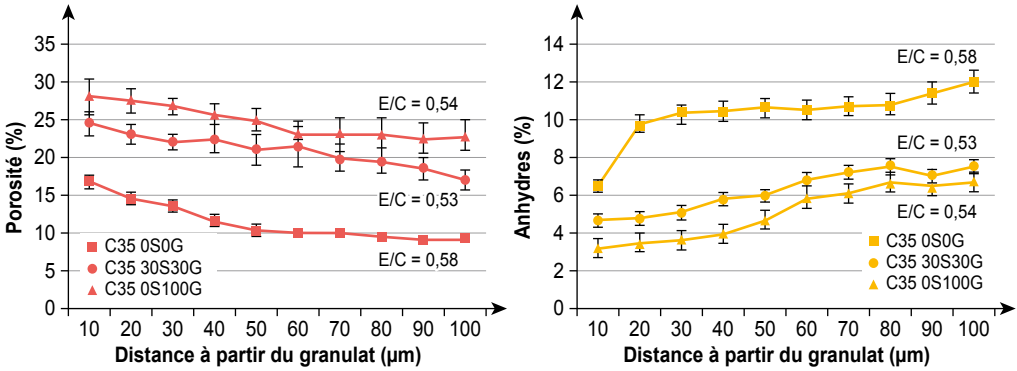


C35 0S100G

Crédit photo : A. Djerbi, IFSTTAR.

Figure 9.10

Profils de porosité et de phases d'anhydre des bétons de GBR C35



9.3.2.2.4. Auréole de transition des bétons de GBR C45

Les profils présentés Figure 9.12 sont issus de l'analyse d'images des photos de la Figure 9.11. Ces bétons ont des rapports e/c relativement proches : 0,43 pour les bétons C45 0S0G et C45 0S100G, et 0,41 pour le béton C45 30S30G.

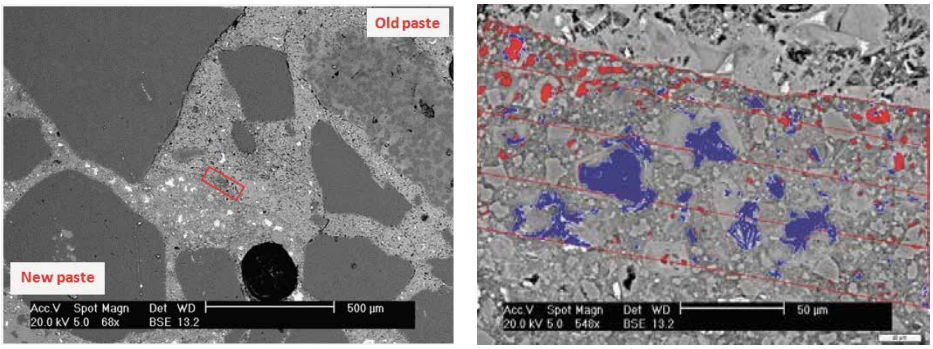
Dans le diagramme (Figure 9.12), le profil de porosité du béton C45 0S100G est plus élevé que celui du béton de référence, mais ce béton présente une plus faible teneur en phases anhydres. Le profil de porosité du béton C45 30S30G est plus faible que celui du béton de référence et du béton C45 0S100G. La porosité des bétons de GBR se stabilise au-delà de 60 µm.

9.3.2.2.5. Analyse comparative des bétons de GBR

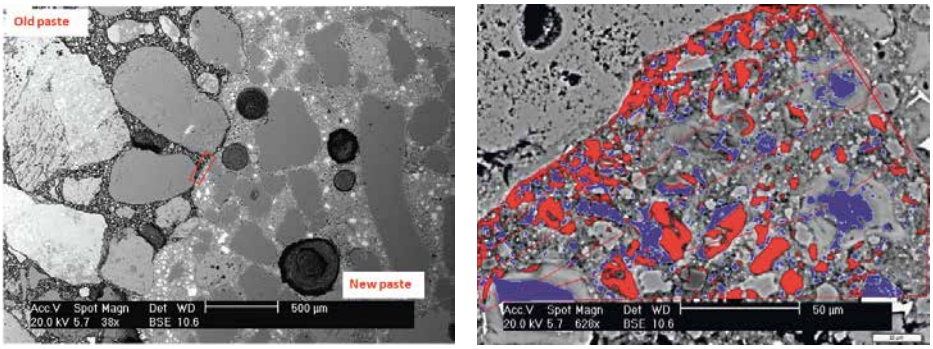
L'effet du rapport e/c sur les profils de porosité et de phases anhydres des bétons de GBR est présenté Figure 9.13. La réduction du rapport e/c améliore le profil de porosité ; le contraste de porosité entre l'interface à la pâte massive est plus élevé pour les rapports e/c 0,43 et 0,41, avec une valeur de 2,55 et 2,7 respectivement. Le profil de porosité se stabilise à environ 50-60 µm de l'interface. La teneur en phases anhydres dépend du rapport e/c de la nouvelle pâte et de l'eau « relarguée » par le GBR. Les teneurs en phases anhydres augmentent lorsque la classe de résistance du béton diminue, selon des tendances variables. Pour les bétons de rapport e/c 0,66 et 0,41, le profil correspondant reste stable sur une distance allant jusqu'à 100 µm de l'interface, alors qu'il varie soudainement pour les bétons de rapport e/c 0,43 et 0,63, à une distance de 40 µm à 60 µm de l'interface.

Figure 9.11

Analyse d'image des bétons de GBR C45



C45 30S30S



C45 0S100G

Crédit photo : A. Djerbi, IFSTTAR.

Figure 9.12

Profils de porosité et de phases anhydres des bétons de GBR C45

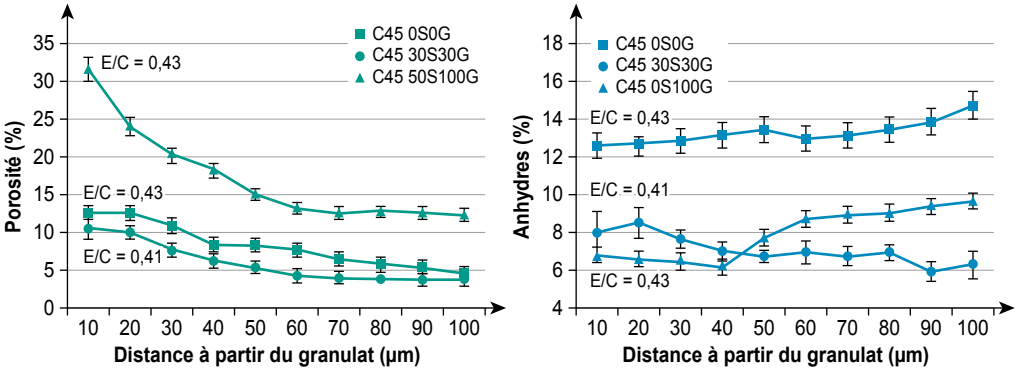
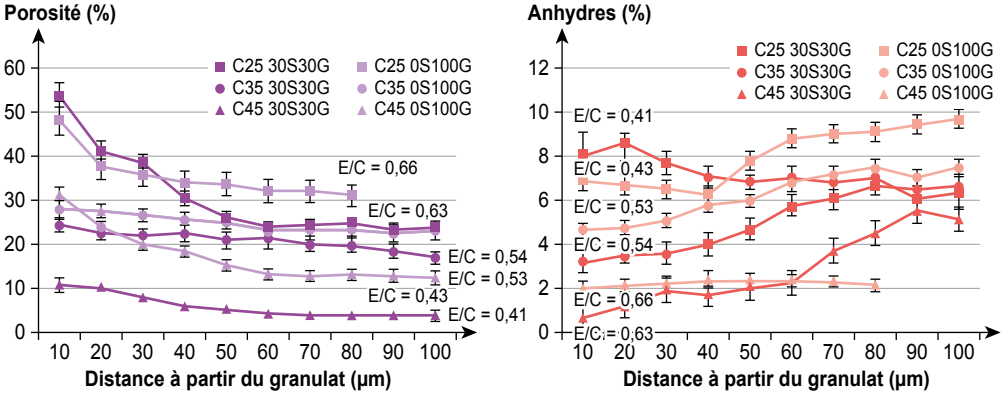


Figure 9.13

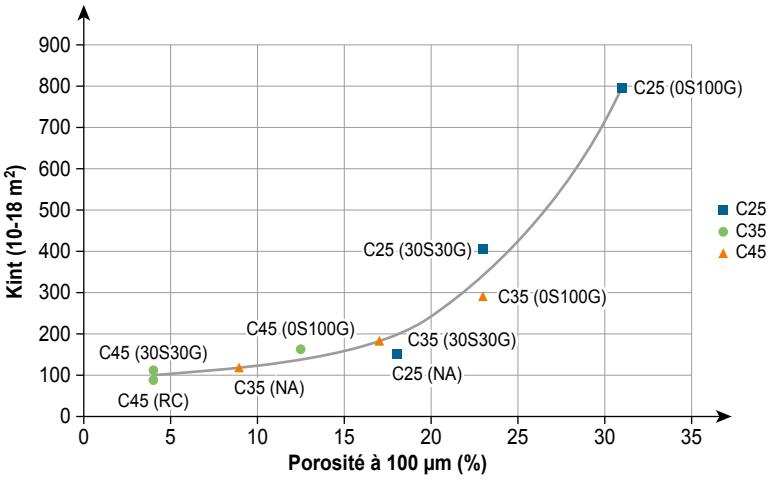
Effet du rapport e/c sur les profils de porosité et de phases anhydres des bétons de GBR



La Figure 9.14 représente la perméabilité au gaz des bétons (voir partie XII : durabilité) en fonction de la porosité dans la pâte à une distance de 100 microns des gros gravillons. Pour les bétons C25 et C35, la substitution du sable et du gravillon naturel par le sable et le gravillon de GBR se traduit par un accroissement significatif de la porosité et de la perméabilité. La substitution de 100 % du gravillon dégrade plus les propriétés de transfert que la substitution de 30 % du sable. Comme indiqué précédemment, la porosité plus élevée pour les bétons recyclés peut être due au transfert d'une partie de l'eau absorbée des GBR vers la pâte de ciment pendant le malaxage et le coulage, avant la prise (béton à l'état frais) mais peut aussi résulter d'un transfert de Portlandite pendant la phase de durcissement. Ces phénomènes concernent les sables et gravillons. Pour les gravillons principalement, un autre phénomène peut être aussi à l'origine de l'augmentation de la porosité dans l'auréole de transition. Il s'agit de la rétention d'une partie de l'eau mobile (eau de ressuage) qui peut former une lentille d'eau sous les granulats. L'effet de ce micro-ressuage a déjà été observé [Crumbie, 1994]. Pour les gravillons de GBR, cet effet peut être amplifié en raison de l'angularité particulière des grains. La Figure 9.14 permet de définir un seuil de porosité (proche de 17-18 %) qui sépare le domaine peu connecté (la perméabilité augmente peu avec la porosité) du domaine très connecté (la perméabilité augmente fortement avec la porosité). [Benz and Garbockzi 1991] ont trouvé une valeur seuil comparable sur la base d'une modélisation de la microstructure de la pâte de ciment Portland. La substitution des granulats naturels par les granulats recyclés pour les bétons de classe C25 et dans une moindre pour les bétons de classe C35 induit la formation d'un réseau poreux très connecté.

Figure 9.14

Perméabilité au gaz *versus* la porosité à 100 µm des gros gravillons



9.4. Besoins de recherche

Il serait intéressant d'évaluer l'impact de l'utilisation de sables et gravillons de GBR *partiellement saturés* sur la qualité de l'auréole de transition des bétons de GBR et, par conséquent, sur les propriétés de transfert dans ces bétons. D'autres recherches seraient nécessaires pour quantifier l'incidence relative du transfert d'eau et de l'effet du micro-ressuage sur la microstructure de l'auréole de transition des bétons de GBR, pour les gravillons recyclés plus particulièrement.

9.5. Conclusion

L'utilisation de sables et gravillons de GBR sursaturés génère une porosité supérieure et une teneur en phases anhydres inférieure dans l'auréole de transition située entre l'ancienne et la nouvelle pâte de ciment, dans les mortiers et les bétons de classes de résistance normales (C25 et C35). La formation de cette auréole de transition « poreuse » est identifiée sur mortiers dès 2 jours de durcissement et elle est encore visible sur bétons après un an de durcissement. Les phénomènes de relargage de l'eau des granulats de GBR dans la pâte de ciment à l'état frais et de la formation de lentilles d'eau par effet de micro-ressuage sont mis en avant pour expliquer la formation de cette auréole de transition plus poreuse. Les mortiers réalisés avec des sables de GBR secs présentent une auréole de transition plus « dense », avec des profils de phases anhydres similaires à ceux observés sur les mortiers à base de sable naturel

sec ayant le même rapport e/c moyen. La réduction du rapport e/c pour passer des bétons C25 aux bétons C35 et C45 améliore un peu les profils de porosité. Mais les bétons contenant 100 % de gravillons de GBR ont une auréole de transition plus poreuse que les bétons contenant 30 % de sable et de gravillons de GBR. Les bétons de GBR de type C45 contenant 30 % de sable et gravillons de GBR et ayant un faible rapport e/c de 0,41 ont des profils de porosité et de phases anhydres moins amplifiés que ceux du béton de référence (e/c = 0,43) : l'eau diffusée par les GBR participe donc à l'hydratation de la pâte de ciment au moyen d'un cure interne dans ces bétons à faible e/c pouvant être soumis à de l'auto-dessiccation. Une valeur seuil de porosité de l'ordre de 17-18 % séparant le domaine peu connecté du domaine très connecté a été identifiée.

Le présent ouvrage traite du recyclage du béton concassé dans la fabrication de nouveaux bétons. Il résume l'essentiel des acquis du projet national de recherche RECYBETON, qui a mobilisé un grand nombre d'acteurs de la communauté technique française concernée entre 2012 et 2018. On commence par présenter la fabrication et les propriétés des granulats de béton recyclé. Puis on s'intéresse à l'utilisation de la partie fine de ce matériau dans la fabrication de liants. Cependant, dans le cas le plus courant, le béton concassé sera utilisé comme granulat de nouveaux bétons. Le béton recyclé ainsi obtenu voit certaines de ses propriétés modifiées, à des niveaux variables selon la propriété choisie et le taux de recyclage adopté. L'ouvrage détaille ensuite la formulation du béton recyclé, et son utilisation dans les structures, illustrée par la réalisation de cinq chantiers expérimentaux. On conclut sur une estimation de la ressource en granulats recyclés, sur les aspects normatifs, sur les pratiques nationales et sur les conditions pour un recyclage respectueux des impératifs du développement durable.

This book deals with the recycling of crushed concrete into new concrete. It summarizes most of RECYBETON's ouputs. This R&D national project involved a good part of the French technical community from 2012 to 2018. In a first chapter, production and characterization of recycled concrete aggregates are presented. The fine part of these materials can be used in the production of binders. However, more often, crushed concrete will be utilized as an aggregate for new (recycled) concrete. Some properties of this recycled concrete are affected, to an extent which depends on the chosen property and the recycling rate. Then, recycled concrete mix-design and structural modelling are addressed and demonstrated through a series of five experimental construction sites. The end of the book includes studies on recycled aggregate resource, standardization, national practices and sustainability of the recycling process.

François DE LARRARD
Directeur Scientifique, Groupe LafargeHolcim
Directeur scientifique du projet national RECYBETON

Horacio COLINA
Directeur du Pôle Recherche, ATILH
Directeur du projet national RECYBETON.

Traduit de l'anglais par André LECOMTE

Photo de couverture : microstructure du béton recyclé (Assia DJERBI, IFSTTAR)

IFSTTAR

LES COLLECTIONS DE L'IFSTTAR

ISBN : 978-2-85782-747-4
ISSN : 2558-3018
Réf : OSI4
Novembre 2018