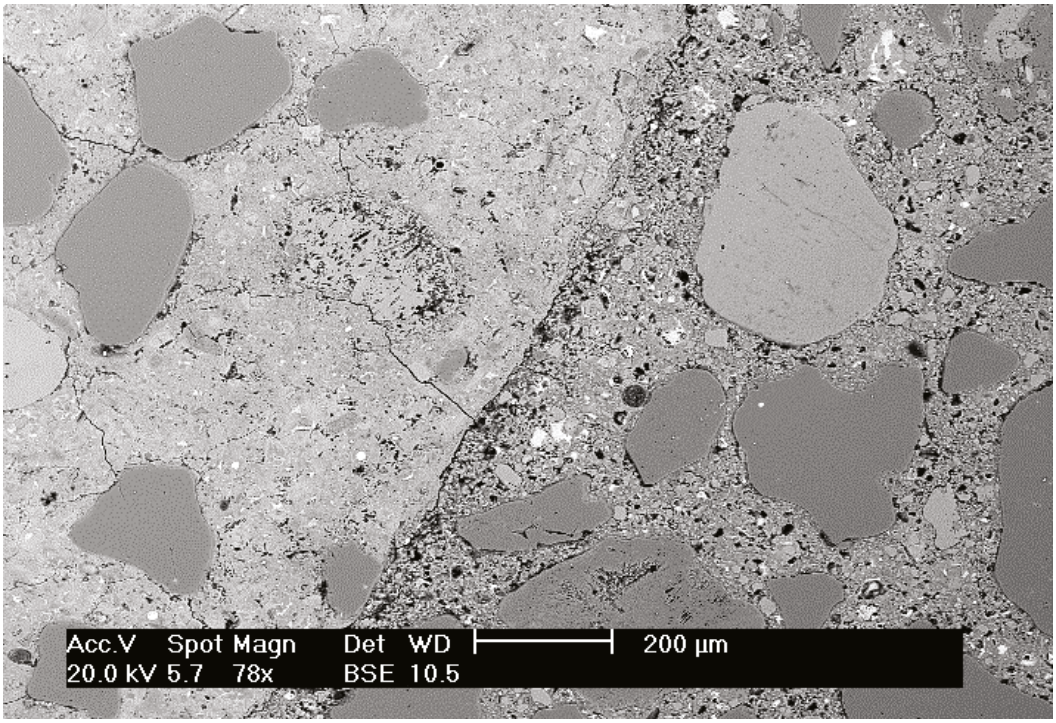
Le béton recyclé



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 3.

Caractérisation des granulats de béton recyclé

S. Rémond[1], *J.M. Mechling*[2], *E. Garcia-Diaz*[3], *R. Lavaud*[4], *R. Trauchessec*[2], *B. Cazacliu*[5]

Résumé – Les granulats de béton recyclé (GBR) sont composés le plus souvent d'un mélange intime de granulats naturels (GN) et de pâte de ciment durci (PCD) généralement adhérente aux GN. Les propriétés des GBR dépendent donc des propriétés de chacune des deux phases et de leurs proportions respectives dans le béton d'origine. La PCD possède généralement une porosité beaucoup plus élevée que celle du GN, ce qui modifie sensiblement les caractéristiques du GBR, par rapport à celles du GN. En particulier, les grains de GBR présentent une plus grande absorption d'eau et une plus faible masse volumique réelle. Leur composition chimique combine celle de la PCD et du GN, ce qui peut conférer aux GBR une sensibilité à certaines pathologies, comme la réaction alcali-silice.

Les propriétés physiques et chimiques des sables et gravillons de GBR du Projet National RECYBETON ont été caractérisées avec les modes opératoires normalisés dédiés aux granulats naturels. Les résultats montrent que ces méthodes peuvent convenir pour les gravillons de GBR. Par contre, pour les sables, les propriétés normatives sont plus délicates à mesurer. En effet, le concassage du béton concentre la PCD dans la fraction granulaire la plus fine, entraînant des hétérogénéités importantes dans la composition du sable recyclé. Les sables de GBR présentent alors une plus forte absorption d'eau et une plus faible masse volumique réelle que les gravillons de GBR.

Afin d'améliorer les techniques de caractérisation des sables de GBR, des méthodes spécifiques, chimiques et thermiques ont été développées pour évaluer leur teneur en PCD. À partir de relations théoriques reliant la teneur en PCD et les propriétés physiques des GBR, le coefficient d'absorption d'eau peut alors être déterminé avec une meilleure précision.

1. IMT Lille Douai, Université de Lille, Lille.
2. Institut Jean Lamour, Université de Lorraine, Nancy.
3. IMT Mines Alès, C2MA, Alès.
4. Technodes S.A.S. Heidelbergcement Group, Guerville.
5. IFSTTAR, Nantes.

Par ailleurs, en raison des médiocres caractéristiques des sables de GBR, il n'est pas réaliste de vouloir remplacer entièrement, dans un nouveau béton, le sable naturel par un sable de GBR. Une solution rationnelle consiste alors à mélanger un certain pourcentage de sable recyclé avec le sable naturel. Des méthodes ont donc été développées pour contrôler le plus précisément possible les proportions des deux constituants d'un mélange ayant une faible proportion de sable de GBR (moins de 10 %).
Enfin, les propriétés mécaniques des GBR (résistance aux chocs et à l'abrasion), et l'applicabilité de certains modèles prédictifs de la résistance à la compression des mortiers et bétons contenant des GBR, ont également été étudiées. Les résultats montrent que les GBR présentent un « effet plafond » plus important que les GN traditionnels, mais que leur adhérence à la nouvelle pâte de ciment est plutôt bonne.

3.1. Introduction

Les granulats de béton recyclé (GBR) sont composés d'un mélange intime de granulats naturels (GN) et de pâte de ciment durci (PCD) adhérente. Ils peuvent également contenir des impuretés (bitume, métaux, plastique, plâtre, sol, bois, etc.) présentes dans les Déchets de Construction et de Démolition (DCD) [Silva *et al.*, 2014a]. Les GBR sont donc plus hétérogènes que les GN. En outre, en raison de leur composition particulière, ils possèdent des propriétés qui diffèrent sensiblement de celles des GN. En particulier, la présence de la pâte de ciment durci adhérente qui procure aux GBR une porosité et une absorption d'eau (Ab) plus élevées, ainsi qu'une masse volumique réelle plus faible. L'absorption d'eau élevée des GBR peut avoir une influence significative sur les propriétés du béton recyclé. En effet, une valeur erronée d'Ab peut conduire à une différence notable entre le rapport eau efficace/ciment (E_{eff}/C) prévu et le rapport réellement atteint dans le béton frais. Cela peut conduire alors à des propriétés différentes de celles attendues, tant pour le matériau frais que pour le matériau durci. Malheureusement, les méthodes normalisées utilisées pour la caractérisation des GN ne sont pas toujours adaptées aux GBR, et de nouvelles procédures doivent être développées. La présence d'impuretés dans la PCD, comme le gypse, peut aussi affecter la durabilité du béton recyclé. Le procédé de production des GBR, notamment le concassage, influe également sur leurs propriétés, avec des formes ou des granulométries différentes selon la technique utilisée.

Dans ce chapitre, la composition et les propriétés chimiques, physiques et mécaniques des GBR sont étudiées. Pour chacune, les particularités des GBR, comparativement aux GN, sont précisées et diverses procédures expérimentales développées spécifiquement pour leur mesure sont présentées. Par ailleurs, l'évaluation de la teneur en GBR dans un mélange GBR-GN est proposée, en

testant trois propriétés habituellement mesurées (absorption d'eau, sulfates solubles, impuretés bitumineuses) et en estimant la précision des dosages à partir de mesures sur différentes sources de sables naturels et recyclés.

3.2. Composition et propriétés chimiques des GBR

3.2.1. État de l'Art

3.2.1.1. Mesure de la teneur en pâte de ciment durci (PCD) adhérente et de mortier adhérent (MA)

Lorsque le béton est concassé, une partie de la pâte de ciment reste attachée aux grains d'origine. Cette pâte de ciment adhérente est généralement beaucoup plus poreuse que les granulats naturels utilisés pour fabriquer le béton. Par conséquent, la qualité et le volume de PCD résiduelle sont très souvent à l'origine des moins bonnes propriétés des GBR, comparativement à celles des granulats naturels : plus faible masse volumique, plus forte absorption d'eau, coefficient Los Angeles plus élevé, plus forte teneur en sulfates, etc. Connaître la teneur en PCD dans un GBR est alors nécessaire pour évaluer sa qualité. Plusieurs méthodes ont été tentées pour réaliser cette quantification mais, vu la difficulté, elles n'ont pas réellement abouti. Des méthodes expérimentales se sont alors intéressées à la mesure de la teneur en mortier adhérent (MA). Le mortier adhérent est *a priori* plus facile à quantifier expérimentalement que la PCD, mais sa définition est plus ambiguë. Tout d'abord, elle dépend étroitement de la taille maximale choisie pour séparer mortier et béton (généralement 4 à 5 mm). Ensuite, le MA peut ne pas contenir que du mortier issu du béton d'origine, mais également des fragments du gravillon naturel libérés lors du concassage. Par conséquent, le MA dépend beaucoup de la méthode expérimentale utilisée pour sa détermination.

Plusieurs procédés sont proposés dans la littérature pour mesurer en laboratoire la teneur en PCD ou en MA. Elles reposent sur des méthodes thermo-mécaniques, chimiques ou visuelles, voire sur la combinaison de plusieurs d'entre elles.

Les méthodes thermo-mécaniques cherchent à séparer le MA des gravillons en favorisant le développement de fissures entre les deux phases. Par exemple, [de Juan et Gutiérrez, 2009] ont proposé une méthode thermique particulière où les GBR sont tout d'abord immergés dans l'eau pendant 2 heure pour quasi-saturer le mortier adhérent, puis chauffés à 500 °C pendant 2 heure, et immergés une nouvelle fois dans l'eau froide. Le traitement thermique à 500 °C génère de la vapeur d'eau à l'intérieur du MA saturé, et le refroidissement brusque des granulats induit des contraintes et des fissures à l'interface entre mortier et granulat. Ces deux étapes permettent ensuite une séparation plus facile des deux matériaux. La faible quantité de mortier qui, généralement,

reste encore attachée aux granulats est enlevée avec un maillet en caoutchouc. L'échantillon est alors tamisé à 4 mm pour récupérer le gravillon sans mortier. La teneur en MA est calculée à partir de la perte de masse entre le gravillon de GBR d'origine et le gravillon propre obtenu.

Les méthodes chimiques sont basées sur la dissolution sélective de la pâte de ciment adhérente. Une solution d'acide chlorhydrique permet de dissoudre efficacement la PCD. Ces méthodes ont été utilisées dans plusieurs études [Yagishita *et al.*, 1994 ; Nagataki *et al.*, 2004], où elles ont permis de mesurer la teneur en PCD et la teneur en MA. Elles ne sont toutefois pas adaptées pour des GBR à base de granulats calcaires, qui sont eux aussi dissous dans l'acide chlorhydrique.

La teneur en ciment dans la PCD peut également être évaluée en s'intéressant à des traceurs propres au ciment, tels SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 [Belin *et al.* 2014]. Les GBR sont tout d'abord broyés jusqu'à 315 µm puis immergés dans une solution d'acide nitrique diluée (1/50). Après filtration, la solution est analysée et la teneur en PCD est déterminée à partir du rapport entre la masse de SiO_2 par gramme de GBR et la fraction massique de SiO_2 contenue dans le ciment. Cette méthode ne peut toutefois être utilisée que si la composition chimique du ciment d'origine est connue.

[Abbas *et al.*, 2007] ont proposé une combinaison de méthodes chimiques et thermo-mécaniques, basée sur des cycles de gel-dégel appliqués à des GBR préalablement plongés dans une solution de sulfate de sodium. Les GBR sont d'abord séchés à 105 °C, pesés et immergés 24 h dans une solution à 26 % (en poids) de sulfate de sodium. Les GBR subissent ensuite cinq cycles de gel-dégel dans une enceinte (16 h à – 17 °C et 8 h à + 80 °C). La solution de sulfate de sodium est alors éliminée par lavage de l'échantillon à l'eau du robinet sur un tamis de 4,75 mm et le refus est séché à 105 °C, puis pesé. La teneur résiduelle en MA est obtenue à partir de la différence de masse avant et après les cycles de gel dégel, divisée par la masse de l'échantillon sec.

Plusieurs auteurs [Hansen et Narud, 1983 ; Abbas *et al.*, 2009] ont proposé de déterminer la teneur en MA des gravillons de GBR par observation d'une section polie d'un béton fabriqué avec les gravillons de GBR et un nouveau ciment coloré. Le ciment coloré permet une identification fiable des particules et donc une séparation visuelle aisée entre le granulat naturel et le mortier adhérent. La quantification de la surface de mortier est ensuite effectuée par une méthode linéaire transversale (similaire à celle décrite dans [ASTM C457, 2012] pour la mesure de la teneur en air dans le béton durci), ou par analyse d'images. La teneur en MA par rapport à la masse de départ est alors déterminée par des équations analytiques [Abbas *et al.*, 2007].

Les teneurs en MA trouvées dans la littérature, mesurées par dissolution acide, par la méthode du ciment coloré ou par traitement thermique, ont été comparées par [de Juan et Gutiérrez, 2009]. Les valeurs varient sur une large plage, selon le GBR étudié et la méthode utilisée. Elles se situent entre 25 et

70 % pour le procédé par dissolution acide, entre 25 et 65 % pour les mesures sur béton coloré et entre 40 et 55 % pour les méthodes thermiques.

Deux méthodes alternatives pour séparer la pâte de ciment du granulat naturel ont aussi été développées dans le cadre de l'ANR COFRAGE [Bru *et al.*, 2014 ; Touzé *et al.*, 2017]. Le but est de séparer autant que possible la PCD du GN afin de permettre une optimisation du recyclage des GBR. La première méthode repose sur l'utilisation des micro-ondes, qui provoquent une dilatation thermique différentielle entre la PCD et le GN, compte tenu des propriétés diélectriques et thermiques propres à ces deux phases. Ce traitement, appliqué avant le concassage, affaibli la liaison entre la PCD et le GN. Des expériences de laboratoire ont montré que le « degré de libération » des gravillons d'un GBR traités dans un concasseur à percussion passe de 71,6 % à 90,1 %, si le concassage est précédé d'un traitement aux micro-ondes. Pour une classe de taille donnée, le degré de libération est défini comme étant le rapport entre la teneur massique de grains libérés (grains sans PCD, triés visuellement) et la teneur massique de tous les grains recouverts de PCD. Par ailleurs, les résultats ont montré que l'efficacité de la libération du GN diminue avec la taille des grains. La deuxième méthode est basée sur l'application d'une décharge électrique à très haut voltage au travers de blocs immergés dans l'eau. Le champ électrique intense crée un plasma localisé à l'interface entre les matériaux de propriétés électriques différentes, ce qui entraîne une dilatation thermique, accompagnée d'une onde de choc radiale. Contrairement aux micro-ondes, qui servent à faire un prétraitement avant concassage, la fragmentation électrique peut être utilisée seule. Les auteurs ont montré que la méthode permet d'atteindre un bon degré de libération (entre 53 % et 83 %), l'efficacité augmentant avec la taille des grains.

3.2.1.2. Paramètres influençant la teneur en PCD ou en MA

La teneur et les propriétés de la PCD dépendent de la composition du béton d'origine. Une plus forte proportion de ciment et d'eau dans la formule du béton se traduira par une plus grande teneur en PCD dans les GBR. Cependant, la PCD n'est pas distribuée de façon homogène au sein les différentes classes granulaires concassées. En effet, plusieurs études ont montré que le taux de MA diminue quand la dimension des granulats augmente [Etxeberria *et al.*, 2007a ; de Juan et Gutiérrez, 2009 ; Topçu et Sengel, 2004]. En outre, la distribution de la PCD selon les classes granulaires de GBR est largement influencée par le procédé de concassage. [Nagataki *et al.*, 2004] ont étudié l'influence de la méthode de concassage sur la teneur en MA des gravillons de GBR. En effectuant un concassage primaire avec un concasseur à mâchoires ou à percussion, la teneur en MA de GBR issus de bétons de bonne, moyenne et moindre qualité (fraction 5/20 mm) est de 52,3 %, 55 % et 52,3 % respectivement. En réalisant un second concassage (concassage secondaire) avec différents types de concasseurs, la teneur en MA passe à 30,2 %, 32,4 %, 32,3 % respectivement. Par conséquent, les concassages successifs diminuent la teneur en MA des gravillons de GBR, mais augmentent concomitamment la quantité de fines de GBR.

3.2.1.3. Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GBR

Peu de travaux fournissent des données précises et exhaustives sur les caractéristiques chimiques et minéralogiques des GBR. Quelques études se sont intéressées au rôle du mortier adhérent (MA) vis-à-vis des propriétés générales des GBR, physiques et mécaniques. Comparé aux GN, ces études [Tam *et al.*, 2007 ; Al Bayati *et al.* 2016 ; Le *et al.*, 2016] ont montré que le MA augmente la porosité, i.e. diminue la masse volumique réelle, qu'il est le siège de l'apparition de micro-fissures pendant le concassage du béton, et qu'il présente une adhérence plus faible au niveau de l'auréole de transition (AT). D'un point de vue chimique, le MA recèle une teneur non négligeable en alcalins et en sulfates [Sánchez *et al.*, 2004]. À cet égard, [Mahmoud 2005 ; Sánchez *et al.*, 2004] ont établi des corrélations entre la teneur en MA des GBR et leur teneur en chlorures et en sulfates solubles.

Dans les études concernant les propriétés des bétons incorporant des matériaux recyclés, les GBR sont le plus souvent caractérisés au regard de classifications spécifiques. Par exemple, la RILEM [RILEM, 1994] et le BRE (Building Research Establishment) [BRE, 1998] définissent trois types de GBR qui tiennent compte de leurs teneurs en différents constituants, tels que les moellons de maçonnerie, les granulats naturels et recyclés, les gravats de briques et de bétons. Aujourd'hui, la classification en vigueur est celle de la norme européenne EN 933-11 [NF EN 933-11, 2009] qui définit cinq catégories de contaminants, en plus du béton (phase principale). Elle permet ainsi de décrire et de quantifier la teneur en chaque contaminant, et donc aussi de définir un degré de « pureté » du GBR. L'impact de ces catégories de contaminants sur les propriétés du béton frais et durci a été évalué dans de nombreuses études [Martin-Morales *et al.*, 2013].

Par ailleurs, les différentes normes et directives concernant les exigences chimiques des GBR pour leur réutilisation dans le béton [Martin-Morales *et al.*, 2013] sont centrées sur des propriétés spécifiques, telles la teneur totale en chlorures et en sulfates solubles (dans l'eau ou dans l'acide), ou la présence de matières organiques. Dans le cadre du projet DREAM [MRF, 2014], une technique simplifiée a été proposée pour déterminer rapidement la quantité de sulfates solubles issus de déchets de démolition, tels les GBR, afin de statuer sur leur potentielle réutilisation.

Néanmoins, la connaissance d'autres caractéristiques chimiques et minéralogiques des GBR est aussi nécessaire, afin de prévenir certaines pathologies, comme la réaction alcali-silice (détection au microscope optique des phases silicatées instables), et pour comprendre les mécanismes associés (voir dans cet ouvrage les chapitres dédiés à l'alcali réaction et à la réaction sulfatique interne). [Calvo Pérez *et al.*, 2002] ont réalisé au microscope pétrographique, sur plaques minces, l'étude détaillée de différents GBR. [Limbachiya *et al.*, 2007] ont caractérisé trois gravillons de GBR (classe granulaire 4/16 mm) provenant de la région de Londres selon d'autres méthodes d'étude : ainsi, l'analyse par fluorescence X des éléments principaux montre que l'origine du GBR a peu d'importance ; la diffraction des rayons X (minéralogie) indique la

présence de calcite, de quartz et d'autres minéraux en proportionnalité directe avec la teneur en GN des bétons d'origine. Les GBR obtenus par concassage de bétons expérimentaux durcis 28 jours [Evangelista *et al.*, 2015] présentent des diffractogrammes similaires, avec prédominance de quartz et de calcite. Les granulats naturels sont repérés par les pics correspondant à leurs minéraux spécifiques (feldspath K-Na, etc.). Le ciment hydraté est repéré par la présence de gypse, d'ettringite et de portlandite résiduels. Cette étude, comme celles de [Hansen, 1992b ; Sánchez *et al.*, 2004], montre finalement que les plus petites classes granulaires contiennent la plus forte teneur en MA, avec peu de GN. Les GBR étudiés dans le cadre du Projet National RECYBETON ont été entièrement caractérisés, notamment sous l'angle chimique et minéralogique.

3.2.2. Résultats RECYBETON

3.2.2.1. Matériaux et échantillonnage

Au lancement du Projet National RECYBETON, des stocks homogènes de granulats naturels et de granulats de béton recyclé (GBR) ont été constitués, afin que les laboratoires puissent disposer d'échantillons représentatifs durant toute la durée du projet. Les principales caractéristiques de ces matériaux sont rappelées dans l'annexe de ce livre.

3.2.2.2. Mesure de la teneur en mortier adhérent ou en pâte de ciment adhérente

[Braymand *et al.*, 2016] ont testé différentes méthodes expérimentales proposées dans la littérature pour récupérer le mortier adhérent (MA) des GBR RECYBETON (usure mécanique, sablage, attaque chimique, micro-ondes, traitement chaud/froid, ou différentes combinaisons de celles-ci). Ils ont montré qu'aucune des méthodes ne parvient en réalité à éliminer totalement le MA des GBR. Parmi celles testées, la combinaison des procédés thermiques et mécaniques s'est révélée la plus efficace. Les auteurs remarquent que l'évaluation de l'efficacité de séparation est délicate, car elle repose sur le choix du tamis utilisé pour séparer mortier et granulat naturel, et aussi parce que les méthodes de séparation endommagent le granulat naturel.

Les méthodes proposées dans la littérature s'intéressent essentiellement à la mesure de la teneur en MA des gravillons de GBR. Très peu s'intéressent à la mesure de leur teneur en PCD. La littérature montre aussi que le concassage du béton conduit à la concentration de la PCD dans les classes granulaires les plus fines. Par conséquent, la recherche de méthodes permettant d'évaluer la teneur en PCD dans la faction fine des GBR constitue une approche digne d'intérêt. Mais la détermination précise de cette teneur n'est pas facile à réaliser. Toutefois, dans certains cas, une estimation relative de la teneur en PCD donne déjà suffisamment d'informations pour caractériser un GBR.

Parmi les protocoles existants, les méthodes chimiques, comme la dissolution dans l'acide chlorhydrique, peuvent être appliquées aux sables et gravillons de

GBR. Cependant, l'acide chlorhydrique ne convient pas pour les GBR contenant des granulats calcaires. [Zhao *et al.*, 2013] ont mis au point une méthode basée sur la dissolution de la PCD par une solution d'acide salicylique, en présence de méthanol. L'acide salicylique permet de dissoudre sélectivement la plupart des phases hydratées composant la pâte de ciment, sans attaquer les phases principales des granulats naturels formant le squelette des bétons. La procédure est la suivante :

a) un échantillon représentatif de GBR est séché à 105 °C puis réduit jusqu'à passer entièrement à 0,2 mm ;

b) un prélèvement de 0,5 g est ensuite plongé dans une solution de 14 g d'acide salicylique en présence de 80 ml de méthanol, le tout étant agité pendant 1 heure ;

c) la fraction solide est filtrée sur filtre en verre (pores 10-16 µm) et lavée 4 fois à l'aide de méthanol (2-3 mm de hauteur sur le dessus du filtre) ;

d) le résidu solide est séché dans une étuve à 70 °C pendant 30 min. La PCD est alors estimée à partir de la Fraction Solubilisée dans l'Acide Salicylique (FSAS).

La précision de l'estimation de la PCD d'un GBR par la FSAS dépend de la proportion respective des éléments solubles et insolubles dans la PCD et dans le granulat naturel. Les silicates de calcium et leurs hydrates sont dissous dans l'acide salicylique, tandis que les aluminates de calcium et leurs hydrates (sauf l'ettringite) sont insolubles. En outre, le quartz, la dolomite, la calcite… ne sont pas dissous dans cet acide. La FSAS dépend donc principalement de la composition chimique du ciment. Afin d'évaluer l'impact du type de ciment sur la FSAS, des essais ont été réalisés sur deux pâtes pures de ciment (E/C = 0,5) l'une à base d'un CEM II (ciment gris contenant du calcaire (calcite) comme addition), l'autre à base d'un CEM I (ciment blanc dépourvu de C_4AF). Deux granulats naturels, l'un siliceux, l'autre calcaire, ont été aussi testés. Le Tableau 3.1 présente les résultats obtenus. La dissolution de la pâte de ciment blanc est presque totale, montrant que la FSAS est quasi équivalente à la teneur en PCD. Pour la pâte de ciment gris, la FSAS est beaucoup plus faible que la teneur en pâte de ciment. Le Tableau 3.1 montre aussi que les deux

Tableau 3.1

Pourcentage massique de la Fraction Solubilisée dans l'Acide Salicylique (FSAS) extraite de deux pâtes de ciment et de deux granulats naturels

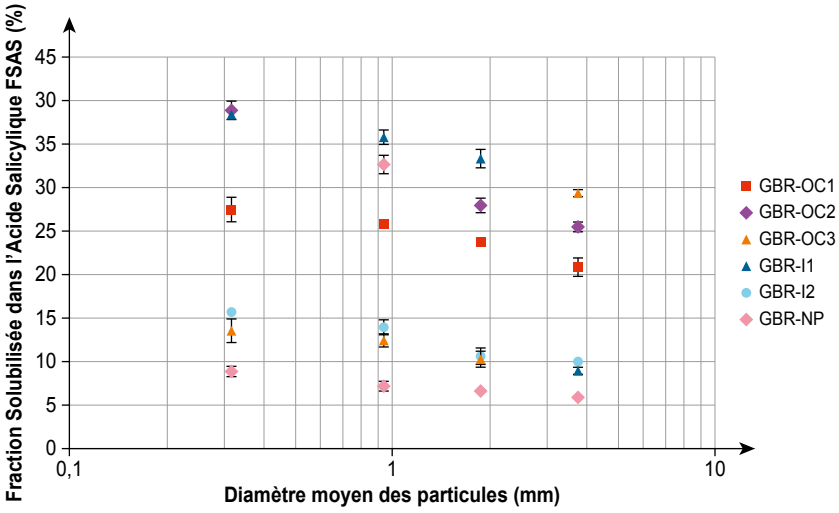
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
Pâte de ciment blanc	95,5	96,4	94,9	95,6
Pâte de ciment gris	62,6	63,1	63,3	63,0
Sable siliceux	0,8	0,9	0,9	0,9
Sable calcaire	3,4	3,0	3,2	3,2

granulats naturels présentent une FSAS très faible. Celle du granulat calcaire est un peu plus grande que celle du granulat siliceux, mais, dans les deux cas, ces résultats confirment que les GN ne sont pas réellement affectés par le protocole de dissolution utilisé. Dès lors, on peut considérer que la FSAS peut servir à déterminer une quantité relative de PCD contenue dans un GBR.

La FSAS a été mesurée selon le protocole proposé sur six fractions fines de GBR [Zhao *et al.*, 2015]. Trois GBR ont été obtenus par concassage dans un mini-concasseur à mâchoires de trois bétons fabriqués en laboratoire et conservés sous eau pendant 90 jours (GBR-OC1, GBR-OC2 et GBR-OC3). Un GBR sélectionné pour le Projet National RECYBETON (GBR-PN) et deux autres GBR industriels provenant d'autres plateformes de recyclage (GBR-I1 et GBR-I2) ont aussi été testés. Chaque GBR a été divisé en quatre classes granulaires (0/0,63, 0,63/1,25, 1,25/2,5 et 2,5/5 mm) et trois essais de dissolution ont été effectués sur chacune d'elles. La Figure 3.1 présente la variation de la FSAS en fonction de la taille moyenne des grains. Elle montre que la FSAS varie dans une très large mesure, selon la nature et la classe granulaire du GBR. Comme signalé précédemment, il n'est pas possible de comparer les valeurs absolues de la FSAS des GBR, en particulier pour les GBR industriels, parce qu'ils proviennent de différents bétons contenant probablement différents types de ciment. Cependant, pour un GBR donné, la FSAS augmente manifestement lorsque la taille des grains diminue. Ce résultat permet d'étendre aux sables recyclés les observations faites dans la littérature au sujet des gravillons recyclés.

Figure 3.1

Variation de la FSAS en fonction de la taille moyenne des grains pour différents sables de GBR



La mesure de la FSAS n'est pas un procédé facile à mettre en œuvre, car il est effectué sur des échantillons très petits, sauf à utiliser un grand volume de méthanol… Il faut donc un échantillonnage très rigoureux. Une autre méthode permettant d'utiliser un échantillon plus conséquent, fondée sur la perte de masse des GBR entre 105 et 475 °C ($PM_{105\text{-}475}$), a aussi été proposée par [Zhao, 2014] et développée par [Le *et al.*, 2016]. Cette méthode est différente des méthodes thermiques utilisées dans la littérature pour mesurer la teneur en MA. Ici, la perte de masse est utilisée pour évaluer la quantité d'eau liée contenue dans la PCD. Un premier chauffage à 105 °C permet de supprimer l'eau libre du GBR ; un deuxième chauffage à 475 °C permet de déshydrater la majeure partie des hydrates, sans affecter le GN. Là aussi, la perte de masse entre 105 et 475 °C ne donne pas la teneur réelle en PCD, mais une quantité proportionnelle à celle-ci. La procédure expérimentale est la suivante :

a) un échantillon sec de GBR est broyé jusqu'à passer entièrement au tamis de 0,2 mm, pesé et séché à 105 °C pendant 24 heures ;
b) 10 g (ou plus) de l'échantillon séché sont ensuite chauffés à 475 °C pendant 24 heures ;
c) la quantité d'eau liée est calculée à partir de la perte de masse entre 105 et 475 °C.

Cette méthode a été appliquée par [Le *et al.*, 2016] sur un sable recyclé. Elle a donné des résultats similaires à ceux obtenus par [Zhao *et al.*, 2015] avec la FSAS, pour caractériser la variation de la PCD en fonction de la taille des grains.

3.2.2.3. Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GBR

L'analyse concerne neuf GBR utilisés dans le cadre du Projet National RECYBETON : quatre sables (0/4 ou 0/6 mm) et cinq gravillons (4/20, 4/10 ou 10/20 mm), issus (concassage et criblage) de quatre plateformes de recyclage (identifiées 1 à 4). Ils ont été choisis pour représenter les principaux bassins urbains et industriels répartis sur le territoire national, ou encore les principaux contextes géologiques de la France (Tableau 3.2).

Les gravillons de GBR ont été analysés conformément à la norme européenne EN 933-11 [NF EN 933-11, 2009]. Les résultats (Tableau 3.3) donnent un

Tableau 3.2

Contexte géologique des bassins industriels d'où les GBR de l'étude sont issus

Plateforme	Contexte géologique principal
1	Périphérie du bassin parisien, proche d'un complexe métamorphique ancien
2	Bassin alluvial du Rhône et de la Saône – proximité du massif alpin
3	Centre du bassin sédimentaire de Paris
4	Bassin alluvial du Rhin : proximité des Vosges et de la Forêt-Noire

Tableau 3.3
Composition des gravillons de GBR selon la norme européenne EN 933-11

Plateforme	Classe granulaire	X	Rc	Ru	Rb	Ra	Rg
1	4-20	0,02	73,1	4,0	17,3	2,5	0,30
3	4-10	0,02	65,5	32,5	0,6	0,8	0,03
3	10-20	0,01	94,9	0,03	3,8	1,5	0,02
4	4-20	0,02	85,0	13,1	1,8	0,3	0

X : cohésif (argile et sols), métal, bois, plastiques, plâtre
Rc : béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonneries en béton
Ru : granulats seuls, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques
Rb : éléments de maçonnerie en argile, béton léger non-flottant
Ra : matériaux bitumineux
Rg : verre

aperçu des contaminants (typologie et teneur) présents dans les différentes productions de gravillons de GBR (par extension et en première approximation, les mêmes résultats ont été considérés pour les fractions fines). La « pureté » des produits est alors exprimée par les catégories Rc et Ru qui correspondent aux fragments extraits du béton initial. Excepté pour les matériaux de la plateforme n° 1, qui contiennent une part importante de briques et de débris bitumineux (Rb + Ra ≈ 20 %), les deux autres plateformes présentent des gravillons (et des sables) de GBR riches en fragments de béton (> 95 %). Le gravillon de GBR de la plateforme n° 2 n'a pu être caractérisé, mais seuls quelques contaminants étaient visiblement présents.

La pétrographie et la minéralogie des GBR ont été déterminées avec les techniques d'observations visuelles (macroscopiques, puis microscopiques).

L'observation macroscopique des gravillons peut déjà révéler les principaux types de roches présents dans le béton d'origine (Tableau 3.4). Pour les quatre plateformes étudiées, les résultats sont cohérents avec l'environnement géologique de leur bassin versant, avec deux paramètres qui apparaissent clairement : i) la plupart des bétons contiennent du sable siliceux alluvial ; ii) des calcaires sont toujours présents, y compris dans les bassins de production alimentés par des fleuves comme le Rhin ou le Rhône, traversant des régions géologiques à dominantes cristallines (Alpes).

Des analyses DRX complémentaires ont été effectuées sur les différents sables et gravillons de GBR. Des diffractogrammes très similaires ont été obtenus pour les matériaux (différentes granulométries) issus d'une même plateforme traitant les Déchets de Construction et de Démolition (DCD) locaux (Figure 3.2). Comme déjà observé précédemment, le quartz et la calcite sont les deux minéraux systématiquement présents, avec une très forte intensité de pics, quelle que soit la provenance du GBR. La forte teneur en quartz s'explique principalement

Tableau 3.4

Identification visuelle des principales roches présentes dans les GBR

Plateforme	Principaux types de roches identifiés, à l'exclusion du sable siliceux
1	Calcaires et roches métamorphiques (schistes, quartzite) + pollution artificielle (tuiles et briques)
2	Calcaires, grès, roches magmatiques diverses (granite, etc.) et roches métamorphiques (micaschistes, etc.)
3	Calcaires riches en silex
4	Calcaires, grès, roches magmatiques diverses (granite, etc.) et roches métamorphiques (schistes, quartzite, etc.)

par la présence systématique de sable siliceux alluvionnaire dans les bétons, et celle aussi de gravillons contenant du quartz. La forte teneur en calcite s'explique par deux origines : la présence de granulats calcaires et la carbonatation de la quasi-totalité de la portlandite initialement générée par l'hydratation du ciment. En effet, aucun pic décelable de portlandite n'a été observé sur les différents diffractogrammes. Les autres (petits) pics correspondent aux principaux minéraux qui caractérisent les différentes roches (GN). Ils sont plutôt présents pour les gravillons (moins pour les sables). Les principaux minéraux identifiés (DRX) pour les différentes plateformes sont présentés Tableau 3.5. Les silicates sont représentés principalement par des feldspaths K-Na, des plagioclases et du mica blanc. De la dolomite apparaît parfois, en plus de la calcite.

D'autres techniques ont été déployées pour révéler la présence de phases mineures comme les minéraux siliceux instables, ou certaines phases altérées produisant des éléments solubles, siliceux ou alcalins.

Tableau 3.5

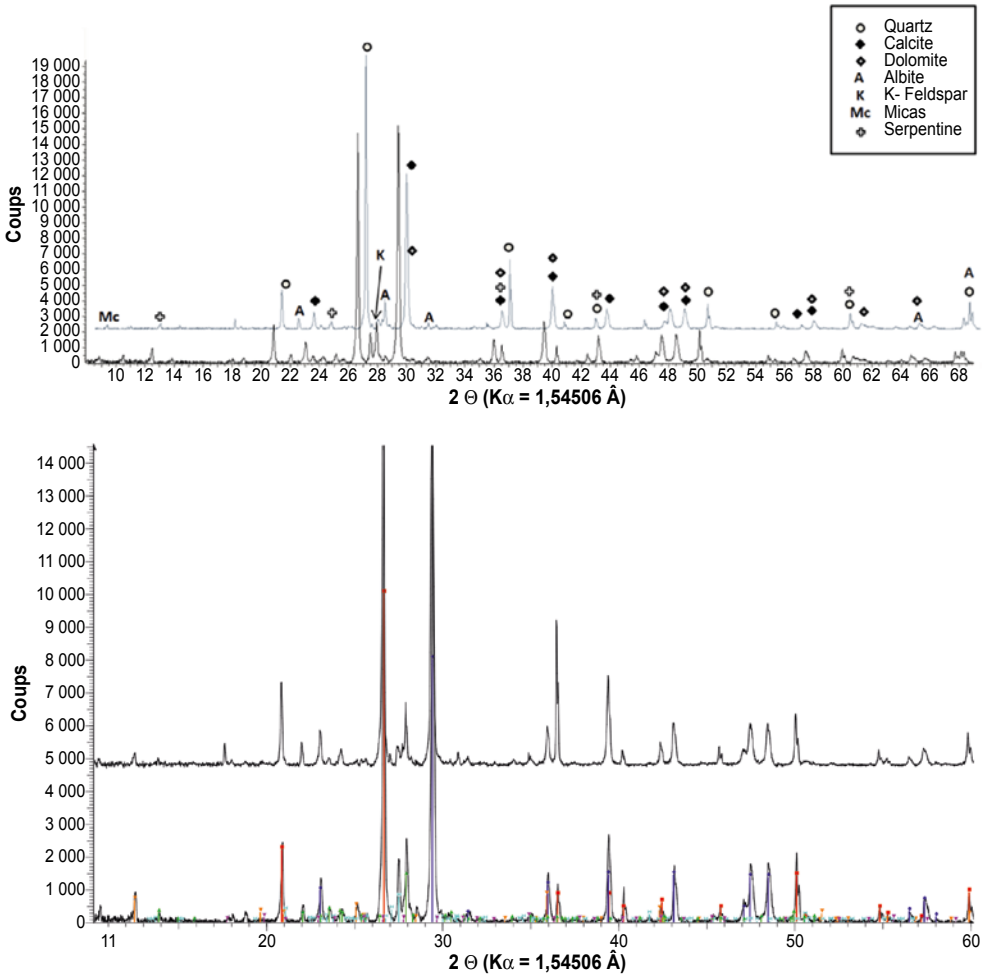
Principaux minéraux détectés par DRX, à l'exclusion du quartz et de la calcite (fortement présents)

Plateforme	Principaux minéraux identifiés par DRX à l'exclusion du quartz et de la calcite
1	Dolomite, Feldspaths K-Na (microcline/albite)
2	Micas (muscovite), Feldspaths K-Na (microcline/albite), chlorite
3	Dolomite et Feldspaths K, pics très faibles
4	Dolomite, Feldspaths K-Na (microcline/albite)

Les résultats précédents ont été complétés par l'observation de lames minces au microscope pétrographique. Six lames ont été préparées pour chaque plateforme. Les sables ont été séparés (tamisage) en trois coupures de tailles 0,16/1 mm, 1/2 mm et 4/6,3 mm. Des grains représentatifs ont été choisis dans

Figure 3.2

Diffractogrammes obtenus sur deux GBR de la plateforme n° 2 : sable 0/4 (en haut) et gravillon 10/20 mm (en bas). L'échelle en 2Θ s'étend de 8 à 69° (λCuKα = 1.54060Å)



LYN-File: cec738.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3,507° - End: 81,978° - Step: 0,017° - Step time: 1 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 3,507° - Aux1: 0,0 - Aux2: 0,0 - Aux3: 0,0 - Display plane: 0 - Ano

Lyon3-File: Lyon3 raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 6,000° - End: 80,007° - Step: 0,020° - Step time: 100,8 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 15 s - 2-Theta: 6,000° - Theta: 3,000° - Chi: 0,00° - Phi: 0,00° - X: 0,0 mm

00-033-1161 (*) - Quartz, syn - SiO2 - Y: 44,85 % - dxby: 1. - WL: 1,5406 - Hexagonal - a 4,91330 - b 4,91330 - c 17,06200 - alpha 90,000 - beta 90,000 - gamma 120,000 - Primitive - P3221 (154) - 3 - 113,005 - I/Ic PDF 3.6 - F30

00-005-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO3 - Y: 35,89 % - dxby: 1. - WL: 1,5406 - Rhombo.H.axes - a 4,98900 - b 4,98900 - c 5,40530 - alpha 90,000 - beta 90,000 - gamma 120,000 - Primitive - R-3c (167) - 6 - 367,780 - I/Ic PDF 2

00-022-1158 (*) - Magnesium Silicate Hydroxide - Mg3Si2O5(OH)4 - Y: 3,61 % - dxby: 1. - WL: 1,5406 - Rhombo.H.axes - a 5,34000 - b 5,34000 - c 21,30000 - alpha 90,000 - beta 90,000 - gamma 120,000 - Primitive - R3 (146)

00-003-0849 (*) - Muscovite - H4K2(Al,fE)6Si6O24 - Y: 0,71 % - dxby: 1. - WL: 1,5406 - Monoclinic - a 5,18000 - b 9,02000 - c 20,04000 - alpha 90,000 - beta 95,500 - gamma 90,000 - Base-centered - C2/c (15) - 4 - 932,030 - F3

00-019-0932 (*) - Microcline, intermediate - KAlSI3O8 - Y: 3,40 % - dxby: 1. - WL: 1,5406 - Triclinic - a 8,56000 - b 12,97000 - c 7,21000 - alpha 90,300 - beta 116,100 - gamma 89,000 - Base-centered - C-1 (0) - 4 - 718,739 - F30

00-009-0466 (*) - Albite, ordered - NaAlSi3O8 - Y: 6,31 % - dxby: 1. - WL: 1,5406 - Triclinic - a 8,14400 - b 12,78700 - c 7,16000 - alpha 94,260 - beta 116,600 - gamma 87,670 - Base-centered - C-1 (0) - 3 - 664,837 - I/Ic PDF2.1

les gravillons de GBR. Les différents échantillons ont été coulés dans une résine thermodurcissable et des plaques minces ont été fabriquées selon la technique habituelle. Les observations pétrographiques confirment les interprétations DRX et permettent, en plus, de détecter des minéraux faiblement représentés, comme la chlorite, etc. Ils donnent également des informations sur la structure des grains (Figure 3.3). Les grains fins sont essentiellement formés de monocristaux plus ou moins entourés de PCD. Certains grains sont entièrement composés de PCD. Le quartz est la variété dominante. Lorsque la taille augmente, les grains peuvent être composés de plusieurs éléments/cristaux reliés par de la PCD, ou bien constitués de fragments de roches qui peuvent être partiellement ou totalement entourés de PCD. Les gravillons de GBR, quant à eux, sont formés par une variété de fragments de roches typiques de la zone géologique/géographique d'où les granulats et les bétons sont issus. La PCD représente alors la fraction volumique la moins abondante du GBR et elle n'entoure pas tout le grain.

Figure 3.3

Divers aspects des granulats (plateforme n° 4) en fonction de leur taille.
Champ : 3,2 × 2,6 mm (analyse en lumière polarisée).



Crédit photo : J.-M. Mechling, IJL.

En allant des fines aux gravillons, les observations montrent que la teneur en PCD diminue alors que la diversité minéralogique augmente. Par ailleurs, la PCD a tendance à former des petits grains individuels pendant le concassage. Comme déjà signalé par [Hansen, 1992], les analyses par fluorescence X (réalisées dans le cas présent) montrent que la PCD se concentre dans la fraction fine (fillers et sable).

Par ailleurs, la variété minéralogique des gravillons accroît la possibilité de la présence de silice instable. L'évaluation d'un risque de réaction alcali-silice (RAS) associé à la minéralogie/pétrographie des GBR a donc été faite, en utilisant les techniques d'investigation dévolues aux granulats naturels.

La détection de la présence éventuelle de silice instable a été réalisée selon la norme [NF XP P18-543, 2015], sur les plaques minces taillées dans les différents gravillons de GBR (Figure 3.4). Calcédoine, quartz à extinction roulante, quartz secondaire micronisé, silicates altérés, verres volcaniques, etc. ont été observés ponctuellement, en faibles quantités. Ces investigations ont révélé également qu'une part importante de la silice contenue dans le GBR de la plateforme n° 3 est issue de silex.

Figure 3.4

Silices instables : a) silice fibreuse (calcédoine) dans un silex ; b) quartz à extinction roulante ; c) feldspaths altéré. Champ : 3,2 × 2,6 mm (analyse en lumière polarisée)

a) b) c)



Crédit photo : J.-M. Mechling, IJL.

La composition chimique des sables et gravillons de GBR a été déterminée par fluorescence X (FX), après perte au feu. Malgré la présence de roches siliceuses diversifiées, les résultats sont comparables (Tableau 3.6), du moins pour les éléments majeurs qui varient peu d'un GBR à l'autre. La présence dominante de quartz et de calcite « écrase » les résultats. Les teneurs respectives évoluent dans des plages relativement similaires. Pour les éléments majeurs, les écarts-types sont d'amplitude relativement faible (< 10 %) et ils sont plus faibles (en moyenne) pour les sables.

Tableau 3.6

Perte au feu (PAF) et éléments chimiques majeurs des 9 GBR testés. Les moyennes et écarts-types sont calculés pour les sables (S) et les gravillons (G). L'écart-type en italique est exprimé relativement à la moyenne. Toutes les valeurs sont en pourcent.

	S1	S2	S3	S4	Moy.	Écart Type	*Écart Type*	G1	G2	G3		G4	Moy.	Écart Type	*Écart Type*
	0/6	0/6	0/4	0/4				4/20	4/20	4/10	10/20	4/20			
PAF	21,55	20,56	18,06	17,09	19,32	2,09	*10,8*	19,17	20,99	16,64	15,71	15,96	17,69	2,3	*13*
SiO_2	46,61	47,42	58,45	57,04	52,38	6,23	*11,9*	45,64	51,51	57,75	58,82	54,11	53,57	5,3	*9,9*
Al_2O_3	4,54	5,58	2,47	4,76	4,34	1,32	*30,5*	5,05	4,41	2,55	2,39	5,35	3,95	1,39	*35,3*
Fe_2O_3	2,85	2,12	1,61	2,06	2,16	0,51	*23,8*	1,92	1,36	0,85	0,83	1,62	1,32	0,48	*36,3*
CaO	20,66	20,77	17,12	15,51	18,52	2,62	*14,2*	25,88	19,22	21,99	22,29	20,61	22,00	2,49	*11,3*
MgO	1,18	0,81	0,62	0,93	0,89	0,23	*26,5*	1,07	0,89	0,64	0,45	0,97	0,80	0,25	*31,6*
SO_3	0,62	0,39	0,47	0,35	0,46	0,12	*26,1*	0,58	0,29	0,12	0,14	0,39	0,30	0,19	*62,5*
K_2O	0,78	1,05	0,47	0,99	0,82	0,26	*31,8*	0,94	0,88	0,56	0,56	1,11	0,81	0,24	*30*
Na_2O	0,30	0,81	0,15	0,50	0,44	0,29	*64,8*	0,33	0,51	0,28	0,26	0,65	0,41	0,17	*41,5*
Na_20 eq.	0,81	1,50	0,46	1,15	0,98	0,45	–	0,94	1,09	0,64	0,63	1,38	0,94	0,32	–

La PCD contient une partie non négligeable de sulfates issus du ciment initial. Les sables sont enrichis en PCD, comme le montrent les études pétrographiques et les valeurs de PAF (plus élevées de 2 % pour les sables). Ils sont donc plus riches en sulfates que les gravillons (0,46 % en moyenne contre 0,30 %).

La teneur moyenne en alcalins est de l'ordre de 0,8 % pour K_2O et de 0,4 % pour Na_2O, à la fois pour les sables et les gravillons de GBR. Il existe toutefois des variations significatives entre GBR, révélés par des écarts types légèrement plus élevés pour les alcalins, en particulier pour Na_2O, que pour les éléments majeurs (la variation relative d'écart-type est respectivement de 65 % et 42 % pour les sables et les gravillons).

Finalement, les neuf GBR analysés montrent que les sables et gravillons produits sur une même plateforme ont une grande similitude chimique et minéralogique. Quartz et calcite (i.e. calcaire) sont les minéraux dominants des GBR, indépendamment du contexte géologique et géographique. Les autres minéraux (et roches) sont représentatifs du contexte local. Les plus fréquents sont les feldspaths K-Na, les plagioclases et le mica blanc pour les silicates, la dolomite pour les carbonates. Les sables contiennent plus de PCD que les gravillons. Les éléments majeurs des GBR (Ca, Si, Fe, Al) évoluent dans une même fourchette, avec un faible écart type relatif. Les différences sont relativement plus prononcées pour les sulfates et les alcalins. Ces derniers sont particulièrement concentrés dans les sables.

3.2.2.4. Contrôle de la teneur en GBR dans un mélange de sables naturels et recyclés

La commercialisation de mélanges sable naturel – sable de GBR est une voie prometteuse pour la valorisation des sables de GBR dans les bétons. Toutefois, le contrôle qualité exercé par le producteur et l'utilisateur nécessite de pouvoir vérifier la proportion réelle de sable de GBR dans les mélanges.

Comme les GBR contiennent de la PCD, les sables de GBR ont une masse volumique plus faible que les sables naturels. Leur séparation physique pourrait alors être faite à l'aide de liquides denses, de cyclones, etc. Toutefois, ces techniques nécessitent des matériels spécifiques ou des produits chimiques qui ne sont pas couramment utilisés sur les plateformes de recyclage, les carrières ou les centrales à béton. La séparation physique pourrait également se faire à partir de différences de couleurs ou de formes entre les deux sables, mais la diversité, spatiale et temporelle des granulats, naturels et de GBR, conduit à un large éventail de situations.

Les sables de GBR ne sont pas homogènes. Ils contiennent des grains de couleur et de densité différentes en raison de la présence des impuretés et de la répartition hétérogène de la pâte de ciment adhérente ou non aux grains de sable. Par ailleurs, il est souvent nécessaire de travailler sur des tranches granulaires étroites, en raison des difficultés de séparer, par densité/gravité par exemple, des grains de volumes différents. De même, en considérant la

couleur ou la forme, il est difficile de trier les particules les plus fines (< 1 mm). Par conséquent, la séparation physique du sable naturel et du sable recyclé d'un mélange n'est pas réaliste ou, du moins, difficilement réalisable en carrière ou en centrale à béton (laboratoire). En outre, elle nécessite la connaissance de la granularité du granulat naturel et du GBR.

Diverses propriétés des granulats commercialisés pour la production de béton sont régulièrement contrôlées (granularité, absorption d'eau, etc.). En mesurant l'une de ces propriétés (P), à la fois pour le sable naturel, le sable de GBR et leur mélange, la teneur en GBR peut être alors déterminée en supposant l'additivité de cette propriété (équation 3.1).

$$\text{Teneur GBR} = \frac{P_{\text{mélange}} - P_{GN}}{P_{GBR} - P_{GN}} \tag{3.1}$$

Pour ce type de dosage, la précision dépend de la proportion de sable de GBR, du contraste entre les propriétés des deux sables (naturel et de GBR), ainsi que la précision de la méthode d'essai. Par exemple, un calcul d'erreur montre que dans un mélange contenant une faible proportion de sable de GBR (10 %), pour une propriété mesurée avec une erreur relative de 5 % (par exemple $Ab_{24,GBR}$ = 10 ± 0,5), l'erreur de dosage (équation 3.2) n'est inférieure à 2 % que si le contraste entre la valeur de cette propriété mesurée sur les deux sables est supérieur à 11 (par exemple, $Ab_{24GBR} > 11 \times Ab_{24GN}$). Pour une propriété mesurée avec une erreur relative de 10 %, le dosage avec moins de 2 % d'erreur est impossible, même avec un contraste de propriétés très, très grand…

$$\text{Erreur Dosage (\%)} = \left|\text{Teneur en GBR mesurée (\%)} - \text{Teneur en GBR réelle (\%)}\right| \tag{3.2}$$

Généralement, les granulats naturels et recyclés présentent des différences importantes en termes d'absorption d'eau, de présence d'impuretés, mais aussi de sulfates solubles dans l'eau. Le Tableau 3.7 indique les valeurs mesurées sur des sables de GBR (3 plateformes de recyclage) et des sables naturels habituellement utilisés pour la production de béton (4 carrières). L'absorption d'eau et la teneur en sulfates solubles dans l'eau ont été mesurées selon les normes [NF EN 1097-6, 2014] et [NF EN 1744-1 + A1, 2014], respectivement. Le nombre de particules bitumineuses a été déterminé visuellement sur trois fractions granulaires (0,5/1, 1/2,5 et 2,5/4) après tamisage sous eau. Avec ces sept sables et en mesurant ces trois propriétés sur des mélanges contenant quatre (faibles) teneurs en sable de GBR (2,5 ; 5 ; 7,5 et 10 %), 24 dosages ont ainsi été réalisés (Tableau 3.8). Ils montrent que, en moyenne, ces propriétés peuvent être utilisées pour vérifier la teneur en GBR dans le mélange. Toutefois, le dosage avec une erreur inférieure à 2 % (équation 3.1) ne peut être réalisé qu'avec la mesure de la teneur en sulfates solubles, dans les conditions de répétabilité. Si l'absorption d'eau ou la teneur en impuretés sont utilisées, l'erreur de dosage ne peut être inférieure à 6 %. La précision peut être améliorée si les essais sont répétés plusieurs fois, à la fois sur les sables et sur leurs mélanges.

Tableau 3.7

Propriétés des sables naturels et des sables recyclés

		Sable recyclé	Sable naturel
Absorption d'eau (Ab %)		6,3-8,6	0,5-2,0
Nombre de particules bitumineuses	dans 100 g de la fraction 2,5/4	136-160	0
	dans 33,2 g de la fraction 1/2.5	118-140	0
	dans 9,8 g de la fraction 2,5/4	92-145	0
Sulfates solubles dans l'eau (%)		0,09-0,22	< 0,003-0,03

Tableau 3.8

Erreur (%) sur le dosage en sulfates solubles, impuretés bitumineuses et absorption d'eau

	Erreur (%) sur 24 dosages		
	Sulfates solubles	**Impuretés bitumineuses**	**Absorption d'eau**
Moyenne	1,0	2,6	2,8
Écart type	0,4	2,7	1,6
Minimum	0,1	0,1	0,8
Maximum	1,9	9,5	6,6

En conclusion, la présence de 10 % seulement de sable de GBR modifie sensiblement les caractéristiques du sable naturel, comme l'absorption d'eau, la présence d'impuretés et la teneur en sulfates solubles. Dans le mélange, le sable de GBR peut être détecté en mesurant ces différentes propriétés, mais sa quantification précise n'est pas réellement possible. Si le mélange contient une faible proportion de sable de GBR, seule la mesure des sulfates solubles dans les conditions de répétabilité permet de contrôler le dosage avec une erreur inférieure à 2 %. La détermination précise de la proportion de GBR en condition de reproductibilité est compromise… Les contrôles de production ou d'utilisation, ou les agréments, seraient plus facilement validés si des propriétés cibles du mélange étaient plutôt fixées (teneur limite en sulfates solubles, par exemple) et non un pourcentage de GBR dans le mélange.

3.3. Propriétés physiques des GBR

3.3.1. État de l'Art

3.3.1.1. Masse volumique et absorption d'eau des GBR

Les propriétés physiques, comme la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption d'eau (Ab), sont des propriétés très importantes pour la réutilisation des GBR dans le béton. La masse volumique réelle correspond au rapport entre la masse sèche d'un échantillon de granulat (séché à l'étuve) et le volume qu'il occupe dans l'eau, y compris le volume de tous les pores accessible et inaccessibles à l'eau. L'absorption d'eau correspond au rapport entre la masse d'eau absorbée par un échantillon de granulat après immersion dans l'eau et sa masse sèche. En règle générale, les GBR ont une absorption d'eau supérieure et une masse volumique réelle inférieure que celles des granulats naturels, en raison de la présence de la PCD. La mesure de Ab est particulièrement importante car elle détermine la quantité d'eau efficace (E_{eff}) dans le béton, cette quantité se référant à l'eau présente dans la pâte fraîche de ciment, à l'exclusion de l'eau absorbée par les granulats.

Jusqu'à présent, il n'existe pas de norme particulière pour mesurer la masse volumique réelle et l'absorption d'eau des GBR. Les normes dédiées aux granulats naturels, telles [NF EN 1097-6, 2014 ; ASTM C127, 2015] (pour les gravillons), [ASTM C128, 2015] (pour les sables) sont donc aussi utilisées pour les GBR. Les méthodes sont basées sur le même principe : le granulat est tout d'abord immergé 24 h dans l'eau, puis le coefficient d'absorption d'eau (Ab_{24}) est déterminé en mesurant la teneur en eau à l'état Saturé Surface Sèche (SSS). À ce stade, les pores accessibles à l'eau sont supposés saturés d'eau, la surface des grains étant sèche (seul un mince film d'eau adsorbée persiste). L'état SSS des gravillons est obtenu en essuyant les grains un à un avec un chiffon sec ou des feuilles de papier absorbant jusqu'à ce que l'eau ne soit plus visible en surface. L'état SSS des sables est atteint en séchant progressivement l'échantillon sous un flux d'air chaud et il est repéré à l'aide d'un essai d'affaissement en admettant que lorsque la surface des grains devient sèche, la cohésion liée aux forces capillaires disparaît.

Les propriétés physiques des GBR varient dans une large fourchette selon l'origine et la taille du GBR (sable ou gravillon). À partir de plus de 230 articles sur les GBR, [Silva *et al.*, 2014b] ont constaté que la masse volumique réelle et Ab_{24} suivaient une distribution normale. La masse volumique réelle moyenne de tous les résultats recueillis est 2 327 kg/m^3 pour les gravillons et 2 065 kg/m^3 pour les sables de GBR. Pour Ab_{24}, les valeurs sont 4,7 % pour les gravillons et 9,5 % pour les sables.

Les protocoles utilisés pour les granulats naturels ne sont pas réellement adaptés pour les GBR. [Tam *et al.*, 2008] signalent que l'immersion des GBR peut entraîner un détachement partiel de la PCD. De même, le séchage à l'étuve à 105 °C pour obtenir la masse sèche peut éliminer une partie de l'eau liée aux

hydrates de la PCD. Ils ont alors proposé une méthode spécifique pour les GBR, appelée Évaluation de l'Absorption d'Eau en Temps réel (EAET ou RAWA en anglais). Ici, la masse sèche est tout d'abord obtenue après 24 h à l'étuve à 75 ± 5 °C. Les granulats sont ensuite placés dans un pycnomètre entièrement rempli d'eau distillée et l'eau absorbée est enregistré à différents intervalles de temps. Cette méthode permet non seulement d'éviter les inconvénients mentionnés précédemment, mais elle donne aussi la cinétique d'absorption du GBR. Une autre méthode, utilisant la pesée hydrostatique, a également été proposée par [Djerbi Tegguer, 2012] pour évaluer la cinétique d'absorption d'eau des granulats. Cette méthode est basée sur l'étude de la variation de masse d'un échantillon immergé dans l'eau. Les deux approches ont montré que, contrairement aux granulats naturels testés, l'absorption d'eau des GBR n'est pas toujours achevée après 24 h d'immersion dans l'eau. Dans certains cas, jusqu'à 120 h sont nécessaires pour atteindre un équilibre stable. De plus, ils ont montré que la vitesse initiale d'absorption d'eau diminuait progressivement avec le temps. [Tam *et al.*, 2008] ont indiqué que, par exemple, 80 % de l'absorption d'eau des GBR était satisfaite après 5 h d'immersion. Cependant, ces méthodes ne permettent pas de déterminer précisément l'absorption d'eau au tout début de l'expérience, car l'air entourant au départ les grains doit être éliminé, ce qui est particulièrement difficile pour les sables de GBR.

3.3.1.2. Influence de la carbonatation sur les propriétés des GBR

Selon la durée et les conditions de stockage des GBR après concassage, la PCD adhérente peut être plus ou moins carbonatée. En effet, le concassage augmente significativement la surface spécifique du béton, ce qui accélère le processus de carbonatation. La carbonatation de la portlandite et des CSH conduit à la formation de produits plus volumineux, qui peuvent colmater la porosité de la PCD et changer les propriétés physiques du GBR.

[Thiery *et al.*, 2013] ont montré que le taux d'absorption du CO_2 est plus faible pour les grains de tailles inférieures à 2 mm, et ayant un taux de saturation en eau liquide inférieur à 0,4. La carbonatation affecte donc de façon significative les propriétés de GBR fins. [Zhang *et al.*, 2015] ont observé que la carbonatation améliore sensiblement les propriétés physiques des sables de GBR, avec une diminution de l'absorption d'eau, une augmentation de la masse volumique réelle et une légère diminution de la valeur à l'essai d'écrasement. La valeur à l'essai d'écrasement est définie comme le pourcentage de perte de masse d'une classe granulaire donnée après chargement à 25 kN [JGJ 52, 2006]. [Zhao, 2014] a observé des résultats similaires pour l'absorption d'eau et la masse volumique réelle sur des GBR de laboratoire carbonatés ou non carbonatés. Il a également montré que la carbonatation pouvait changer significativement la mesure de la teneur en PCD adhérente. En effet, la carbonatation réduit largement la fraction soluble dans l'acide salicylique et conduit au contraire à une augmentation de la perte de masse des GBR entre 105 et 600 °C. Ce dernier résultat est dû au fait que certaines phases carbonatées de la pâte de ciment commencent à se décomposer vers 500 °C [Villain *et al.*, 2007].

3.3.2. Résultats RECYBETON

3.3.2.1. Gravillons de GBR

La masse volumique réelle a été mesurée sur les gravillons de GBR sélectionnés pour le Projet National RECYBETON, sur trois classes granulaires différentes : 4/10, 10/20 et 4/20 [Laneyrie *et al.*, 2014]. Elle a tout d'abord été déterminée trois fois sur un seul échantillon de chaque classe (Tableau 3.9), puis sur cinq échantillons différents de chaque classe (Tableau 3.10). Ces résultats montrent que la méthode normalisée de mesure de la masse volumique réelle peut être appliquée efficacement aux gravillons de GBR.

Tableau 3.9

Masse volumique réelle mesurée trois fois selon la norme EN 1097-6 sur un seul échantillon de GBR [Laneyrie *et al.*, 2014b]

Classe granulaire	Nombre d'essais	Masse volumique réelle ($g \cdot L^{-1}$)	Écart moyen ($g \cdot L^{-1}$)	Écart moyen relatif (%)
4/10	3	2,27	0,003	0,13
10/20	3	2,24	0,006	0,27
4/20	3	2,22	0,004	0,18

Tableau 3.10

Masse volumique réelle mesurée selon la norme EN 1097-6 sur cinq échantillons différents de GBR [Laneyrie *et al.*, 2014]

Classe granulaire	Nombre d'essais	Masse volumique réelle ($g \cdot L^{-1}$)	Écart moyen ($g \cdot L^{-1}$)	Écart moyen relatif (%)
4/10	5	2,26	0,03	1,33
10/20	5	2,24	0,01	0,45
4/20	5	2,24	0,05	2,25

[Jezequel, 2014b] a également réalisé une étude sur les incertitudes de mesure et la pertinence de la procédure normalisée [NF EN 1097-6, 2014] appliquée à la détermination de l'absorption d'eau et de la masse volumique réelle des gravillons recyclés. Trois techniciens ont réalisé cinq essais sur des échantillons représentatifs provenant du même matériau. Pour chaque échantillon, la masse volumique réelle et Ab_{24} ont été déterminées sur la coupure 10/20 mm. Les résultats ont été analysés selon la norme [NF ISO 5725-2, 1994] afin de vérifier l'applicabilité de la procédure aux gravillons de GBR. Cette étude a montré que les valeurs de répétabilité et de reproductibilité pour la masse volumique réelle des GBR étaient inférieures aux exigences de la norme (Tableau 3.11).

Tableau 3.11

Valeurs de répétabilité et de reproductibilité pour la masse volumique réelle des gravillons de GBR [Jezequel, 2014b]

		Répétabilité	Reproductibilité
Masse volumique réelle (Mg/m^3)	Étude RECYBETON	0,01	0,01
	Valeurs standard*	0,031	0,042

* Annexe I §I.1- Précision, NF EN 1097-6, 2014.

Le coefficient d'absorption d'eau des gravillons de GBR a été également déterminé selon la méthode normalisée EN 1097-6. Le Tableau 3.12 montre les résultats obtenus sur les trois classes granulaires 4/10, 10/20 et 4/20 par [Laneyrie *et al.*, 2014].

[Jezequel, 2014b] a également étudié la répétabilité et la reproductibilité de la mesure d'absorption d'eau des gravillons de GBR (Tableau 3.13). Les valeurs sont conformes aux exigences de la norme. L'auteur souligne cependant que l'état SSS peut se révéler difficile à identifier pour les gravillons de GBR. En effet, leur rugosité empêche un repérage facile de la transition surface humide – surface sèche, contrairement aux granulats naturels où le passage d'une surface brillante à une surface matte est plus facilement identifié.

Tableau 3.12

Coefficient d'absorption d'eau mesuré selon la norme EN 1097-6 sur un seul échantillon de gravillon de GBR [Laneyrie *et al.*, 2014]

Classe granulaire	Nombre d'essais	Ab_{24} (%)	Écart moyen (%)	Écart moyen relatif (%)
4/10	3	6,16	0,26	4,22
10/20	3	5,83	0,10	1,72
4/20	3	6,69	0,12	1,79

Tableau 3.13

Valeurs de répétabilité et de reproductibilité pour l'absorption d'eau des gravillons de GBR [Jezequel, 2014b]

		Répétabilité	Reproductibilité
Absorption d'eau (%)	Étude RECYBETON	0,32	0,32
	Valeur standard*	0,3	0,4

* Annexe I §I.1- Précision, NF EN 1097-6, 2014.

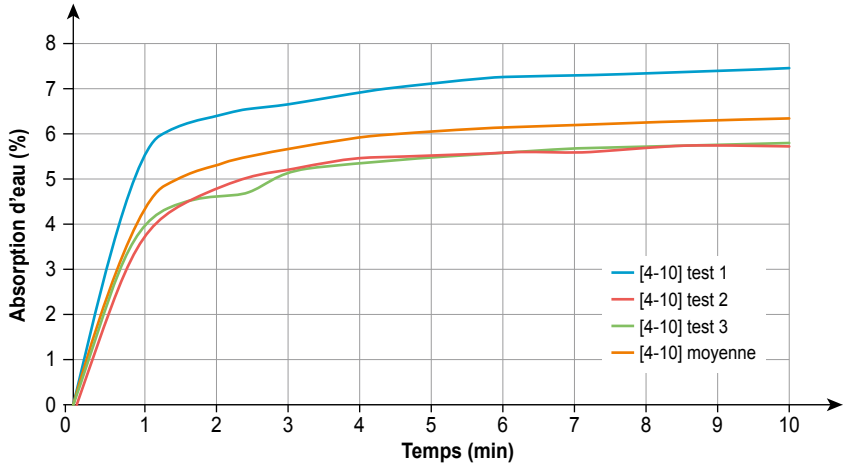
Selon la norme [NF P 18-545, 2011] article 10, les granulats de béton recyclé (GBR) utilisés dans le Projet National RECYBETON sont classés « Code C » pour l'absorption d'eau, ce qui interdit leur utilisation pour la fabrication de bétons exposés à certains environnements agressifs ou pour certaines constructions particulières [Aït Alaiwa *et al.* 2014].

La cinétique d'absorption des gravillons de GBR a été mesurée avec différents protocoles dans le cadre du Projet National RECYBETON. [Laneyrie et Lavaud, 2014] ont utilisé la méthode de [Tam *et al.*, 2008], qui n'utilise qu'un seul échantillon pour la mesure de la cinétique, ce qui réduit la variabilité. La Figure 3.5 montre les résultats obtenus pour la fraction 4/10 mm. 92 % de l'absorption d'eau à 24 h est atteinte après 10 minutes d'immersion. Après 5 minutes, c'est-à-dire le temps nécessaire pour la fabrication du béton, seule 85 % de l'absorption est atteinte. Par conséquent, l'ajout au départ de la quantité d'eau correspondant à la totalité de Ab_{24} peut conduire à une plus grande maniabilité initiale du béton que prévue.

[Bendimerad *et al.*, 2014] ont étudié la cinétique d'absorption de gravillons naturels et de GBR, a deux stades hydriques initiaux différents (séché à l'étuve ou après conservation dans une enceinte climatique à 20 °C et 50 % d'humidité relative). Ils ont utilisé simultanément deux méthodes : la méthode EAET-WRAP (Waste & Resources Action Programme) présentée par [Tam *et al.*, 2008], et la pesée hydrostatique, utilisée par [Djerbi Tegguer, 2012]. Ils ont montré que les deux méthodes permettent de mesurer la cinétique d'absorption des gravillons dès 5 min après l'immersion, et qu'elles donnent les mêmes vitesses et valeurs finales d'absorption. Cependant, dans les deux cas, l'absorption d'eau (significative) entre l'instant d'immersion et la première

Figure 3.5

Cinétique d'absorption d'un gravillon de GBR 4/10 pendant les 10 premières minutes d'immersion [Laneyrie *et al.*, 2014]



mesure n'est pas prise en compte. Ils proposent alors de la déduire *a posteriori* en mesurant l'absorption finale selon la méthode normalisée EN 1097-6. L'eau absorbée par les GBR après 24 h d'immersion représente environ 92 % de l'absorption finale. Elle peut donc être considérée comme une bonne estimation de l'absorption d'eau à long terme. Cependant, comme la quantité d'eau absorbée par les GBR entre 1 h et 24 h n'est plus très significative, les auteurs proposent alors d'utiliser la valeur d'absorption d'eau à 1 h pour formuler les mélanges contenant des GBR, ou pour imbiber les GBR avant utilisation.

L'absorption d'eau, la porosité et la masse volumique ont aussi été déterminées selon la norme EN 1097-6 et selon l'ancienne norme [NF P 18-459, 2010] (saturation après immersion sous vide) [Omary *et al.*, 2015]. Le Tableau 3.14 présente les résultats obtenus.

Tableau 3.14

Absorption d'eau, masse volumique réelle et porosité mesurées avec différents protocoles normalisés. [Omary *et al.*, 2015]

Méthode	**Mesure**	**GBR 4/10**		**GBR 10/20**	
Temps d'immersion		**24 h**	**48 h**	**24 h**	**48 h**
Pycnomètre [NF EN 1097-6, 2014]	Ab (%)	5,6	5,7	5,7	5,8
	ρ_{rd} (Mg/m^3)		2,29		2,26
	Porosité (%)		13,0		12,7
Sous vide [NF P 18-459, 2010]	Ab (%)	6,1	6,4	6,2	6,2
	ρ_{rd} (Mg/m^3)		2,23		2,22
	Porosité (%)		13,4		13,7
Pesée Hydrostatique [NF EN 1097-6, 2014]	Ab (%)	5,4	5,7	5,6	5,6

Le Tableau 3.14 montre que l'absorption d'eau à long terme des gravillons de GBR peut être estimée de façon satisfaisante par la mesure à 24 h, comme le recommande la norme NF EN 1097-6. Les porosités mesurées sur les GBR sont proches de celles des bétons traditionnels. Les valeurs d'absorption d'eau mesurées selon les deux méthodes de la norme NF EN 1097-6 sont très proches l'une de l'autre, et légèrement inférieures à celles obtenues sous vide, méthode qui influence aussi la valeur de la porosité et de la masse volumique réelle.

3.3.2.2. Sable de GBR

Dans le cadre du Projet National RECYBETON, le coefficient d'absorption d'eau Ab_{24} du même sable de GBR a été déterminé par plusieurs laboratoires, en utilisant différentes méthodes expérimentales. Avec la méthode normalisée [NF EN 1097-6, 2014], la valeur de Ab_{24} varie entre 6,8 % et 9,8 % pour la

fraction 0/4 mm et entre 6,9 % et 7,8 % pour la fraction 0,063/4 mm ([Sedran, 2013 ; Jezequel, 2014b ; Aït Alaiwa et Lavaud, 2014 ; Laneyrie *et al.*, 2014 ; Le, 2015 ; Cyr *et al.*, 2014]). L'écart pour la fraction 0/4 mm est très grand (3 % entre la valeur la plus élevée et la plus faible). L'écart est plus faible pour la fraction 0,063/4 mm, mais le nombre de résultats (3) est plus faible aussi…

[Jezequel, 2014b] a également réalisé une étude sur la pertinence de la méthode normalisée [NF EN 1097-6, 2014] pour la mesure de l'absorption d'eau et de la masse volumique réelle du sable de GBR (même sable que pour les études précédentes). Comme pour les gravillons de GBR, trois techniciens ont réalisé cinq essais sur des échantillons représentatifs du même sable de GBR. Pour chaque échantillon, la masse volumique réelle et Ab_{24} ont été mesurées sur les fractions 0/4 mm et 0,063/4 mm. Les résultats ont été analysés selon la norme [NF ISO 5725-2, 1994] afin de vérifier l'applicabilité de la procédure aux sables de GBR. Ils montrent que la masse volumique réelle varie entre 2080 et 2 260 kg/m^3, variations conformes aux exigences de la norme [NF ISO 5725-2, 1994]. Cependant, les valeurs de Ab_{24} s'échelonnent entre 6,1 % et 10 % pour la fraction 0,063/4 mm et entre 5,8 % et 9,7 % pour la fraction 0/4 mm, montrant que la méthode normalisée ne permet pas une mesure acceptable de l'absorption d'eau.

Compte tenu de ces résultats, d'autres méthodes expérimentales ont été appliquées pour mesurer l'absorption d'eau des sables de GBR.

[Laneyrie *et al.*, 2014] ont proposé une méthode basée sur la filtration sous vide du sable préalablement saturé afin d'atteindre l'état SSS. Cette méthode permet d'éviter la perte des très fines particules qui peut se produire lorsque le sable de GBR est séché sous flux d'air chaud. Les valeurs de Ab_{24} obtenues sont 11,2 % pour la fraction 0,063/4 mm et 12,8 % pour la fraction 0/4 mm (contre 7,8 % avec la méthode EN 1097-6) avec une dispersion des résultats plus faible que celle obtenue avec la méthode normalisée. Les auteurs ont aussi étudié la cinétique d'absorption d'eau du même sable de GBR. Ils ont noté que l'absorption était presque complète après 10 minutes d'immersion dans l'eau.

[Le, 2015] a appliqué la « méthode par évaporométrie » développée par [Mechling *et al.*, 2003] à la mesure de Ab_{24} du sable de GBR. Cette méthode est basée sur la modification de la cinétique de séchage d'un lit granulaire, soumis à une température donnée, qui se produit lorsque l'eau absorbée commence à s'évaporer. La valeur de Ab_{24} obtenue est de 10,8 % pour la fraction 0/4 mm et 10 % pour la fraction de 0,063/4 mm. Cette dernière valeur est proche de celle obtenue avec la méthode IFSTTAR [IFSTTAR n° 78, 2011], qui était de 10,6 % pour la fraction 0/4 mm. Rappelons que la méthode IFSTTAR a été développée pour la mesure de Ab des sables broyés. Ici, l'état SSS est obtenu en séchant successivement le sable saturé sur des feuilles de papier absorbant, jusqu'à ce qu'aucune trace d'humidité ne soit visible.

[Zhao *et al.*, 2013] ont étudié l'absorption d'eau des sables de GBR en fonction de leur granulométrie selon deux méthodes expérimentales différentes : la

norme EN 1097-6 et la méthode IFSTTAR n° 78. Ils montrent que pour les grains de taille inférieure à 0,63 mm, la méthode EN 1097-6 a tendance à sous-estimer Ab, alors que la méthode IFSTTAR a tendance à surestimer Ab. Toutefois, pour les grains plus gros, les deux méthodes donnent les mêmes résultats, ce qui prouve que ces deux protocoles sont valides pour identifier avec précision l'état SSS des gravillons de GBR. À partir de la fraction soluble dans l'acide salicylique (FSAS), ils ont proposé une autre méthode pour mesurer Ab des GBR fins. En supposant que les propriétés physiques de la pâte de ciment adhérente (PCD) et des granulats naturels (GN) soient les mêmes pour toutes les classes granulaires du GBR, l'absorption Ab du GBR peut alors être décrite par l'équation 3.3 pour chaque classe granulaire composant le GBR.

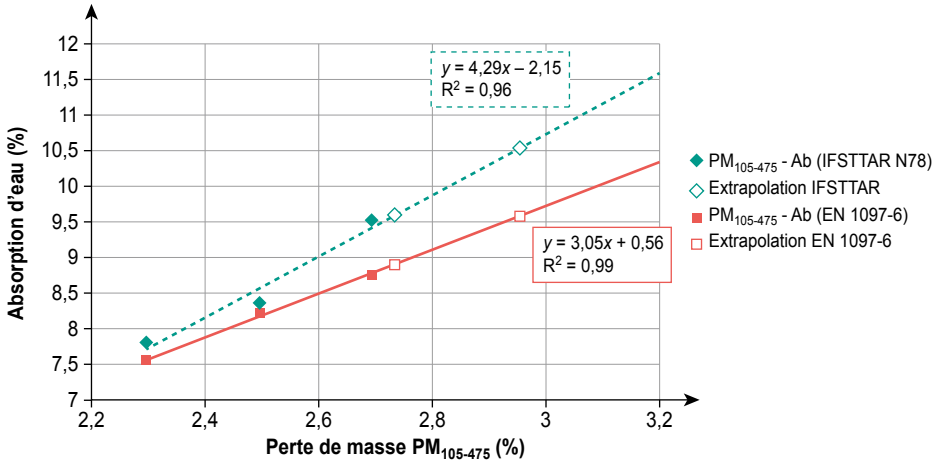
$$Ab_{GBR} = Ab_{PCD} \times PCD + Ab_{GN} \times (1 - PCD) \quad (3.3)$$

où Ab_{GBR}, Ab_{PCD} et Ab_{GN} sont respectivement, pour une classe granulaire donnée, les coefficients d'absorption d'eau du GBR, de la PCD adhérente et du GN, et « PCD » la teneur en pâte de ciment durci adhérente dans la classe granulaire considérée. Comme décrit au paragraphe 3.2.2.2, la valeur absolue de la teneur en PCD est généralement inconnue. Cependant, l'équation 3.3 montre que Ab_{GBR} doit varier linéairement en fonction de toute grandeur qui serait proportionnelle à la teneur en PCD. Par conséquent, il existe une relation linéaire entre le coefficient Ab et la FSAS, ou encore la perte de masse entre 105 et 475 °C ($PM_{105\text{-}475}$).

[Le *et al.*, 2016] ont appliqué cette méthode pour la mesure de Ab_{24} du sable de GBR du Projet National RECYBETON. Ils ont séparé le sable en cinq classes granulaires : 0/0,5 mm ; 0,5/0,8 mm ; 0,8/1,6 mm ; 1,6/2,5 mm ; 2,5/4 mm. La perte de masse $PM_{105\text{-}475}$ a alors été mesurée pour chaque classe granulaire

Figure 3.6

Variation de Ab_{24} mesurée selon EN 1097-6 et la méthode IFSTTAR en fonction de la $PM_{105\text{-}475}$ et extrapolation pour l'identification de Ab_{24} des fractions les plus fines



et Ab_{24} a été mesurée selon la norme EN 1097-6 et la méthode IFSTTAR n° 78 sur les trois fractions les plus grosses (0,8/1,6 mm ; 1,6/2,5 mm ; 2,5/4 mm). La relation linéaire trouvée entre Ab_{24} et $PM_{105\text{-}475}$ a ensuite permis d'identifier Ab_{24} des deux fractions fines à partir de leur $PM_{105\text{-}475}$ (Figure 3.6). Connaissant le pourcentage massique de chaque classe granulaire dans le sable GBR 0/4, le coefficient d'absorption d'eau du sable entier a alors été calculé. Les auteurs ont trouvé 8,7 % et 9,1 %, en extrapolant respectivement les valeurs de Ab_{24} obtenues selon EN 1097-6 et la méthode IFSTTAR.

Parmi toutes ces méthodes, celle proposée par [Zhao *et al.*, 2013] et [Le *et al.*, 2016] semble être la plus précise. En effet, en fractionnant le sable recyclé en quatre ou cinq classes granulaires et en mesurant, pour chaque classe, la perte de masse entre 105 °C et 475 °C, l'approche tient compte de la variation de teneur en PCD en fonction de la taille des grains. En outre, avec cette méthode, le coefficient Ab est déterminé uniquement pour les fractions granulaires grenues, pour lesquelles Ab peut être mesurée avec précision.

3.4. Propriétés mécaniques des GBR

3.4.1. État de l'Art

3.4.1.1. Résistance aux chocs et à l'abrasion

L'essai Los Angeles (LA) est le plus souvent retenu pour déterminer la résistance aux chocs et à l'abrasion des divers gravillons recyclés. En effet, les articles scientifiques qui relient la valeur de LA aux caractéristiques des granulats recyclés sont environ 3 fois plus nombreux que ceux utilisant l'indice de résistance à l'écrasement (IRC), 4 fois pour la fragmentation dynamique (FD) et 6 fois pour l'essai Micro-Deval (MDE). Les proportions sont très similaires pour les granulats de béton recyclé (GBR).

Les recommandations de la norme européenne [NF EN 206/CN, 2014] pour désigner la catégorie de résistance à la fragmentation des gravillons recyclés pour une utilisation dans le béton sont basées sur le coefficient Los Angeles (LA), réalisé selon la norme [NF EN 1097-2, 2010] des gravillons naturels. En général, la valeur du coefficient Los Angeles mesurée sur les matériaux de construction recyclés est comprise entre 20 et 40. Elle est donc légèrement supérieure aux valeurs typiques des granulats naturels. C'est la teneur en mortier des GBR qui explique cette différence [Zega *et al.*, 2010]. Il a été également remarqué que les deux types de granulats, naturel et de GBR, présentent une augmentation presque identique de leur LA lorsque leur masse volumique diminue, avec un taux de variation très proche [Mueller, 2014].

Pour les granulats recyclés, le coefficient LA augmente avec la proportion d'éléments de maçonnerie [Barbudo *et al.*, 2012 ; Cameron *et al.*, 2012], de mortier [Barbudo *et al.*, 2012] et avec la teneur en mortier dans les grains de béton concassé [de Juan et Gutierrez, 2009]. La qualité du béton concassé

a aussi un impact important sur la valeur de LA. À cet égard, [de Juan et Gutierrez, 2009] signalent une corrélation entre la résistance du béton d'origine et le coefficient LA des GBR obtenus, alors que la proportionnalité entre la résistance du béton d'origine et la teneur en mortier des grains de GBR n'est pas évidente ou avérée.

Ainsi, la relation entre LA et teneur en mortier des GBR peut être due à des effets contradictoires. Les bétons ayant une matrice plus faible conduisent à des GBR ayant une plus grande valeur de LA [Zega *et al.*, 2010 ; Tavakoli et Soroushian, 1996a]. Néanmoins, avec un procédé de concassage et une taille de granulat naturel similaires, les GBR produits à partir du béton le plus résistant contiennent une quantité relativement plus élevée de mortier [Belin *et al.* 2014], mais l'adhérence du mortier au granulat naturel est meilleure [Akbarnezhad *et al.*, 2013].

D'une manière générale, l'essai LA ne donne pas une description exacte de la résistance de l'échantillon à la fragmentation, car les éléments fins générés par les chocs et l'abrasion sont conservés dans l'échantillon, ce qui surestime inévitablement le degré de fragmentation (la valeur de LA). En testant des granulats naturels, [Bach, 2013] remarque que pour certains types de roches, le processus de fragmentation n'est pas encore achevé à la fin de l'essai, alors que pour d'autres, il se stabilise dès un faible nombre de rotations du cylindre. [Erichsen *et al.*, 2011] montrent que, durant l'essai, le granulat passe par deux étapes de fragmentation. La première se produit pendant la phase initiale et se caractérise par une dégradation générant des particules de tailles intermédiaires (inférieures à D mais supérieures à d, d/D étant la classe soumise à l'essai LA). La production de particules fines est concomitante et s'opère à vitesse constante. La deuxième étape concerne seulement les grains de faible résistance mécanique et elle n'est initiée que si la dégradation de la classe intermédiaire est optimale. La production de fines particules est alors dominante. On peut considérer que ces mécanismes se produisent aussi avec les GBR. Pour étudier ce phénomène, [Erichsen *et al.*, 2011] proposent de mesurer à la fois la valeur de LA et la valeur résiduelle de LA (granulats qui restent dans la même classe granulaire après essai), plutôt que de suivre l'évolution de la granulométrie en fonction du nombre de rotations du cylindre.

Même si les différents essais impliquent des mécanismes de rupture différents, les valeurs d'abrasion obtenues pour les GBR sont généralement assez bien corrélées : voir par exemple [Butler *et al.*, 2012] pour la corrélation entre l'indice de résistance à l'écrasement (IRC) et MDE, ou [Dhir et Paine, 2007] pour la corrélation entre LA et MDE. La corrélation entre LA ou MDE et la fragmentation dynamique FD est toutefois moins probante. Par conséquent, les comportements présentés ci-dessus pour LA peuvent également être étendus à MDE ou à IRC. Par exemple, l'IRC est plus élevé pour les granulats recyclés que pour les granulats naturels [Wang *et al.*, 2011] ; pour les granulats recyclés, FD augmente lorsque la résistance du béton d'origine diminue [Padmini *et al.*, 2009 ; Liu *et al.*, 2016 ; Wang *et al.*, 2011].

3.4.1.2. Modèles pour la prédiction de la résistance à la compression du béton

Les modèles usuels de résistance à la compression décrivent le béton comme un matériau biphasique, c'est-à-dire une inclusion inorganique rigide (le granulat) dispersée dans une matrice (la pâte de ciment) considérée homogène à l'échelle mésoscopique. La pâte de ciment est généralement la partie la plus faible du composite et les lois classiques, comme la loi de Féret, définissent la résistance à la compression par le produit d'une constante, qui dépend de la nature du granulat, et d'une fonction qui dépend de la composition de la pâte de ciment :

$$fc_{28} = K_g fcm_{28} \frac{1}{\left[\frac{\rho_c}{\rho_e}\left(\frac{E + \rho_e V_a}{C}\right)\right]^2} \quad (3.4)$$

– K_g : constante granulaire de Féret : $4,5 < K_g < 5,5$ pour les granulats naturels ;
– fc_{28} : résistance à la compression du béton à 28 jours ;
– fcm_{28} : classe vraie (ISO) du ciment à 28 jours ;
– ρ_c et ρ_e la masse volumique du ciment et de l'eau ;
– E et C la masse d'eau et de ciment (kg) pour un mètre cube de béton ;
– Va le volume d'air pour un mètre cube de béton.

[de Larrard, 1999] propose une modification de la Loi de Féret pour tenir compte de l'influence de l'épaisseur maximale de pâte dans le béton « EMP » (exprimée en mm) sur la diminution de la résistance à la compression :

$$fc_{28} = K_g fcm_{28} \frac{1}{\left[\frac{\rho_c}{\rho_e}\left(\frac{E + \rho_e V_a}{C}\right)\right]^2} (EMP)^{-0,13} \quad (3.5)$$

L'épaisseur maximale de pâte est donnée par la relation 3.6 :

$$EMP = D_{max} \sqrt[3]{\left(\frac{g^*}{g}\right)} - 1 \quad (3.6)$$

– D_{max} : le diamètre maximal du gravillon ;
– g : la fraction volumique du sable et des gravillons dans le béton ;
– g* : la compacité du squelette granulaire (sable et gravillons) pour un indice de serrage égal à 9.

Les lois classiques ne prennent pas en compte l'effet plafond de certains granulats, comme par exemple les calcaires pour lesquels, dans le domaine des hautes résistances de pâte, la résistance du béton n'est plus strictement proportionnelle à la résistance de la matrice.

[de Larrard, 1999] propose alors une relation hyperbolique empirique pour modéliser cette non-linéarité :

$$fc_{28} = \frac{p\, fcm_{28}}{(q\, fcm_{28} + 1)} \tag{3.7}$$

– fc_{28} : la résistance à la compression du béton à 28 jours en MPa ;
– fcm_{28} : la résistance à la compression de la matrice à 28 jours en MPa ;
– p, une constante empirique ;
– q, une constante empirique MPa^{-1}.

La résistance à la compression de la matrice est calculée selon la relation (3.8) :

$$fcm_{28} = 13{,}4 Rc_{28} \left[\frac{v_c}{v_c + v_e + v_a} \right]^{2{,}85} (EMP)^{-0{,}13} \tag{3.8}$$

où V_c, V_e, et V_a sont respectivement le volume de ciment, d'eau et d'air dans la matrice. Rc_{28} est la résistance du ciment (classe vraie).

Pour les matrices de faible résistance, l'équation (3.7) peut être approchée par la relation (3.9). Le paramètre « p » apparaît comme un paramètre qui décrit la qualité de la liaison entre la pâte de ciment et le granulat :

$$fc_{28} = p fcm_{28} \tag{3.9}$$

Pour les matrices de très haute résistance, la résistance du béton tend à une valeur asymptotique égale au rapport des deux paramètres p et q (3.10).

$$\lim_{fcm_{28} \to \infty} \qquad fc_{28} \to \frac{p}{q} \tag{3.10}$$

Le Tableau 3.15 reprend les valeurs de p et q pour des granulats issus de plusieurs types de roches [de Larrard, 1999]. Les valeurs élevées de p, supérieures à 1, sont caractéristiques des granulats calcaires connus pour avoir une excellente liaison avec la pâte de ciment. Les granulats avec de faibles valeurs de p ne présentent pas d'effet plafond et les bétons fabriqués avec ces granulats présentent à 28 jours des grains décollés dans l'essai de fendage.

L'approche simplifiée (relations 3.3 et 3.6) et l'approche complète (relations 3.7 à 3.10) ont été appliquées avec succès par [Dao, 2012] à des bétons recyclés ayant des résistances à 28 jours de 35 et 65 MPa respectivement. Des sables et gravillons de GBR ont été utilisés. Ces granulats recyclés ont été obtenus par concassage de bétons « neufs » dont la composition était connue. Avec l'approche simplifiée, l'erreur moyenne du modèle est de 3,5 MPa si K_g est extrapolée expérimentalement, et de 5 MPa si K_g est déduite de la relation entre K_g et la résistance à l'abrasion des granulats mesurée par l'essai Micro-Deval (voir paragraphe 3.4.2.1 et la relation 3.11).

Tableau 3.15

Caractéristiques mécaniques des granulats naturels

Type	Origine	p	p/q (MPa)	fc* (MPa)	% de grains décollés**
Calcaire dur concassé	Boulonnais	1,11	337	160	0
Calcaire mi-dur concassé	Arlaut	0,96	241	111	0
Basalte concassé	Raon-l'Etape	0,65	∞	250	14
quartzite	Cherbourg	1,15	244	–	0
Silex roulé	Crotoy	0,58	∞	285	13

* résistance de la roche.
** % des grains décollés à 28 jours après essai de fendage.

$$K_g = -0{,}0952\,MDE + 8{,}3927 \text{ (MDE : Micro Deval en \%)} \quad (3.11)$$

L'approche complète donne une meilleure précision avec une erreur moyenne de 2,1 MPa. Le Tableau 3.16 fournit des valeurs de p et q pour des granulats recyclés d'origines différentes [Dao, 2012].

Tableau 3.16

Caractéristiques mécaniques des granulats recyclés selon [Dao, 2012]

		Sable		Mélange sable/ gravillon	
Classe du béton d'origine	**Granulat d'origine**	**p**	**p/q (MPa)**	**p**	**p/q (MPa)**
C35	Siliceux roulé	1,08	135	1,64	109
C65	Siliceux roulé	1,06	177	1,88	125
C35	Calcaire semi-dur concassé	1,07	178	1,13	226
C65	Calcaire semi-dur concassé	1,36	151	1,83	141

Les granulats recyclés ont des valeurs élevées de p (supérieures à 1), caractéristiques des granulats qui développent une excellente liaison avec la pâte de ciment, comme les granulats calcaires (voir Tableau 3.15). Ils présentent en revanche des rapports « p/q » plus faibles que les granulats naturels (voir Tableau 3.15). Ils ont donc un « effet plafond » conséquent qui peut limiter la résistance d'un béton recyclé ayant une pâte performante, i.e. avec un faible rapport eau/ciment. Pour les granulats naturels, le rapport « p/q » décroît avec la résistance à la compression de la roche mère [de Larrard, 1999] ; pour les granulats recyclés, aucune relation claire n'a été trouvée entre le rapport « p/q » et la résistance en compression du béton d'origine [Dao, 2012].

3.4.2. Résultats RECYBETON

3.4.2.1. Résistance aux chocs et à l'abrasion

Différentes classes de GBR (4/6, 6/10, 10/14 et 14/20) ont été soumises à l'essai Los Angeles, ainsi qu'un granulat concassé siliceux naturel (10/14) pris comme granulat de référence (Figure 3.7). Il faut rappeler que le nombre normalisé de rotations du cylindre est de 500 tours. Dans cette étude, pour évaluer la linéarité du comportement avec le nombre de tours, ce dernier a été varié entre 20 et 6 000.

Pour le granulat naturel, la linéarité entre la quantité de fines générées (passant à 1,6 mm) avec le nombre de tours est gardée jusqu'à 2000 tours. Le comportement est différent pour les diverses fractions de GBR. En effet, le taux de particules fines générées n'est pas linéaire. Jusqu'à 500 ou 750 tours, il est significativement plus élevé que pour les granulats naturels. Au-delà de 1 000 tours, le taux devient comparable à celui des granulats naturels. Par conséquent, on peut considérer que le mortier adhérent a été le premier à se fragmenter sous les impacts des boulets métalliques. Lorsque la teneur en mortier adhérent a diminué, le comportement des GBR devient alors comparable à celui du granulat naturel d'origine.

Cette conclusion est mieux démontrée avec les mesures d'absorption d'eau pratiquées sur les GBR ayant subi des nombres de tours différents dans la machine Los Angeles (Figure 3.8). Les essais ont été réalisés sur les grains qui sont restés à leur taille initiale après l'essai. Les résultats montrent que la capacité d'absorption d'eau diminue considérablement dès les premiers tours

Figure 3.7

Passant au tamis de 1,6 mm pour un nombre différent de rotations dans le cylindre de la machine Los Angeles, pour un granulat naturel et un GBR de différentes tailles

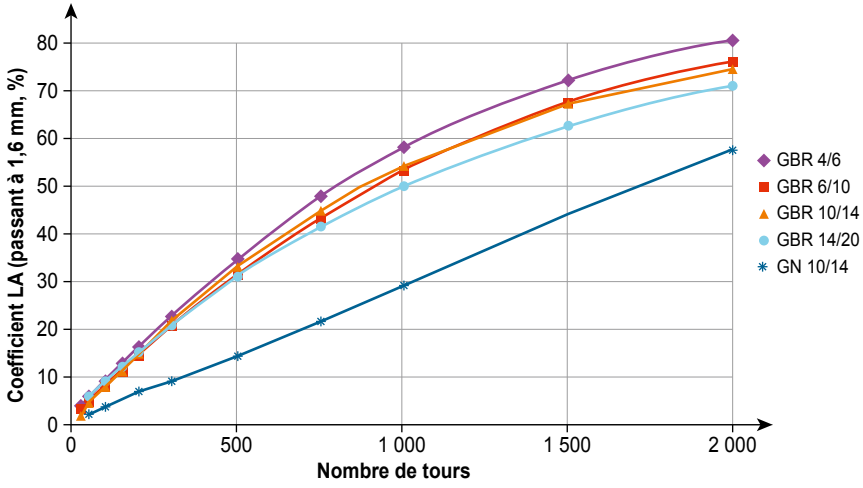
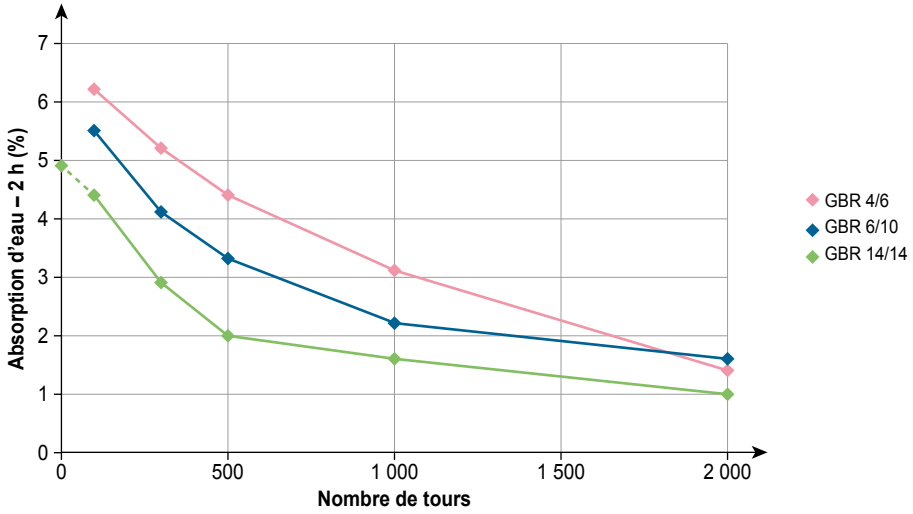


Figure 3.8
Absorption d'eau mesurée après 2 heures d'immersion dans l'eau, pour les granulats testés dans la machine Los Angeles après un nombre différent de tours de cylindre

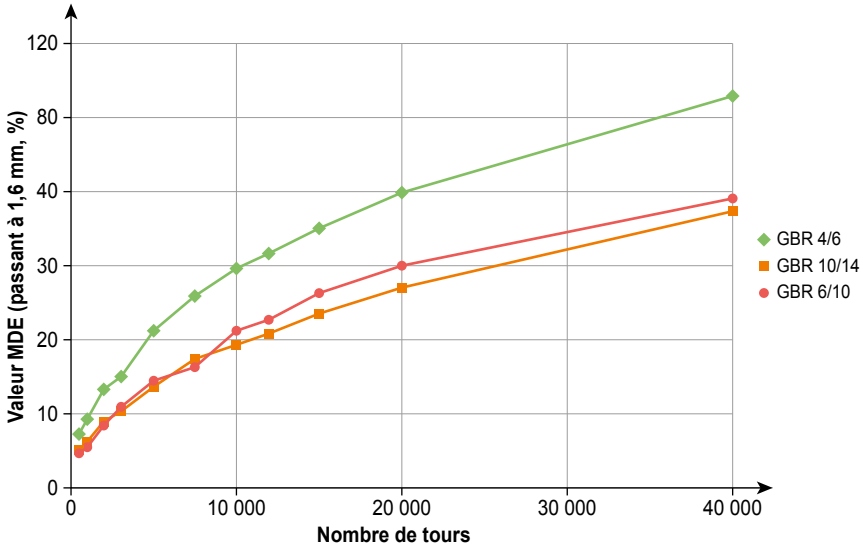


et qu'elle a ensuite tendance à se stabiliser à une valeur supérieure, mais proche de celle du granulat naturel d'origine. Ces résultats suggèrent que la majeure partie du mortier adhérent est séparée dès les premiers tours dans la machine Los Angeles, mais aussi qu'il s'agit surtout des éléments les plus fragiles. On peut alors supposer qu'après 500 tours, le mortier le plus dur reste encore attaché au granulat d'origine, et qu'il affecte toujours l'absorption d'eau, mais que sa résistance est suffisante pour encaisser les contraintes imposées par l'essai Los Angeles. Il faut rappeler que la capacité d'absorption d'eau d'un GBR est très sensible à la taille de ses grains, en raison essentiellement de leurs teneurs initiales différentes en mortier adhérent. C'est beaucoup moins le cas pour le comportement à la fragmentation. La création de fines est plus élevée pour les petites coupures, mais les différences entre classes sont du second ordre par rapport à la différence de LA entre GBR et GN.

Comme montré par [Artoni *et al.*, 2017], qui ont analysé les mêmes données, l'essai Los Angeles fournit aussi des informations sur les mécanismes de clivage. Afin d'observer le comportement à l'attrition, des essais MDE ont aussi été effectués avec trois tailles de GBR. Le nombre normalisé de rotations de la jarre pour l'essai MDE est de 10 000 mais, comme pour l'essai Los Angeles, un nombre différent de rotations a été testé (Figure 3.9). Chaque point expérimental correspond à un échantillon différent. La reproduction des essais a montré une très bonne répétabilité, du même ordre de grandeur que la différence de valeurs entre GBR 6/10 et 10/14. En effet, le comportement observé pour ces deux tailles était très proche, voire identique, ce qui n'est pas le cas pour la fraction 4/6 plus petite. On peut alors supposer que les

Figure 3.9

Passant au tamis de 1,6 mm pour un nombre différent de rotations du cylindre lors de l'essai MDE pour un GBR de 3 tailles différentes



billes métalliques du MDE provoquent : i) l'abrasion préférentielle des grains de tailles similaires aux billes (10 mm) ; ii) un mécanisme de clivage pour les grains plus petits, comme ici ceux de la classe 4/6.

En croisant les informations issues des essais Los Angeles et MDE, on peut conclure que la fragmentation en surface (attrition) des GBR est indépendante de la taille des grains, alors que le départ de gros fragments des grains (clivage) est plus prononcé pour les plus petites classes.

3.4.2.2. Application des modèles pour évaluer les propriétés mécaniques des GBR

Les paramètres p et p/q ont été caractérisés pour le sable recyclé du Projet National RECYBETON. Les valeurs obtenues sont respectivement 1,3 pour p et 100 pour p/q [Le *et al.*, 2017]. Ces résultats sont conformes à ceux des études antérieures (voir Tableau 3.17). Les analyses microstructurales (voir chapitre 9 : microstructure des granulats de béton recyclé) confirment l'excellente continuité entre ancienne et nouvelle pâte de ciment après 28 jours de durcissement, pour des mortiers réalisés avec des sables de GBR secs [Le *et al.*, 2017]. Enfin, la valeur élevée de « p » et la valeur faible de « p/q » expliquent pourquoi la substitution des granulats naturels par des GBR peut améliorer la résistance au niveau des faibles classes de performances, et la réduire au niveau des hautes classes de performances.

3.5. Besoins de recherche

Les résultats du Projet National RECYBETON présentés ici ont confirmé que les GBR possèdent des coefficients d'absorption d'eau élevés qui peuvent conduire à une estimation erronée du rapport eau efficace/ciment dans le béton. Ils ont également montré que les méthodes normalisées pouvaient être utilisées pour caractériser les gravillons de GBR avec une précision satisfaisante, et que des méthodes modifiées, telles que celles proposées dans ce chapitre, devaient être développées pour avoir une meilleure évaluation des propriétés des sables de GBR. Ces méthodes doivent permettre une bonne estimation de l'absorption d'eau à 24 h des granulats. Cependant, l'absorption d'eau à 24 h mesurée en laboratoire diffère sensiblement de l'absorption qui se produit lors du malaxage du béton frais, lorsque les GBR partiellement saturés sont plongés dans la pâte de ciment fraîche. La cinétique et la quantité d'eau absorbée peuvent alors être différentes de celles mesurées avec les méthodes normalisées, et elles peuvent dépendre à la fois de l'état initial de saturation du GBR et des caractéristiques de la pâte de ciment fraîche. Ces différences peuvent être ignorées pour les granulats naturels qui ont des coefficients d'absorption d'eau faibles, mais elles peuvent avoir des conséquences dommageables avec les GBR, étant donné leur valeur élevée de Ab. Une meilleure compréhension de la cinétique d'absorption d'eau des GBR et de l'influence respective de l'état de saturation initial et du milieu dans lequel s'effectue l'absorption d'eau sont encore nécessaires.

Concernant le contrôle du pourcentage de sable recyclé dans un mélange avec du sable naturel, l'amélioration de la méthode de mesure des sulfates solubles permettrait d'obtenir un résultat plus précis et plus rapide. Le suivi de la teneur en sulfates solubles dans les granulats recyclés et dans leur mélange permettrait également un meilleur contrôle de la qualité des GBR.

3.6. Conclusion

Les principales propriétés chimiques, physiques et mécaniques des GBR ont été mesurées avec différentes techniques dans le cadre du Projet National RECYBETON.

Les résultats montrent que la teneur en PCD adhérente des GBR dépend des propriétés du béton d'origine, du procédé de concassage et de la classe granulaire produite : plus les grains sont gros, moins il y a de PCD adhérente. De nouvelles méthodes pour l'estimation de la teneur en PCD adhérente ont été proposées, à partir de la mesure de paramètres indirects proportionnels à la teneur en pâte de ciment (fraction soluble dans l'acide salicylique ou perte de masse entre 105 °C et 475 °C).

Les propriétés physiques comme la masse volumique réelle et l'absorption d'eau ont été mesurées sur les sables et gravillons GBR avec les protocoles expérimentaux normalisés ou d'autres non normalisés. La précision des méthodes dépend beaucoup de la taille des grains. Pour les gravillons de GBR, la répétabilité et la reproductibilité obtenues montrent que les méthodes normalisées donnent des résultats satisfaisants pour la masse volumique réelle et l'absorption d'eau. La cinétique d'absorption a également été étudiée pour ces matériaux et les résultats montrent que la majeure partie de l'absorption (92 %) est atteinte après 24 heures d'immersion, ce qui indique que Ab_{24} donne une bonne estimation de la quantité totale d'eau absorbée à long terme. Toutefois, utiliser Ab_{24} pour le calcul de l'eau absorbée dans le béton peut conduire à une surestimation de l'eau présente dans le mélange frais. Pour les sables de GBR, les protocoles normalisés donnent une mesure satisfaisante de la masse volumique réelle. Toutefois, l'absorption d'eau n'est pas déterminée avec précision. De nouvelles méthodes, comme celle fondée sur une corrélation entre teneur en PCD adhérente et absorption d'eau, doivent être développée afin de mieux caractériser l'absorption d'eau des sables de GBR.

Les propriétés mécaniques des sables et gravillons de GBR ont également été évaluées afin de pouvoir appliquer les modèles de la littérature pour la prédiction de la résistance à la compression des mortiers et des bétons. Ces études montrent que les GBR présentent un effet plafond important, qui peut limiter la résistance à la compression du composite lorsqu'il contient une pâte de ciment performante. Au contraire, les GBR ont une très bonne adhérence avec la nouvelle pâte de ciment.

Les essais Los Angeles effectués sur les gravillons de GBR montrent, contrairement aux granulats naturels, que le taux de fines générées en fonction du nombre de tours du cylindre n'est pas linéaire. Le mortier adhérent est le premier à être fragmenté, ce qui conduit à une augmentation drastique du coefficient LA au début de l'essai (premiers tours). Le coefficient LA après 2000 tours tend vers celui du GN source, mais reste toutefois légèrement supérieur. La comparaison entre les résultats LA et MDE montre que la fragmentation des grains de GBR en surface (attrition) ne dépend pas de la taille des grains, et que les plus petites fractions génèrent préférentiellement des fragments plus grossiers (clivage).

Les essais « granulats » dédiés à l'évaluation du risque de réaction alcali-silice sont présentés au chapitre 12 (propriétés liées à la durabilité).

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