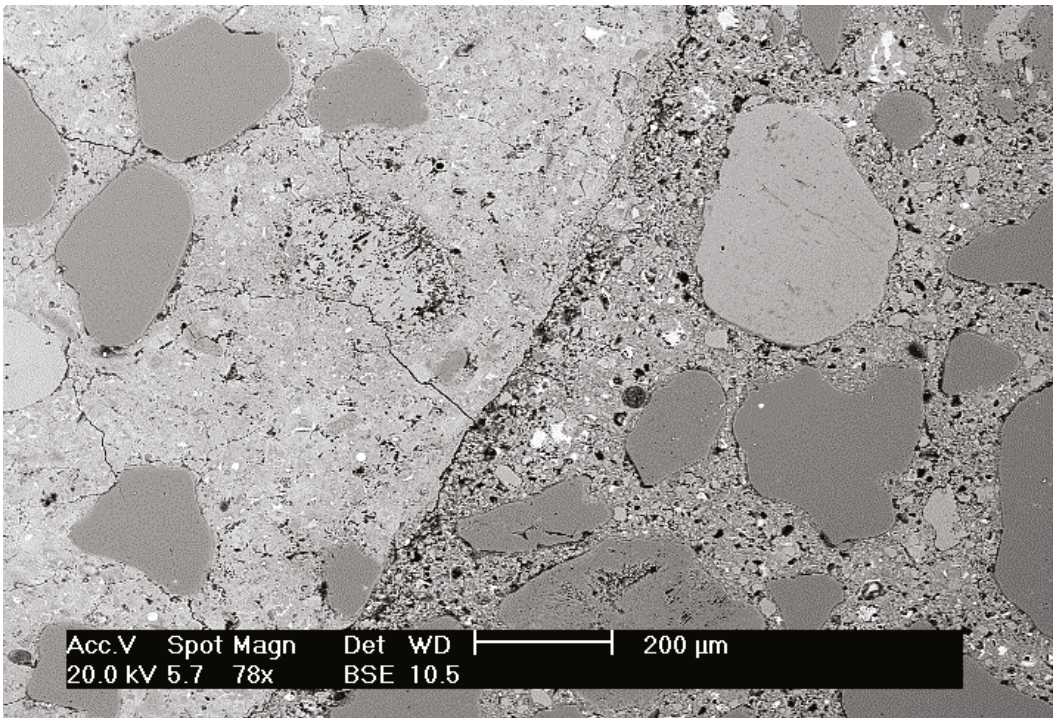


Le béton recyclé



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



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



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/>

Remerciements

Les coordinateurs de l'ouvrage remercient chaleureusement :

- le Ministère de la Transition écologique et solidaire, Direction de la recherche et de l'innovation (DRI), pour son soutien financier au Projet National RECYBETON ;
- l'Agence nationale de la recherche (ANR), pour le financement du projet ECOREB dans le cadre duquel un certain nombre de travaux liés au Projet National RECYBETON ont été réalisés ;
- l'Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (IREX), pour sa gestion administrative et financière du Projet National RECYBETON (avec une mention particulière pour Brice Delaporte) ;
- tous les participants au Projet National RECYBETON, dont notamment les maîtres d'ouvrage des cinq chantiers expérimentaux qui ont accepté de réaliser une partie de leur construction avec du béton recyclé, contribuant ainsi au progrès de la construction durable ;
- les membres du Comité éditorial et tous les co-auteurs de ce livre. Grâce à leur compétence, leur bonne volonté et leur travail acharné, un effort collectif important a pu être accompli formalisant l'ensemble des connaissances acquises durant les six années de ce projet consacré au recyclage du béton dans le béton ;
- nos experts (François Toutlemonde de l'IFSTTAR, Fekri Meftah de l'INSA de Rennes et Jacques Roudier de l'IREX), qui ont aidé à améliorer la qualité de certains chapitres ;
- le professeur André Lecomte, pour la grande qualité de sa traduction, tant d'un point de vue littéraire que scientifique, réalisée en un temps record ;
- et enfin l'IFSTTAR et son pôle d'édition (Corinne Brusque et Hafifa Hannachi), qui permettra par son implication une large diffusion des travaux de RECYBETON dans le monde francophone.

Sommaire

Remerciements.....	3
Préface.....	9
Comité éditorial.....	11
Introduction.....	13

Partie 1. Granulats de béton recyclé

Chapitre 1. Techniques et matériaux de démolition.....	21
Chapitre 2. Élaboration des granulats de béton recyclé.....	31
Chapitre 3. Caractérisation des granulats de béton recyclé.....	57

Partie 2. Liants incorporant des granulats de béton recyclé

Chapitre 4. Béton recyclé utilisé comme matière première alternative pour la fabrication du clinker portland.....	95
Chapitre 5. Béton recyclé utilisé comme constituant du ciment ou comme ajout cimentaire au béton.....	119

Partie 3. Le béton recyclé, de la fabrication au durcissement

Chapitre 6. Fabrication du béton recyclé.....	139
Chapitre 7. Effet des granulats de béton recyclé sur les propriétés du béton frais.....	153
Chapitre 8. Béton recycle au jeune âge.....	173

Partie 4. Propriétés du béton recyclé durci

Chapitre 9. Microstructure du béton recyclé.....	193
Chapitre 10. Propriétés mécaniques instantanées.....	211
Chapitre 11. Propriétés mécaniques différées.....	241
Chapitre 12. Propriétés liées à la durabilité.....	273
Chapitre 13. Comportement au feu.....	323

Partie 5. Formulation du béton recyclé

Chapitre 14. Spécifications des bétons de GBR	341
Chapitre 15. Adaptation des méthodes de formulation au béton de granulats recyclés	359
Chapitre 16. Développement, production et contrôle de bétons recyclés à taux élevé de substitution	379

Partie 6. Béton recyclé armé

Chapitre 17. Adhérence entre armatures et bétons de GBR	395
Chapitre 18. Pièces comprimées. a) Poteaux faiblement élancés	411
Chapitre 19. Pièces comprimées. b) Poteaux élancées	425
Chapitre 20. Poutres soumises à la flexion	435
Chapitre 21. Poutres soumises à l'effort tranchant	459

Partie 7. Chantiers expérimentaux

Chapitre 22. Dallage sur terre-plein : Chaponost	477
Chapitre 23. Ouvrage d'art : contournement ferroviaire de Nîmes-Montpellier	495
Chapitre 24. Bâtiment pour archives administratives : CD 77	509
Chapitre 25. Applications industrielles : murs et trottoirs	523
Chapitre 26. Immeuble de bureaux : dalle intérieure	535
Chapitre 27. Recyclage dans l'industrie des produits préfabriqués en béton	543
Chapitre 28. Contrôle qualité dans le contexte français	551

Partie 8. Impact environnemental du recyclage du béton

Chapitre 29. Disponibilité et variabilité des granulats recyclés en France ...	571
Chapitre 30. Analyse du cycle de vie du béton de GBR	601
Chapitre 31. Lixiviation des granulats et des bétons recyclés	633
Chapitre 32. Vers le multi-recyclage	647
Chapitre 33. Discussion : conditions d'un recyclage réussi	661

Partie 9. Mise en application du recyclage du béton

Chapitre 34. Normes.....	685
Chapitre 35. Pratiques nationales : règlements, obstacles et mesures incitatives	703
Conclusion	723
Bibliographie.....	727
Annexes.....	781
Fiche bibliographique	790
Publication data form.....	791



Préface

L'ouvrage intitulé « Le béton recyclé » présente la synthèse des travaux menés, entre 2012 et 2018, au sein du Projet National RECYBETON, programme collaboratif de recherche qui a associé des maîtres d'ouvrage, des entreprises de construction, des producteurs de matériaux, des ingénieries, des assureurs et, bien sûr, des organismes de recherche. RECYBETON a bénéficié du soutien du Ministère de la transition écologique et solidaire et de l'Agence nationale de la recherche dans le cadre du projet ANR ECOREB (Eco-construction par le recyclage du béton).

L'objectif du projet était de fournir les fondements scientifiques pour répondre à la question suivante : « comment réutiliser des granulats obtenus par concassage de béton pour fabriquer du béton, avec des performances techniques, économiques et environnementales satisfaisantes ? »

Les meilleures équipes ont été mobilisées pour développer des approches pluridisciplinaires dans des travaux de laboratoire et de modélisation, complétés par la réalisation de cinq chantiers expérimentaux.

Le projet RECYBETON a donné lieu à la production de plus de quarante rapports de recherche, la plupart accessibles publiquement, ainsi qu'à de nombreux articles dans des revues scientifiques ou communications dans des conférences nationales et internationales.

Les auteurs du livre ont fait un effort important pour synthétiser l'ensemble de la production scientifique et technique du projet, comprenant des milliers de pages. Les différents sujets sont traités de manière autonome, ce qui signifie que chaque chapitre et sous-chapitre du livre peut être lu et compris indépendamment du reste du livre, tout en donnant des références aux autres chapitres pour une lecture plus approfondie et plus globale.

Tous les aspects techniques et environnementaux liés à l'utilisation de granulats de béton recyclé sont abordés, partant de l'évaluation et de la caractérisation de la ressource en bétons, principalement de démolition, jusqu'à la mise en œuvre des bétons fabriqués avec ces granulats de béton recyclé.

La première partie (chapitres 1 à 3) traite des techniques d'élaboration des granulats de béton recyclé, de leur influence sur la qualité des produits obtenus, de la caractérisation de ces matériaux ainsi que de leurs caractéristiques.

Le concassage du béton recyclé engendre des éléments de taille variable. L'utilisation de la partie fine – le sable – du concassage du béton pour d'autres utilisations que celle d'un granulats à béton fait l'objet de la deuxième partie (chapitres 4 et 5), dans laquelle trois usages sont envisagés, l'incorporation directe au cru cimentier, l'utilisation comme constituant outre que le clinker pour la fabrication de ciments ou comme addition au béton.

Les parties 3 à 5 (chapitres 6 à 16) constituent une partie importante de l'ouvrage. Elles traitent de l'ensemble des propriétés du béton comportant des

granulats de béton recyclé à différents moments, qu'il s'agisse du jeune âge, de l'état durcissant, ou de l'état durci, ainsi que de la question de la formulation.

Le comportement d'éléments structuraux en béton armé contenant des granulats de béton recyclé, comparé à celui d'éléments en bétons de granulats naturels, fait l'objet de développements importants dans la partie suivante (chapitres 17 à 21).

Le projet RECYBETON a également donné lieu à la mise en œuvre de cinq chantiers expérimentaux dont le type de réalisation, les caractéristiques et les résultats sont présentés dans la septième partie de cet ouvrage, qui contient également des réflexions sur les dispositions à prendre en matière de contrôle de la qualité (chapitres 22 à 28).

Une huitième partie (chapitres 29 à 33) est consacrée à l'évaluation détaillée de l'impact environnemental du recyclage de produits de démolition de béton dans du béton, avec à la fois des considérations méthodologiques et des estimations plus opérationnelles.

Les résultats obtenus dans le cadre du projet RECYBETON doivent permettre de faire évoluer les pratiques de recyclage des bétons et de développer leur emploi notamment dans la fabrication de nouveaux bétons. Ils fournissent la base scientifique pour constituer un état de l'art en la matière. Les adaptations à mettre en œuvre pour éliminer les obstacles que pourraient rencontrer les différents acteurs impliqués, des industriels aux utilisateurs, sont abordées dans la dernière partie (chapitres 34 et 35), dans le contexte français mais aussi européen.

Les objectifs du projet national RECYBETON étaient aussi opérationnels, afin de faire rentrer les avancées permises par les travaux présentés dans cet ouvrage, dans les pratiques professionnelles. À cette fin, ils ont aussi produit un document de « Recommandations pour le recyclage du béton concassé comme constituant du béton », qui montre notamment les possibilités d'utilisation de ces matériaux et les bonnes pratiques associées et qui explore des voies d'incitation nécessaires pour mettre en œuvre la boucle vertueuse du recyclage, que les seuls mécanismes du marché ne suffiront pas, au moins à court terme, à amorcer.

En approfondissant ces voies nouvelles dans leurs aspects théoriques et pratiques, dans leurs composantes techniques mais aussi environnementales, dans leurs dimensions scientifiques et opérationnelles, les acteurs de la filière, réunis dans le cadre d'un projet de recherche collaborative d'envergure, témoignent, une fois encore, de leur volonté de confirmer le béton comme matériau de construction performant, innovant et répondant aux enjeux contemporains.

Jacques Roudier
Président du PN RECYBETON
Président de l'IREX

Comité éditorial

Cet ouvrage est, pour l'essentiel, une traduction de « Concrete Recycling – Research & Practice », CRC Press, Taylor & Francis Group, Londres, 2019.

Ce dernier livre a été rédigé par des participants au Projet National RECYBETON, géré par l'association IREX, de 2012 à 2018. La coordination a été assurée par un comité éditorial dont la composition était la suivante :

- Dr François de Larrard, LafargeHolcim (rédacteur-en-chef)
- Dr Horacio Colina, ATILH (rédacteur-en-chef adjoint)
- Mme Sophie Decreuse, CEMEX (coordinatrice de la Partie I)
- Dr Laurent Izoret, ATILH (coordinateur de la Partie II)
- Pr. Éric Garcia-Diaz, IMT Mines Alès (coordinateur de la Partie III)
- Dr Patrick Rougeau, CERIB (coordinateur de la Partie IV)
- Dr Thierry Sedran, IFSTTAR (coordinateur de la Partie V, en charge de la préparation du manuscrit anglais)
- M. Bernard Fouré, Ingénieur Consultant (coordinateur de la Partie VI)
- M. Patrick Dantec, Ingénieur Consultant (coordinateur de la Partie VII)
- Dr Adélaïde Feraille, École des Ponts ParisTech (coordinatrice de la Partie VII)
- Dr Wilfried Pillard, EGF-BTP (coordinateur de la Partie IX)
- Pr. Elhem Ghorbel, Université de Cergy-Pontoise (représentante du projet ANR Ecoreb)

La traduction de l'anglais vers le français a été assurée par le Pr. André Lecomte, Institut Jean Lamour, Université de Lorraine, Nancy.



Introduction

François de Larrard, Directeur Scientifique du Projet National RECYBETON¹, Horacio Colina, Directeur du Projet National RECYBETON²

Le béton est le matériau de construction le plus important sur la planète, en termes de volume et de chiffre d'affaires. Son succès provient, entre autres raisons, de son extraordinaire polyvalence et de sa disponibilité pratiquement partout sur terre, en tant que matériau essentiellement local. Toutefois, en ce XXI^e siècle, l'Humanité se trouve confrontée à son défi le plus difficile de son histoire : comment conserver la viabilité de la planète pour les générations futures, avec une population approchant les dix milliards d'habitants et une pénurie croissante des ressources non renouvelables ? La plupart des citoyens éclairés défendent aujourd'hui la nécessité de passer d'une économie linéaire à une économie circulaire. Le béton ne peut échapper à ce changement de paradigme.

Le recyclage du béton dans le béton doit donc être développé, pour au moins quatre raisons principales :

- i) bien que les ressources minérales naturelles qui servent à produire le béton soient quasi-inépuisables – calcaire, argiles et roches dures – l'ouverture de nouvelles carrières à distance raisonnable des villes est devenue un réel défi dans de nombreux pays. En effet, dans la compétition pour l'utilisation des sols, entre terrains résidentiels, agricoles et industriels, la troisième catégorie perd souvent la bataille ;
- ii) la mise en décharge des Déchets de Construction et de Démolition (DCD) est de plus en plus prohibée par les politiques publiques, comme en Europe depuis le début du Millénaire (directives européennes 1999/31/CE et 2003/33/CE) ;
- iii) il existe une pression sociale pour réduire les distances de transport des matériaux depuis les sites de production jusqu'aux sites d'utilisation, afin de limiter les émissions de CO₂ et l'impact du trafic des camions sur la population. Comme les matériaux de démolition sont principalement générés dans les villes, là où de nouveaux chantiers de construction ont besoin d'être alimentés, l'utilisation de DCD dans une nouvelle construction a alors un double avantage, en réduisant à l'échelle de la zone urbaine les transports générés à la fois par l'évacuation et par l'approvisionnement des matériaux ;

1. LafargeHolcim R&D, Saint-Quentin Fallavier.

2. ATILH, Paris.

iv) enfin, le béton doit rattraper les autres matériaux (acier, enrobés bitumineux, etc.) pour lesquels les procédés et les circuits de recyclage existent depuis des années. Ce n'est pas ici l'endroit pour analyser le cycle de vie du béton recyclé en tant que matériau de construction, par rapport à d'autres solutions. Notons simplement que, même si la solution « béton » a de nombreux avantages, sa capacité à incorporer ses propres déchets constitue un aspect important selon la plupart des méthodes d'évaluation environnementale.

Quelles sont les données les plus significatives pour évaluer le potentiel de recyclage du béton ? À l'échelle européenne, 196 millions de tonnes de granulats de béton recyclé (GBR) ont été produites en 2015³ (la plupart à partir des DCD). Environ 40 % de la production totale de granulats naturels ont été consacrés soit au béton prêt à l'emploi, soit à la préfabrication, pour un marché qui représente de l'ordre d'un milliard de tonnes. C'est pourquoi, selon un simple calcul, il serait possible de substituer 20 % de la phase granulaire de tous les bétons produits annuellement par des GBR. Nous verrons plus loin que ce chiffre est une sous-estimation du potentiel réel, si l'on tient compte de tous les matériaux inertes provenant de la démolition (y compris les roches naturelles ou les matériaux granulaires issus des sous-couches de chaussées). En outre, garantir un pourcentage moyen de recyclage de 20 % dans le béton signifie être capable localement d'atteindre des taux beaucoup plus élevés, selon la géographie de la ressource. Bien qu'aucune statistique générale pour l'Europe n'ait été trouvée, concernant la part de granulats recyclés consommée dans l'industrie du béton, il a été établi que ce taux est d'environ 5 % au Royaume-Uni en 2008. Comme ce pays est le plus avancé à cet égard (devançant les Pays-Bas et la Belgique)¹, on peut en déduire que le taux pour toute l'Europe n'excède probablement pas 1 à 2 %. À comparer au potentiel de 20 %, on peut donc conclure que l'industrie européenne du béton pourrait recycler de manière substantielle, mais qu'elle ne le fait pas de manière significative pour l'instant.

Une grande partie des flux actuels de granulats de béton recyclé produits est consommée en remblais et en sous-couches de chaussées. Est-ce une situation satisfaisante ? Doit-on la considérer comme pleinement soutenable, actuellement et dans un avenir proche ? Nous ne le pensons pas, pour les raisons suivantes :

- le flux de granulats de béton recyclé augmentera probablement dans les prochaines années, car un grand nombre de bâtiments résidentiels et d'ouvrages construits dans les années 50 et 60 arrive en fin de vie (surtout en Europe). La nécessité de réduire la dépense énergétique globale dans les bâtiments mène à de vastes plans de rénovation, mais aussi de démolition/reconstruction, étant donné la difficulté d'apporter une isolation thermique aux bâtiments anciens ;

3. <http://www.uepg.eu>

- dans les mêmes pays, il y a de moins en moins de nouvelles routes à construire, mais plutôt des travaux d'entretien à réaliser. Au demeurant, ces travaux concernent les couches supérieures de la chaussée, qui ne nécessitent qu'une faible quantité de granulats naturels de bonne qualité. C'est pourquoi la ressource en granulats recyclés s'accroît alors que l'usage se rétrécit ;
- même si les GBR sont d'excellents matériaux pour construire les sous-couches routières, des matériaux moins nobles (mélanges de DCD, granulats naturels de médiocres catégories, mâchefer d'incinération d'ordures ménagères, déchets industriels non toxiques, etc.) peuvent aussi être utilisés aux mêmes fins. La réservation des GBR aux nouveaux bétons est donc un moyen de faire un meilleur usage de l'ensemble des ressources en déchets utilisées par les secteurs du génie civil et de la construction.

Il est donc nécessaire de réorienter le flux des GBR vers le béton, quel que soit le procédé de production. Pourquoi n'avons-nous pas encore vu apparaître spontanément cette tendance ? La communauté académique s'intéresse depuis longtemps au recyclage du béton, au travers par exemple des actions de la RILEM ; le groupe de travail TC 37-RDC (Recycling of Demolished Concrete) a commencé ses travaux dès 1976. De nombreuses conférences ont été consacrées au sujet depuis cette date. Cependant, les praticiens du béton ont été réticents à se tourner vers le recyclage. En effet, le secteur de la construction est encore plutôt conservateur, avec de nombreuses petites entreprises et un assez faible niveau de qualification, ce qui entrave la diffusion rapide des pratiques innovantes. En outre, des produits usagés (ou d'occasion) donnent généralement une image de moindre qualité et de peu de fiabilité, alors que la durée de vie d'une construction espérée est aujourd'hui de 50 à 100 ans. Heureusement, de temps en temps, le secteur de la construction se mobilise sur des actions de progrès, grâce notamment à des projets de R&D collectifs associant plusieurs partenaires. En France, des Projets Nationaux (parrainés par le ministère en charge de l'Équipement, aujourd'hui intitulé Ministère de la Transition Écologique et Solidaire MTES) sont lancés depuis le milieu des années 1980. Parmi ceux consacrés au béton, après le béton à haute performance (VNB, BHP 2000), le béton renforcé de fibres (BEFIM), les nouveaux procédés de mise en œuvre (CALIBE), et les bétons auto-plaçants (BAP), il a été décidé, en 2010, de consacrer un projet au recyclage du béton.

Après deux ans de préparation, le Projet National RECYBETON (« RECYclage complet des BETONS ») a été lancé en 2012. Il comprenait 47 partenaires issus tant du secteur universitaire que du secteur professionnel, dont la plupart des syndicats professionnels de l'industrie des granulats, du ciment, des adjuvants, du béton prêt à l'emploi, du béton préfabriqué, du bâtiment et des travaux publics. L'objectif principal était d'étudier et de promouvoir l'utilisation de tous les matériaux générés par la démolition des ouvrages en béton, en tant que GBR utilisés en substitution des granulats naturels ou comme matière première dans

la production du ciment. Un programme complet de R&D a été mis en œuvre par le biais de quatre appels internes au sein des participants, couvrant tous les aspects depuis le traitement des matériaux jusqu'à l'analyse environnementale. Une quarantaine de rapports scientifiques et techniques ont été produits. En outre, la faisabilité du recyclage du béton dans le béton a été démontrée par la réalisation de cinq chantiers expérimentaux, couvrant une grande variété de domaines (bâtiment et génie civil). Le projet a été financé en partie par une subvention du MTES, par les cotisations des membres, par des dons des syndicats professionnels et par autofinancement des participants actifs, pour un montant total de 4,7 millions d'euros. Une partie du programme de R&D a été également financée par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) à travers le projet ECOREB (« ECOconstruction par le REcyclage du Béton »).

Cet ouvrage a pour but de présenter à un large public un résumé des travaux accomplis. Le choix a été fait de situer les résultats du Projet National RECYBETON au regard de l'état de l'art, afin que le lecteur puisse accéder aux connaissances les plus récentes concernant l'art de recycler le béton dans le béton :

- la partie I traite des granulats de béton recyclé (GBR) : comment sont-ils produits, quelles sont leurs caractéristiques principales ;
- la partie II explique comment l'ancien béton concassé peut être utilisé dans le processus de fabrication du ciment, en tant que matière première alternative (pour produire du clinker) ou en tant qu'ajout cimentaire (pour produire des ciments composés ou pour être ajouté au béton dans le malaxeur) ;
- la partie III fournit des informations sur la façon de fabriquer, de couler et de laisser durcir les bétons de GBR ;
- la partie IV couvre toutes les propriétés importantes du béton de GBR durci, de la microstructure aux propriétés liées à la durabilité et au comportement au feu ;
- la partie V est consacrée à la formulation du béton de GBR : comment adapter une formule existante ou comment concevoir une nouvelle formule en respectant son cahier des charges ;
- la partie VI traite de la combinaison du béton de GBR avec les armatures en acier. Le calcul classique du béton armé est revisité à la lumière du recyclage ;
- la partie VII présente les différents chantiers expérimentaux réalisés au sein du Projet National RECYBETON, ainsi qu'une série d'utilisations des bétons de GBR dans l'industrie de la préfabrication ;
- la partie VIII soulève la question de la viabilité du recyclage du béton : quelle est la ressource disponible ? Peut-elle être utilisée dans le béton et sous quelles conditions ? Peut-elle être réutilisée à l'avenir ? etc.
- la partie IX clôt le sujet en résumant les normes et les pratiques nationales.

Chaque partie est divisée en plusieurs chapitres écrits au format d'un article scientifique. Les chapitres commencent par un résumé suivi en général d'un

état de l'art, puis par les résultats spécifiques obtenus dans le cadre du Projet National RECYBETON. Des efforts ont été faits pour que le lecteur trouve facilement des réponses pertinentes à ses questions, de manière simple et concise.

Le plus souvent, le livre ne fournit pas de suggestions pour faire évoluer les normes et les codes de calcul (cet aspect a été traité par ailleurs dans le cadre du Projet National RECYBETON), bien qu'il soit prévu qu'un niveau plus élevé de recyclage soit autorisé dans les prochaines éditions des différents documents clés. Le livre sera complété par des recommandations rédigées à l'attention de toute la communauté des praticiens (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, producteurs de matériaux, consultants, entreprises, contrôleurs etc.). Les auteurs espèrent que le corpus des résultats expérimentaux et des analyses scientifiques rassemblées dans ce livre aidera la communauté de la Construction à adopter des pratiques plus durables dans la gestion de ses ressources. Cet ouvrage peut aussi inciter les chercheurs à mener des études plus poussées et à optimiser tous les aspects du recyclage du béton.



Partie I.

Granulats de béton recyclé

Sophie Decreuse, Cemex, Rungis

Pour favoriser le recyclage des Déchets de Construction et de Démolition (DCD), il faut que les granulats obtenus soient de bonne qualité. En outre, pour favoriser l'augmentation du taux de recyclage et l'utilisation de granulats de béton recyclé (GBR) dans de nouveaux bétons, il faut disposer aussi de déchets triés et de bonne qualité.

Cette partie intitulée « Granulats de béton recyclé » est subdivisée en trois chapitres :

- le chapitre 1 est une brève revue des techniques de démolition et de leur impact sur la qualité des déchets et des granulats. Aucun travail spécifique sur ces techniques n'a été réalisé dans le cadre du Projet National RECYBETON, de sorte que ce chapitre ne constitue qu'un simple « état de l'art » en la matière. Cependant, en complément, une enquête a été faite dans le cadre du Projet National RECYBETON sur la qualité actuelle des granulats produits par différentes plateformes de recyclage en France, dans le but d'évaluer l'efficacité du tri sur ces plateformes. D'autres données sur les caractéristiques de ces matériaux sont fournies dans le chapitre 29 « Ressource et variabilité des granulats recyclés en France » ;
- le chapitre 2 concerne les techniques de traitement des granulats de béton recyclé. Il aborde les méthodes de séparation par air pour les contaminants légers ou le dépoussiérage, de stratification densimétrique par voie humide ou sèche, de tri par capteurs avec différents types d'instruments, de broyage en plusieurs étapes, et d'autres méthodes mécaniques, physiques ou chimiques pour améliorer la libération du granulats naturel d'origine ;
- le chapitre 3 concerne la caractérisation des granulats de béton recyclé. Les principales propriétés physiques et chimiques des GBR ont été mesurées sur les sables et gravillons utilisés dans le cadre du Projet National RECYBETON, en utilisant les méthodes expérimentales consacrées aux granulats naturels, afin d'évaluer si elles pouvaient être appliquées telles quelles à ce type de produit, et si la variabilité des GBR affecte leur précision.

Chapitre 1.

Techniques et matériaux de démolition

S. Decreuse¹, N. Comte², C. Raillon³

Résumé – De nombreux pays sont aujourd’hui engagés dans le recyclage des Déchets de Construction et de Démolition (DCD). Ces produits doivent cependant être de la meilleure qualité possible pour que leur taux de recyclage soit maximum. Les déchets doivent alors être triés, en privilégiant la déconstruction à la démolition, même si la déconstruction est plus chère sous certains aspects. Les plans de gestion des déchets impactent fortement le tri, mais les techniques de démolition jouent aussi un rôle très important. Le présent chapitre donne un bref aperçu des techniques de démolition existantes, accompagné d’indications sur leur impact vis-à-vis du recyclage. Il présente également le bilan d’une étude de variabilité réalisée dans le cadre du Projet National RECYBETON, destinée à vérifier si le tri est fait avec suffisamment d’efficacité pour permettre le recyclage des bétons de démolition dans le béton.

1.1. Introduction

Les granulats de béton recyclé (GBR) doivent être de bonne qualité pour pouvoir être incorporés dans le béton. Il faut notamment qu’ils présentent une teneur élevée en béton et en matériaux rocheux, sans être trop contaminés par du plâtre, du bois, du plastique... Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mettre en œuvre un procédé de démolition adéquat permettant de trier les différentes natures de matériaux rencontrés. Une déconstruction est alors toujours préférée à une démolition sans tri préalable.

Le Projet National RECYBETON n’a pas engagé de recherches spécifiques sur les différentes techniques de démolition, ni sur leur incidence vis-à-vis des propriétés des granulats. Il a cependant prévu un état de l’art portant sur les règlements et les types de démolition en vigueur. Il a également réalisé une étude sur la variabilité des propriétés des GBR actuellement produits en France, à la fois sous les aspects géographiques (comparaison de 16 plateformes de recyclage) et temporels (suivi de 2 plateformes pendant 24 mois).

1. Cemex, Rungis, France.

2. Syndicat des Recycleurs du BTP (SRBTP), Paris, France.

3. Syndicat National des Entreprises de Démolition (SNED), Paris, France

1.2. État de l'art

Plusieurs études ont montré que la démolition sélective était techniquement et économiquement réalisable [RECYC-QUEBEC, 1999].

Dans le cas d'une démolition complète, les déchets inertes représentent 94 % des déchets générés, mais, dans la pratique, 60 % de certains déchets non inertes restent associés aux déchets inertes (par exemple, restes de plâtre sur le béton, bois et plastiques non retirés des murs [Laby, 2007]).

Aujourd'hui, si le recyclage et la valorisation des déconstructions « tout béton » dépasse 75 %, le taux n'est que de 12 % pour les déchets inertes mixtes [CGDD, 2010].

En France, cette situation devrait évoluer en raison de l'application des « Plans de Prévention et de Gestion de Déchets de Construction et de Démolition », qui imposent un diagnostic préalable à la démolition [BIO IS, 2011]. Il s'agit aussi de respecter l'objectif européen de récupération, de recyclage ou de réutilisation d'ici 2020 d'au moins 70 % des DCD, conformément à la Directive-Cadre Déchets (Directive 2006/12/CE révisée par la Directive 2008/98/CE).

1.2. Règlementations sur la gestion des Déchets de Construction et de Démolition, en France et dans d'autres pays

1.2.1.1. *Différents types de Déchets de Construction et de Démolition*

Les Déchets de Construction et de Démolition peuvent être classés en :

- déchets dangereux,
- déchets non dangereux, eux-mêmes divisés en « déchets inertes » et « déchets non inertes non dangereux ».

Les déchets inertes sont principalement constitués de déchets d'origine minérale tels le béton, la tuile, la brique, le verre et aussi certains enrobés bitumineux. Ces déchets sont parfois mélangés entre eux ou légèrement contaminés par du plâtre, des plastiques, du bois etc. Ils proviennent principalement du gros œuvre des bâtiments et sont récupérés lors de la démolition des ouvrages. Pour servir de granulats recyclés, ces déchets de démolition doivent contenir un maximum de béton et de matériaux rocheux.

Les déchets dangereux n'entrent pas dans le champ du Projet National RECYBETON. Ils doivent être séparés des déchets inertes. Il s'agit par exemple de produits bitumineux à base de goudron de houille, de matériaux de construction contenant de l'amiante, de bétons contaminés des centrales nucléaires, etc.

1.2.1.2. *Réglementations applicables aux Déchets de Construction et de Démolition*

Selon [Tam, 2013], de nombreux outils et règlements de gestion des déchets et des activités liées au développement durable sont apparus ces dernières années, notamment en Chine, au Japon, aux États-Unis, au Brésil et dans la plupart des pays européens.

À partir de 2011, la Commission Européenne a financé des études sur la définition de la politique communautaire en matière de gestion durable des ressources. Les Déchets de Construction et de Démolition (DCD) ont été identifiés comme objectif prioritaire, en raison des grandes quantités générées et du fort potentiel de réutilisation et de recyclage de ces matériaux. Pour cette raison, la seconde Directive-Cadre sur les Déchets a demandé que tous les États Membres mettent en œuvre les dispositions qui s'imposent pour atteindre, d'ici 2020, un objectif minimal de 70 % (en masse) pour la récupération, le recyclage et la réutilisation des DCD et autres matériaux.

Les principales incitations françaises ayant un impact sur l'augmentation du recyclage du béton et le tri des déchets de démolition sont [BIO IS, 2015] :

- l'Article 46 de la Loi 2009-967 du 3 août 2009 (dite loi Grenelle 1) et l'Article 190 de la Loi 2010-788 du 12 juillet 2010 (dite loi Grenelle 2) qui imposent un audit préalable aux chantiers de démolition. Cet audit obligatoire vise à caractériser tous les matériaux présents sur le chantier et à planifier la gestion des Déchets de Construction et de Démolition (DCD) ;
- le Décret n° 2011-610 du 31 mai 2011, appelé « Diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments », précise cette obligation. Il s'applique depuis mars 2012 pour certaines catégories de bâtiments (> 1 000 m²) (articles R. 111-43 à R. 111-48 du Code de la Construction et du Logement). Ce décret précise les bâtiments concernés, les obligations des constructeurs quant au contenu du diagnostic et de la méthodologie, l'obligation de divulguer le document et de renseigner un formulaire de suivi après l'achèvement de travaux de démolition ;
- le Plan National pour la Prévention des Déchets [MEDDE, 2012], établi en avril 2012 par le groupe de travail « Prévention » du Conseil National des Déchets (CND). Il a servi de base de travail pour le Programme National de Prévention des Déchets 2014-2020 ;
- afin d'atteindre cet objectif, le Programme National de Prévention des Déchets 2014-2020 a planifié le lancement de plusieurs actions clés, comprenant la révision/amélioration des règles liées au diagnostic de la démolition. Ces mesures sont également définies dans la Loi de Transition Énergétique de 2015 (Loi n° 2015-992).

1.2.2. Techniques de démolition

Différents facteurs influencent le choix de la technique ou de la combinaison des techniques utilisées sur un chantier de démolition :

- la surface de travail disponible ;
- l'existence de réglementations locales ou nationales obligeant le tri des déchets ;
- l'existence de prescriptions environnementales (imposées par le Maître de l'Ouvrage) ;
- l'emplacement du chantier de démolition ;
- le volume de démolition ;
- le temps alloué pour réaliser la démolition.

Les techniques décrites ci-après ne peuvent être mises en œuvre que par des entreprises qualifiées, ayant compétences pour appliquer les mesures de sécurité adéquates envers les travailleurs et le voisinage.

1.2.2.1. *Technique de démolition à l'aide d'outils à main*

[Da Costa, 2009 ; Coelho. et de Brito, 2013 ; Brokk, 2000]

Ces techniques sont principalement utilisées pour les démolitions de petits volumes, et pour les travaux préparatoires avant la démolition d'ouvrages plus grands. Lorsqu'il s'agit de travaux préparatoires, les polluants sont supprimés (amiante, plomb, etc.). Différents outils sont utilisés tels que maillets, pioches et marteaux qui peuvent être électriques, pneumatiques ou hydrauliques. Ce type de démolition est lente et coûteuse, mais elle permet un bon tri si elle est bien faite.

1.2.2.2. *Techniques de démolition à l'aide d'outils portés*

[Coelho et de Brito, 2013 ; Brokk, 2000]

Par rapport aux outils à main, ces techniques présentent l'intérêt d'être beaucoup plus efficaces et beaucoup plus puissantes. Différents outils tels que pinces, cisailles, boulets, BRH sont portés par un engin mécanique. La sélection de l'outil dépend du type de bâtiment (taille, matériaux de la structure, etc.). Le coût d'utilisation de ces outils (coût unitaire par tonne de matériaux démolis) est inférieur à celui des outils à main. Lorsque l'immeuble est très élevé, des mini-engins peuvent être utilisés pour déconstruire les étages supérieurs, avant que les engins de démolition adaptés, travaillant depuis le sol, n'interviennent.

1.2.2.3. *Démolition par dynamitage*

[Coelho & de Brito, 2013 ; Brokk, 2000]

Le dynamitage est un processus de démolition très efficace, qui fragilise ou produit l'effondrement de la structure du bâtiment. Selon le type du bâtiment, différentes techniques de dynamitage peuvent être utilisées. Elles peuvent aussi être utilisées dans les différentes parties d'un bâtiment pour avoir une démolition sélective. Avant le dynamitage, le bâtiment doit être nettoyé et les matériaux récupérés sont triés, afin d'obtenir une bonne qualité de déchets

Figure 1.1

Démolition à l'aide d'une tenaille



Crédit photo : Yves Soulabaille – Genier Deforge.

Figure 1.2

Démolition par dynamitage



Crédit photo : Cardem.

inertes pouvant être recyclés. Cette étape est primordiale, car si le tri n'a pas été fait avant le foudroyage, tous les déchets seront mélangés. Ces techniques nécessitent également une expertise et une bonne connaissance en matière de structure des bâtiments. Elle est généralement utilisée pour les bâtiments où les techniques de démolition classiques ne peuvent être appliquées en raison de la taille du bâtiment, du niveau de risque ou du manque d'efficacité des techniques classiques.

1.2.2.4. *Autres procédés de démolition*

[Coelho et de Brito, 2013 ; Brokk, 2000]

D'autres techniques de démolition peuvent impliquer des procédés plus anciens comme le perçage, le forage ou l'abattage par câbles, mais aussi plus récents comme les méthodes thermiques où les matériaux sont fusionnés pour être séparés les uns des autres, ou encore des procédés électriques ou chimiques.

1.2.3. Démolition/déconstruction et coûts

La déconstruction est un processus de démolition sélectif permettant un tri efficace des différents matériaux. De ce fait, elle a un coût plus élevé que la démolition classique. Ce surcoût est directement lié à l'augmentation de la

Figure 1.3

Tri durant une déconstruction sélective



Crédit photo : Brunel.

durée du processus de démolition, au nombre d'opérations à effectuer pour faire le tri des différents matériaux, et au nombre d'ouvriers nécessaires.

Mais, dans la plupart des cas, ce surcoût n'est pas un réel obstacle, vu son bénéfice environnemental, et aussi parce que la démolition des bâtiments de plus de 1 000 m² oblige maintenant à un inventaire des différents types de déchets, ainsi qu'à la désignation des installations locales pouvant accueillir les matériaux recyclés. Enfin, le traitement des déchets triés est beaucoup plus économique que celui des matériaux mélangés. La présence d'installations locales de récupération et de transformation des différents types de déchets encourage alors à un meilleur tri, et favorise donc ainsi l'option de la déconstruction [Laby, 2007].

Par conséquent, si le secteur du recyclage du béton se développe et se structure, alors l'option de la déconstruction et du tri sera de plus en plus privilégiée, et la qualité des granulats recyclés n'en sera qu'améliorée.

1.2.4. Matériaux produits

Les volumes de Déchets de Construction et de Démolition produits en France en 2014 sont présentés par nature dans le Tableau 1.1, établi à partir des indicateurs du Service de l'Observation et des Statistiques [SOeS, 2017].

Tableau 1.1

Volume des différents types de Déchets de Construction et de Démolition

DCD inertes 2017 (données de l'enquête SOeS de 2014) Nature des déchets	Quantité totale de déchets produits (× 10⁶ t)
Béton	19,1
Briques, tuiles, céramique et ardoise	4,2
Verre	0,2
Mélanges bitumineux dépourvus de goudron	11,2
Pierres et terre non polluées	114,8
Autres matériaux de démolition de chaussées	37,5
Ballast de voie non polluées	2,2
Déblais de dragage non pollués	2,8
Autres déchets inertes	1,1
Mélanges de déchets inertes	18,1
Total déchets inertes	211,2

Les déchets de démolition sont principalement constitués de matériaux minéraux tels que le béton, le mortier, la pierre, la brique et la tuile. D'autres produits de construction peuvent également être présents dans les matériaux obtenus, mais il s'agit surtout d'éléments polluants, tels que le verre, les produits bitumineux, etc.

Une étude sur 16 installations de recyclage [Jezequel, 2014] a montré que 14 d'entre elles produisaient des granulats recyclés contenant plus de 95 % de bétons et de matériaux pierreux. Le tri à la source semble donc être efficace.

Figure 1.4

Parts de béton (Rc) et de matériaux pierreux (Ru) (Rcu en %) dans les granulats recyclés soumis à l'essai de classification (EN 933-11) dans l'étude de la variabilité géographique

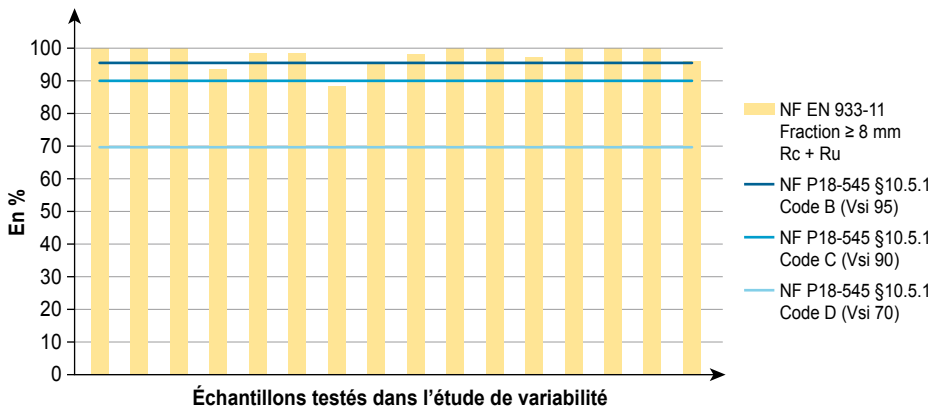
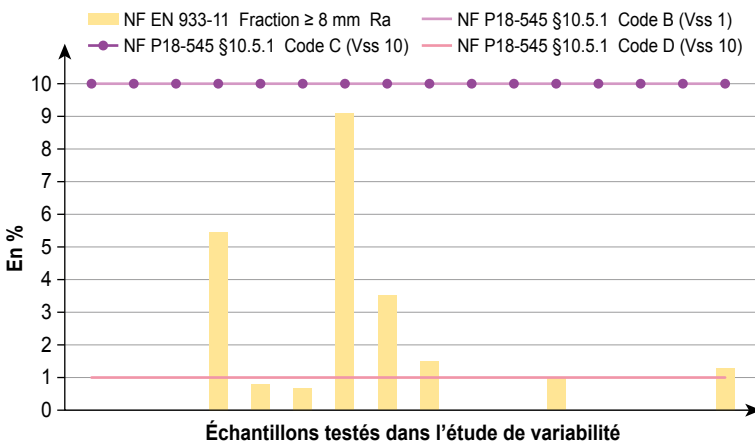


Figure 1.5

Parts de tuiles et de briques (Rb) dans les granulats recyclés soumis à l'essai de classification (EN 933-11) dans l'étude de la variabilité géographique



1.3. Besoin de recherche

C'est en intégrant dès la conception d'un projet le processus de déconstruction et de tri que le taux de recyclage des DCD augmentera [PDR, 2000 ; Bradley, 2004]. Ce principe permettra donc aussi d'accroître l'utilisation des granulats recyclés dans le béton.

Certains projets commencent à tenir compte de la déconstruction dès la conception, afin de limiter la production de déchets et de maximiser le recyclage des déchets obtenus. Le projet DEMODULOR [Château, 2015] a étudié différents procédés appliqués principalement à l'enveloppe des bâtiments. Certaines conclusions de DEMODULOR constituent des suggestions pertinentes pour augmenter le recyclage des DCD, à savoir :

- introduire un taux de recyclage élevé de DCD dans chaque nouvelle opération ;
- introduire dans les appels d'offres une clause pour un taux de recyclage supérieur ;
- renforcer les contrôles sur chantier ;
- s'assurer que les plans de gestion des déchets sont effectivement mis en place dès l'étape de conception des travaux de construction.

Il serait également intéressant de développer des appareils de contrôle automatiques destinés à identifier les différents constituants des matériaux de démolition, et ainsi faciliter leur réception sur les plateformes de recyclage ou les carrières. Le projet HISER travaille actuellement sur ce type de dispositifs permettant d'évaluer la qualité en ligne. Il s'intéresse par exemple à un procédé basé sur la spectroscopie d'émission optique de plasma induit par laser (LIBS). Ces techniques ont été appliquées aux granulats de béton recyclé [Zerbi *et al.* 2017] et les résultats préliminaires indiquent que le couplage de l'information hyperspectral avec la technologie robotique permet d'atteindre un tri performant des DCD (pureté supérieure à 90 %).

1.4. Conclusion

L'état de l'art montre que les constituants non dangereux des DCD sont composés principalement d'éléments minéraux, parfois pollués par des éléments non-désirés comme les plastiques, les sulfates, le bois, etc. Le recyclage maximum des DCD passera donc nécessairement par une étape de purification intégrée au processus de démolition.

Les règlements français imposent aujourd'hui de nouvelles contraintes qui structurent le marché et fixent des objectifs quantitatifs de recyclage, afin de préserver les matériaux naturels primaires.

Les études de variabilité montrent clairement que le processus de tri est plutôt efficace, quelle que soit la technologie utilisée dans les 16 plateformes de recyclage étudiées, puisque 14 d'entre elles fournissent un produit fini contenant plus de 95 % (en masse) de bétons et de matériaux pierreux, le taux le plus faible étant de 85 %.

Chapitre 2.

Élaboration des granulats de béton recyclé

B. Cazacliu¹, L. Le Guen¹, E. Hamard¹, S. Roux², S. Braymand³

Résumé – La production des Déchets de Construction et de Démolition (DCD) peut combiner diverses opérations, telles l'élimination des éléments métalliques ou légers, le concassage, le criblage et la floculation des argiles. La plupart des plateformes de recyclage fonctionnent dans des configurations simples, sans faire appel à l'ensemble de ces techniques, alors que des procédés plus complexes et plus efficaces, décrits dans la littérature, pourraient aussi être utilisés. Ce chapitre présente succinctement différentes technologies, basées sur la séparation à l'air comprimé (contaminants légers et dépoussiérage), sur la stratification densimétrique par voie humide ou sèche et sur le tri par capteurs. Sont présentées aussi des méthodes pour récupérer au mieux l'ancien granulats naturel, par concassages successifs ou par traitements physiques ou chimiques.

Divers essais ont été réalisés pour apprécier l'intérêt des méthodes de concassage, de séparation densimétrique par courant d'eau, de tri optique et de tri par capteur proche infrarouge (NIR). De même, des essais d'usure mécanique, de sablage, de traitements thermiques, de traitements aux micro-ondes ou aux acides ont été réalisés, pour mesurer leur efficacité respective à libérer le granulats d'origine du béton recyclé.

Concernant le concassage, plusieurs stratégies sont possibles, selon que l'on souhaite récupérer le maximum de granulats naturel ou réutiliser au maximum les DCD.

Le système de jig (ou bac à piston) à eau a montré sa capacité à trier le béton, la brique et le plâtre. Son efficacité a été testée sur des mélanges binaires et ternaires.

Le tri par capteurs a donné des résultats prometteurs. Les capteurs optiques peuvent efficacement séparer la brique rouge, le gypse blanc, l'enrobé sombre, le verre transparent et le métal gris foncé du béton. Les capteurs proches infrarouges ont montré également un bon potentiel pour séparer la brique, le gypse, l'enrobé, le verre, le métal et la céramique du béton.

1. IFSTTAR, Laboratoire GPEM, Bouguenais.

2. IJL, UMR 7198, Université de Lorraine, Nancy.

3. ICube, UMR 7357, Université de Strasbourg, Strasbourg.

Concernant la récupération du granulats d'origine contenu dans le béton recyclé, l'étude a montré que les traitements thermomécaniques sont les plus efficaces et les plus faciles à adapter à l'échelle industrielle, et qu'ils sont plus respectueux de l'environnement et sans risques pour la santé.

2.1. Introduction

Les granulats de béton recyclé (GBR) produits industriellement proviennent généralement d'ouvrages démolis. Ils contiennent de ce fait une large variété de bétons de composition et de propriétés différentes associés à une plus ou moins grande proportion de corps étrangers (par exemple, de la brique en terre cuite, des enrobés bitumineux, du verre, du plâtre, etc.). Il est relativement facile de séparer les constituants tels le plastique, le bois, le métal, le papier et les matériaux de couverture. C'est moins évident pour la céramique, les enrobés et la pierre. Ces constituants sont presque toujours présents dans les différents granulats recyclés, indiquant qu'ils sont mal éliminés en pratique. La plupart des GBR contiennent donc une variété de composants minéraux (pierre, mortier, brique, plâtre... et autres matériaux de médiocre qualité). Pour pouvoir valoriser au mieux les GBR, il est alors nécessaire d'améliorer leur uniformité et de réduire au maximum les contaminants. Toutefois, le niveau d'homogénéité et de pureté requis dépend directement de leur réutilisation. En effet, dans les sous-couches des chaussées, les GBR peuvent se substituer aux granulats naturels même s'ils contiennent des fragments de briques en quantité importante [Arulrajah *et al.*, 2012]. En revanche, pour être réutilisés dans de nouveaux bétons, la présence de mortier adhérent aux granulats naturels [de Juan et Gutiérrez, 2009], de débris de briques [Yang *et al.*, 2011] et d'autres éléments tels le verre ou le bois [Poon et Chan, 2007a] sont des contaminants qui altèrent la qualité du béton et en augmentent la variabilité. C'est pourquoi la composition des GBR destinés à être recyclés dans le béton a été précisée par les normes. Ainsi, ils doivent contenir au moins 90 ou 95 % de béton ou de granulats naturels, et avoir un taux de contaminant généralement inférieur à 1 % de la masse totale du produit. Afin d'éviter tout problème d'expansion différée et d'altération de la microstructure des nouveaux bétons [Nixon, 1978], la teneur admissible en gypse est aussi, généralement, très limitée. Enfin, jusqu'ici, la plupart des applications ne permettent que l'utilisation des gravillons de GBR, car les caractéristiques requises sont difficilement atteintes avec les sables de GBR.

Actuellement, si l'on veut éviter le mélange des différents matériaux, la démolition doit se faire de façon très sélective voire, dans certains cas, manuellement. Comme ces pratiques sont exceptionnelles, il en résulte que la plupart des GBR sont de mauvaise qualité, en témoigne leur réutilisation marginale dans les bétons de structure. Étant donné les seuils de composition exigés et les difficultés à éliminer certains constituants, le recours à des systèmes de

séparation efficaces devient alors une nécessité. Ces systèmes comprennent le tri automatisé et l'élimination des phases de moindre qualité. À ce stade, les similitudes avec les technologies déployées dans l'industrie minérale sont évidentes. Leur transfert potentiel vers le recyclage des DCD ouvre la voie d'une réutilisation plus rationnelle des GBR, dans des conditions plus respectueuses de l'environnement.

2.2. État de l'art

Il existe plusieurs configurations de plateforme de recyclage des Déchets de Construction et de Démolition (DCD). Les procédés rencontrés actuellement comprennent généralement les opérations suivantes [CEREMA, 2014] :

- extraction des éléments métalliques à l'aide de séparateurs magnétiques ;
- élimination des éléments indésirables légers (plâtre, bois, plastique, etc.) par des systèmes de tri (séparateurs manuels, pneumatiques ou hydrauliques, etc.) ;
- concassage/criblage ou scalpage, pour produire un matériau élaboré compatible avec l'utilisation finale recherchée ;
- floculation des argiles, par des techniques de flottation par exemple.

Cependant, comme indiqué par l'Ademe [ADEME, 2011a], la plupart des plateformes ont recours à des procédés plus simples, qui ne combinent pas l'ensemble des opérations précédentes. De même, dans la littérature (voir la bibliographie établie par [Bovea et Powell, 2016]), les analyses économiques ou environnementales sont très souvent basées sur des installations très sommaires. Dans ce contexte, une plateforme typique de recyclage des déchets inertes, capable de produire des granulats de béton recyclé (GBR) présente la configuration suivante. À l'entrée, les déchets sont inspectés et réceptionnés visuellement, triés à l'aide de pelles hydrauliques puis stockés sur des aires appropriées distinctes. Les gros blocs de béton sont réduits à l'aide de matériels dédiés, tels BRH et pinces hydrauliques. Les matériaux sont ensuite scalpés dans un alimentateur vibrant de type grizzly par exemple, puis concassés. Les déchets ferreux sont retirés à l'aide d'un séparateur magnétique. Les matériaux obtenus sont criblés en plusieurs coupures afin d'obtenir les GBR finaux. Certaines publications font état de procédés encore plus simples.

À l'inverse, la littérature propose aussi des procédés beaucoup plus complexes, faisant appel à des opérations complémentaires pour améliorer l'efficacité du tri :

- jusqu'à trois étapes de concassage (par exemple [Kim, 2014]) ;
- tri aéraulique des contaminants tels le papier, le plastique, le bois [Coelho et de Brito, 2013a ; Lotfi *et al.*, 2014] ;
- tamis rotatifs (trommels) pour les gros blocs et autres contaminants de grande taille [Montero *et al.*, 2010 ; Tsoumani *et al.* 2015] ;
- systèmes à courant de Foucault pour les métaux non ferreux [Xing et Hendriks, 2006] ;

- air comprimé pour le dépoussiérage [Tam, 2008] ;
- installations de lavage, avec traitement des boues [Petavratzi *et al.*, 2007] ;
- spirales pour séparer les éléments lourds dans les sables [Coelho et de Brito, 2013a] ;
- jig à air [Cazacliu *et al.*, 2014], jig à eau [Weimann *et al.*, 2003] et lit fluidisé de sable sec [Mulder *et al.*, 2007] pour les polluants tels la brique ou le gypse ;
- tri par capteurs [Lotfi *et al.*, 2014 ; Paranhos *et al.*, 2016] ;
- systèmes pour séparer le mortier des GBR [Koji, 2010] ;
- séparation magnétique du mortier et de la brique [Xing *et al.*, 2002 ; Ulsen *et al.*, 2013] ;
- séparation manuelle sur tapis de traitement, pour éliminer les impuretés de grandes tailles subsistant après le premier concassage [Silva *et al.*, 2014a].

Le choix des différents traitements automatiques repose sur la masse de déchets à trier et sur leur composition, mais aussi sur les objectifs technico-économiques du producteur. En France, le SRBTP (Syndicat de Recycleurs du Bâtiment et des Travaux Publics) [SRBTP, 2014] suggère de ne pas opposer tri simple ou manuel et tri automatique, souvent complémentaires sur une plateforme de recyclage.

2.2.1. Concassage

Selon la taille, les GBR sont plus ou moins formés de grains qui contiennent du granulat naturel mélangé à du mortier. [Belin *et al.*, 2014] ont montré que la quantité de pâte de ciment résiduelle dépendait notamment de la teneur en pâte initiale et de sa porosité, ainsi que de la qualité mécanique de l'interface entre le granulat naturel et la pâte de ciment initiale. [Haase et Dahms, 1998] ont montré que, pour une même taille de grains, les GBR issus d'un béton parent peu résistant contiennent une plus faible teneur en mortier résiduel. Ils ont expliqué ce fait par la présence d'une auréole de transition de moindre qualité, qui favorise la séparation du granulat et du mortier pendant le concassage, en laissant les grains rocheux plus propres. Toutefois, pour un béton parent de bonne qualité, l'impact négatif du mortier peut être partiellement compensé par une meilleure résistance et une plus forte compacité du mortier, ainsi que par une (ancienne) auréole de transition de meilleure qualité. Ce constat a été confirmé par les valeurs Los Angeles obtenues avec des GBR de différentes masses volumiques (les essais correspondant sont présentés au chapitre 3).

Un certain nombre d'études ont montré également que, d'une manière générale, la quantité de mortier présent dans les gravillons de GBR diminue avec l'augmentation du nombre de concassage [Fleischer et Rubby, 1999 ; de Juan et Gutierrez, 2009 ; Florea et Brouwers, 2013 ; Akbarnezhad *et al.*, 2013b]. L'effet d'un second concassage sur la réduction de la teneur en mortier

des GBR semblent être plus important pour les coupures de grandes tailles que pour la fraction 4/8 mm. [Akbarnezhad *et al.*, 2013b] ont observé que, quel que soit le nombre de concassage, la teneur en mortier des GBR augmente en général concomitamment à la résistance à la compression du béton parent. L'absorption d'eau diminue significativement aussi, et linéairement avec le nombre de concassage. [Noguchi *et al.*, 2011] ont publié des résultats où l'absorption d'eau des GBR de granularité 5/10 mm passe de 8 à 4 % entre 0 (aucune) et 3 concassage, et de 6 à 3 % pour des GBR de tailles supérieures à 10 mm. [Nagataki *et al.*, 2004] ont utilisé une combinaison de concasseurs à mâchoires et à percussion, suivie de deux broyages mécaniques, afin de minimiser le mortier adhérent de trois formules de béton de résistance à la compression de 28, 49 et 61 MPa à 28 jours respectivement. Après deux concassages, l'absorption d'eau des GBR de classe 5/20 mm passe alors de 6,3, 5,6 et 4,9 % respectivement à 3,8, 3,2 et 3,1 % respectivement. En comparant le comportement de bétons formulés avec deux classes de GBR à un béton formulé avec des granulats naturels, [Pedro *et al.*, 2014] ont observé une perte de performances liée à la durabilité, plus importante que la perte de performances mécaniques. Cependant, les GBR produits en deux concassages – concasseur à mâchoires puis concasseur à marteaux – donnent de meilleurs résultats que lorsque les GBR sont obtenus par un concassage à mâchoires uniquement, car le mortier adhérent est réduit par le double concassage.

Il convient de noter que le mortier adhérent n'est pas toujours le principal paramètre qui détermine la qualité des gravillons de GBR [Nagataki *et al.*, 2004]. Un gravillon gréseux utilisé dans le béton parent présente des défauts (fissures, pores et vides) qui disparaissent après deux concassages. Les propriétés des GBR augmentent par conséquent. Ce fait a été confirmé par [Ogawa et Nawa, 2012], qui ont observé que les concasseurs à mâchoires diminuaient peu le taux de défauts du granulat, alors que des modifications plus significatives sont observées lors d'un traitement avec un broyeur à boulets ou un granulaturier. En outre, les caractéristiques géométriques sont faiblement modifiées après plusieurs concassages répétés dans un concasseur à mâchoire, alors que les grains sont plus arrondis dans un broyeur à boulets et dans un granulaturier.

[Akbarnezhad *et al.*, 2013b] ont constaté que la teneur en mortier du béton de GBR dépendait de la taille du granulat naturel dans le béton parent. Ils ont montré que le concassage du béton jusqu'à une taille maximale proche de celle du granulat d'origine conduit à une teneur en mortier plus faible. [Belin *et al.*, 2014] ont observé qu'un béton parent à base de granulats arrondis produit des GBR à plus faible teneur en pâte résiduelle qu'un béton parent à base de granulats concassés. Ceci s'explique par une auréole de transition un peu plus faible mécaniquement lorsque les granulats naturels sont lisses et arrondis [de Larrard, 1999].

Si les traitements répétés des gravillons de GBR diminuent leur teneur en mortier adhérent, ils réduisent considérablement aussi leur taux de récupération

et, donc, augmentent la proportion de sable et de fines de GBR. [Noguchi *et al.*, 2011] estiment que la proportion de gravillons dans le produit élaboré passe de 50 % à 20 % lorsque le nombre de concassages passe de 0 à 3. Parallèlement, la proportion de fines qui en résultent passe de 5 % à 12 % environ.

Enfin, des études récentes plus fondamentales sur le concassage du béton sont proposées dans la littérature. Il s'agit par exemple d'expériences avec des sphères [Tomas, 1999] ou des disques [Neveu, 2016] de bétons modèles soumis à des impacts et étudiés individuellement par simulations numériques selon la méthode des éléments finis (MEF) [Takahashi et Ando, 2009].

2.2.2. Criblage

Peu d'informations sont données dans la littérature sur les particularités liées au criblage des GBR. On peut noter cependant que l'élimination des fractions les plus fines ou les plus grosses permet d'améliorer la concentration en granulats de béton dans la fraction restante. En effet, la distribution des différents composants d'un GBR peut varier. Un exemple industriel est donné par [Asakura *et al.*, 2010]. Ils ont analysé la fraction 0/5,6 mm d'un mélange de DCD après plusieurs étapes de traitement, dans 5 usines de recyclage au Japon. Dans cette coupure, les particules de bois sont plus grosses que les grains inertes denses, alors que les matières organiques et le gypse sont plus fins. Comme le gypse est principalement présent dans la fraction fine, la quantité de gypse peut alors être réduite en éliminant la fraction fine des DCD [Montero *et al.*, 2010].

Les GBR sont plus sensibles à la fragmentation que les granulats naturels (voir chapitre 3). Ainsi, le criblage des GBR peut produire de la fragmentation. [Schouenborg *et al.*, 2004] ont montré que la quantité de matériau passant au tamis de 8 mm augmentait avec l'énergie de tamisage des GBR. Ils ont comparé l'effet d'un criblage manuel et d'un criblage mécanique après 2, 5 et 10 min. La quantité de passant a augmenté de 3, 4,5, 6,5 et 8,5 % respectivement. L'augmentation était négligeable pour un granulats naturel de référence (0,2 %).

2.2.3. Dépoussiérage

Le recyclage des GBR obtenus par broyage/criblage peut être amélioré si les éléments fins sont éliminés [Huang *et al.*, 2002]. La composition de cette fraction est difficile à contrôler et, entre autres artefacts induits, elle contient un pourcentage plus élevé de contaminants [Asakura *et al.*, 2010]. La méthode de dépoussiérage la plus courante est le traitement par voie humide. Cependant, le lavage génère des eaux polluées et des boues, qu'il est difficile de recycler davantage. L'alternative peut être le recours à un procédé de dépoussiérage à sec après concassage, si l'humidité des GBR le permet.

Les contraintes techniques du dépoussiérage des GBR secs sont proches de celles des granulats naturels concassés. La séparation des fractions les plus

fines du sable alluvial bénéficie du contraste de taille entre les fines (inférieures à 0,1 mm) et la dimension inférieure de la coupure. Cet avantage n'existe pas (ou peu) pour les granulats concassés car leur granularité présente une certaine continuité autour de la dimension basse de la coupure [Champeau et Potin, 2003]. Par ailleurs, la technologie sèche est confrontée à plusieurs difficultés supplémentaires : la dimension basse de la coupure est fixée généralement à une valeur un peu supérieure à celle du produit élaboré, en raison d'une moindre efficacité par rapport à la voie humide ; les fines s'agglomèrent, ce qui crée un effet parasite néfaste. Néanmoins, nombre d'informations tirées de la littérature montrent qu'il est possible de procéder au dépoussiérage par voie sèche [Cazacliu et Huchet, 2016]. Les technologies adaptées sont soit le criblage mécanique [Pettingell, 2008 ; Meinel, 2010] soit la séparation à l'air qui fonctionne en introduisant le matériau dans une chambre où circule un flux d'air ascendant [Johansson, 2014].

Il faut toutefois noter que le cas des sables de GBR n'est pas complètement similaire à celui des sables naturels concassés. En effet, les grains de GBR ont une minéralogie mixte (roche, béton, brique, etc.) et une composition hétérogène (pâte de ciment et éléments rocheux pour les grains de béton concassés, par exemple). Pour certains systèmes, ces différences peuvent améliorer l'efficacité du procédé de dépoussiérage, alors qu'elles peuvent la réduire pour d'autres.

L'un des rares équipements bien adapté, spécialement conçu pour les granulats recyclés, est présenté dans [Lotfi *et al.*, 2014]. Il combine un concasseur par attrition et un système de soufflerie capable de séparer les GBR humides en fraction fine et en fraction grenue (technologie ADR). Dans l'exemple présenté, la récupération des fractions inférieures à 4 mm dans la fraction 4/16 mm est proche de 20 %.

2.2.4. Tri par la densité

Comme présenté ci-avant, les technologies de soufflerie sont de plus en plus souvent proposées pour séparer des matériaux légers comme le bois, le plastique, le papier, le carton... des matériaux plus lourds. Toutefois, un plus grand éventail de technologies est proposé.

La concentration gravitaire est définie comme le processus par lequel des grains de tailles, de formes et de densités différentes sont séparés les uns des autres par la gravité ou par une force centrifuge. Ce processus de séparation est donc principalement basé sur la densité (gravité spécifique). Les procédés de concentration correspondant ont un débit massique élevé et des coûts d'investissements et d'exploitation faibles. En outre, il n'y a pas de limite sur la taille maximale des grains, et le procédé peut être utilisé avec des granularités très étendues.

La jig est un procédé de séparation qui consiste en une succession d'expansions (dilatations) et de contractions (compressions) d'un lit de particules dans un

milieu support, habituellement l'eau ou l'air. Le résultat est la stratification verticale du lit selon la densité des grains [Sampaio et Tavares, 2005].

[Hendriks et Xing, 2004] ont utilisé une jig à eau de laboratoire pour séparer le béton et la brique. Ils ont observé que cette technologie fonctionnait bien, surtout pour les fragments de brique de tailles supérieures à 19 mm. Pour les grains plus fins (2 à 5 mm), il faut un contrôle minutieux des paramètres de fonctionnement pour obtenir un bon résultat. [Müller et Wienke, 2004] n'a pas obtenu de bons résultats avec le même procédé, excepté pour la séparation gypse/béton. Dans des recherches ultérieures, [Schnellert et Mueller, 2011] ont utilisé un équipement industriel, ce qui leur a permis de diminuer de 4 à 5 fois la teneur en gypse, entre la teneur du matériau en entrée, et sa teneur en sortie.

La jig à air a aussi été utilisée sur un mélange de particules de brique/gypse/béton. Des concentrations de béton supérieures à 90 % et des teneurs en gypse nettement inférieures à 1 % ont été atteintes. En effet, la teneur en gypse dans le béton concentré a été réduite d'environ 25 fois [Sampaio *et al.*, 2016]. Ces résultats concordent avec ceux de [Mulder *et al.*, 2007], qui ont observé que le sable sec fluidisé récupéré d'un matériau 0/20 mm correspondait à la fraction la plus pure du produit, et que sa qualité était similaire à celle obtenue avec une jig à eau.

[Ambrós *et al.*, 2017] ont testé des jig à air pour le traitement des DCD, en vue de séparer plusieurs composants, en travaillant par lots discontinus. Les résultats ont montré la faisabilité technique du procédé pour éliminer en une seule étape un certain nombre de contaminants indésirables tels le bois, le papier, le gypse et les fragments de briques. En outre, la teneur initiale en contaminants semble avoir peu d'effet sur les performances de séparation. Dans tous les essais, le produit final obtenu présentait un taux de contaminants inférieur à 1 % en masse, avec environ 90 % de béton pur, en masse.

L'élutriation sépare les grains en fonction de leur taille, de leur forme et de leur densité, en utilisant un débit de gaz ou de liquide constant circulant en direction généralement opposée au sens de la sédimentation. La méthode a été appliquée à des classes étroites de sable de GBR [Ulsen *et al.*, 2013]. Il a été observé que la pâte de ciment et les particules résiduelles de céramique rouges avaient diminué de moitié dans la partie dense, par comparaison à la partie légère. La méthode semble efficace puisque des granulats naturels ont atteint un degré de séparation équivalent.

2.2.5. Tri par capteurs

Le tri optique automatique a été développé dans l'industrie minière pour élaborer différents minerais, en séparant des matériaux ayant des couleurs ou des formes significativement différentes. D'autres capteurs et techniques peuvent aussi être utilisés pour distinguer des grains de différentes compositions physiques ou chimiques, parmi lesquels : l'absorptiométrie à rayons X en

double énergie (Dual Energy X - ray transmission DXA), la fluorescence induite par Laser (Laser-induced fluorescence LIF), la spectroscopie sur plasma induit par laser (Laser-induced breakdown spectroscopy LIBS), la fluorescence aux rayons X (X-ray fluorescence XRF), la spectroscopie proche infrarouge (Near-infrared spectroscopy NIR), la détection et la télémétrie par ondes lumineuses (Light Detection And Ranging Lidar), la spectroscopie Raman, etc.

Le tri par couleur peut servir à augmenter la qualité du produit en évitant la présence de matières indésirables dans le flux à recycler, comme par exemple la brique rouge ou jaune [Xing *et al.*, 2002]. La récupération du bois a atteint 83 % dans les essais effectués par [Mulder *et al.*, 2007]. De même, l'extraction du gypse et du verre de la fraction lourde a atteint 94 % et 96 % respectivement.

L'absorptiométrie à rayons X en double énergie (DXA) peut séparer efficacement les matériaux organiques et inorganiques, et reconnaître aussi le métal dans un même passage [Mulder *et al.*, 2007].

La spectroscopie proche infrarouge (NIR) est efficace pour trier le gypse ou le béton cellulaire, mais pas le bois, les métaux et les plastiques [Vegas *et al.*, 2015]. Avec un spectromètre configuré différemment [Palmieri *et al.*, 2014] on pu séparer la brique, le plâtre, les plastiques, le bois et la mousse des granulats recyclés. Avec les capteurs LIBS, cette méthode simple-coup constitue la méthodologie en temps réel la plus prometteuse, dont les succès dépendent de la qualité du modèle initialement ajusté sur une base de données fiables [Xia et Bakker, 2014].

2.2.6. Libération

La présence du mortier primaire est responsable des différences de comportements entre granulats naturels et GBR [Braymand *et al.*, 2015 ; Sri Ravindrarajah et Tam, 1987]. En partant de ce postulat, les méthodes pour séparer le mortier du granulat naturel trouvées dans la littérature ont été analysées (Figure 2.1) [Torgal, 2013 ; de Brito et Sakai, 2013]. Elles ont recours à des procédés mécaniques (usure, fragmentation, etc.), chimiques (attaque acide) ou physiques (traitement thermique, micro-ondes). Elles exploitent les différences de propriétés entre granulat et pâte de ciment [Torgal, 2013 ; Thomas et Jennings, 2009], à savoir :

- les propriétés physico-chimiques (dilatation thermique ou réactivité chimique) et mécaniques (résistance à l'usure et à la fragmentation), qui conduisent à la dégradation spécifique de la matrice cimentaire ;
- les points faibles du matériau recyclé, tels l'adhérence pâte/granulat et l'auréole de transition où la porosité est plus élevée. La dégradation de cette zone, à partir par exemple de cycles de gel-dégel, permet la libération des granulats primaires.

Le Tableau 2.1 présente les principaux traitements recensés dans la bibliographie.

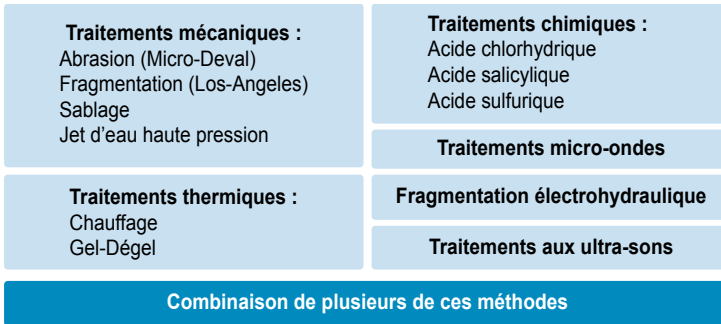
Tableau 2.1
Méthodes de séparation : procédés décrits dans la littérature

Traitement	Industrialisation	Énergie consommée	Perte de masse maximale	Difficultés	Références
Mécanique	Facile	Los Angeles : 2 kWh/tonne	60 %	Dégradation du granulat	[Torgal, 2013 ; NF EN 1097-2, 2010 ; Shima <i>et al.</i> , 2005, Linis et Mueller, 2004]
Haute température	Facile	250 kWh/ tonne	20 %	Dégradation du granulat	[Bazant et Kaplan, 1996 ; Rønning, 2001 ; Yang <i>et al.</i> , 2006]
Ultrasons		12 kWh/tonne	70 %	Santé	[Akbarnezhad et Ong, 2013a]
Basse température	Équipements spécifiques requis	-	-	Obtention d'une très basse température	[Menard <i>et al.</i> , 2013 ; Tasong <i>et al.</i> , 1999]
Micro-ondes		-	71 %	Santé	[Thomas et Jennings, 2009 ; Akbarnezhad <i>et al.</i> , 2011, Zhao <i>et al.</i> , 2013b ; Tam <i>et al.</i> , 2007]
Chimique	Impossible	non	100 %	Santé, déchets issus du traitement	[Akbarnezhad <i>et al.</i> , 2013a ; Momber, 2004]
Fragmentation électro- hydraulique*	Très difficile, matériels spécifiques et haute tension exigés	2 kWh/tonne	Taux de recouvrement : 58,5 %	Petite quantité de matériaux traitée	[Menard <i>et al.</i> , 2013 ; Bru <i>et al.</i> , 2017]
Thermo-mécanique	Facile (chaud)	Proche du traitement thermique	45 %	Dégradation du granulat	[Bazant et Kaplan, 1996]

* Technologie étudiée dans le projet européen HISER, avec des perspectives d'industrialisation.

Figure 2.1

Méthodes de séparation, différents procédés



Certaines études proposent une analyse comparative mono ou multicritères de ces méthodes [Torgal, 2013], mais leur efficacité réelle est rarement discutée [Braymand *et al.*, 2016].

La première difficulté concerne la détermination de la taille maximale des grains appartenant au mortier primaire. La maille du tamis sélectionné pour distinguer les deux phases, une fois séparées, influe sur la valeur de la perte de masse : plus la maille est grande, plus la perte de masse est importante [Braymand *et al.*, 2016, Deodonne, 2015]. Ce paramètre pèse donc directement sur la détermination de l'efficacité du procédé étudié et il est l'une des sources de la grande dispersion des teneurs en mortier observées dans la littérature [Braymand *et al.*, 2016]. La perte de masse dépend aussi des dommages infligés au granulats primaire pendant le traitement. Ce fait a été montré par Yoda [Yoda *et al.*, 2003] pour les procédés mécaniques, et par [Homand-Etienne et Houpert, 1989 ; Zhao, 2014] pour les procédés thermiques à haute température (supérieure à 600 °C) et par [Hansen, 1986 ; Momber, 2004] pour les traitements à l'acide.

La perte de masse ne peut donc pas être considérée comme l'unique critère permettant d'estimer l'efficacité technique d'un procédé : d'autres propriétés doivent être aussi examinées à l'issue du traitement. Par exemple, si la masse volumique réelle du granulats traité est inférieure à celle du granulats naturel, alors les GBR contiennent encore du mortier. En l'absence d'informations sur les propriétés du granulats d'origine, l'évaluation de l'efficacité du procédé nécessite alors des hypothèses sur sa composition.

Selon cette analyse et les observations rapportées par [Akbarnezhad et Ong, 2013] et par [Dao, 2012], les résultats obtenus par [Braymand *et al.*, 2016] ont montré que la perte de masse n'est pas corrélée à la masse volumique réelle ou à l'absorption d'eau à 24 heures.

[Dao, 2012] a proposé le modèle suivant pour estimer la teneur en mortier lorsque la composition du béton primaire est connue :

$$\text{Anat}_{\text{GBR}} = \frac{(\rho_{\text{B-GBR}} - \rho_{\text{B-parent}}) + (\rho_{\text{G-parent}} - \rho_{\text{GBR}}) \times \text{Anat}_{\text{B-parent}}}{\rho_{\text{G-parent}} - \rho_{\text{B-parent}}} \quad (2.1)$$

avec :

- Anat_{GBR} , la proportion volumique de granulats naturels dans le béton de GBR ;
- $\text{Anat}_{\text{B-parent}}$, la proportion volumétrique de granulats naturels dans le béton parent ;
- ρ_{GBR} , la masse volumique du GBR ;
- $\rho_{\text{B-parent}}$, la masse volumique du béton parent ;
- $\rho_{\text{G-parent}}$, la masse volumique du granulat parent.

Cette relation repose sur l'hypothèse que la méthode utilisée n'endommage pas le granulat primaire.

Dans un procédé industriel, l'évaluation globale de l'efficacité doit être complétée par d'autres mesures, telles la consommation énergétique, les émissions sonores, les risques sanitaires, etc. La production de déchets de deuxième génération doit aussi être évaluée. La comparaison objective de l'efficacité des procédés est donc difficile à réaliser.

2.3. Résultats RECYBETON

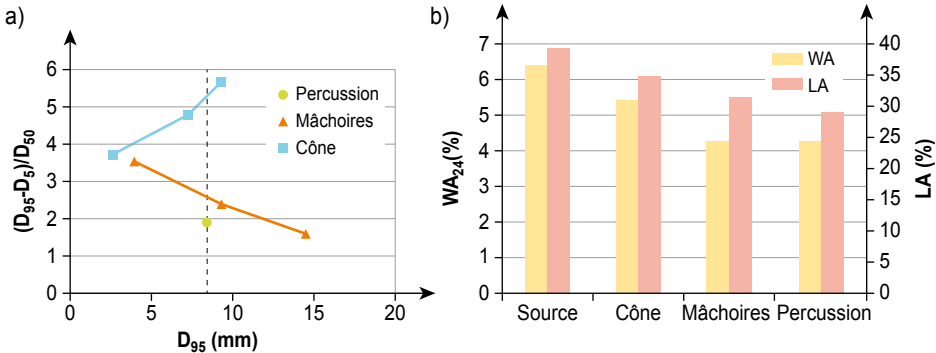
2.3.1. Concassage

Le concassage des granulats de béton recyclé (GBR) a été étudié sur un GBR de classe 10/20 mm traité dans des concasseurs de laboratoire de type giratoire, à mâchoire ou à percussion. Trois tailles de passants ont été analysées pour le concasseur à mâchoires et le concasseur à percussion et une seule taille pour le concasseur giratoire. Les résultats sont présentés Figure 2.2 [Hamard et Cazacliu, 2014a].

Le but du concassage est la réduction de la taille des classes granulaires. La production de classes étroites facilite le contrôle du produit. La Figure 2.2a présente l'étendue granulaire relative du GBR concassé en fonction de la taille maximale du granulat concassé, pour le concasseur giratoire, à mâchoire et à percussion de laboratoire. Pour une même taille maximale, le concasseur giratoire et le concasseur à mâchoires produisent des GBR de classes plus étroites. Le concasseur à mâchoires produit des classes de GBR d'autant plus étroites que l'énergie de concassage est faible. Par contre, le concasseur à percussion produit des classes de GBR plus étendues lorsque la taille maximale du GBR est plus grande.

Figure 2.2

a) étendue granulaire relative $((D_{95}-D_5)/D_{50})$ du GBR concassé avec un concasseur giratoire, à mâchoire et à percussion, selon le diamètre du passant à 95 % (D_{95}). La granularité a été déterminée selon la norme EN 933-1 ; b) absorption d'eau à 24 heures (Ab_{24}) selon la norme EN 1097-6 et résistance aux chocs (LA) selon la norme EN 1097-2, pour le GBR source et le GBR concassé avec le concasseur giratoire, à mâchoire et à percussion [Hamard et Cazacliu, 2014a].



Le mortier adhérent a un effet négatif sur la résistance mécanique et sur l'absorption d'eau des GBR. Le concassage réduit la teneur en mortier adhérent et, par conséquent, améliore les propriétés des GBR. L'absorption d'eau et la résistance aux chocs des GBR issus des trois concasseurs de laboratoire sont reportées Figure 2.2b. Le concasseur à percussion et le concasseur à mâchoires produisent des GBR dont l'absorption d'eau est plus faible, tandis que le concasseur giratoire produit des GBR ayant une absorption d'eau intermédiaire entre le granulat d'origine et les autres GBR. La meilleure résistance aux chocs a été atteinte avec le GBR produit par le concasseur à percussion, et la moindre résistance aux chocs avec le concasseur giratoire. Dans cette étude en laboratoire sur la qualité des GBR, le meilleur concasseur est celui à percussion ; le moins efficace est le giratoire. Toutefois, sur la base des essais réalisés, il est difficile d'étendre ces résultats aux concasseurs industriels.

2.3.2. Jig à eau

Le jiggage à eau, dont le matériel est présenté au § 2.2.4, est un procédé de séparation par gravité basé sur la différence de densité entre matériaux. Alors que les jig à eau sont couramment utilisées pour l'enrichissement des minerais dans l'industrie minière, leur utilisation dans le tri des DCD est encore une technologie et un procédé qui restent innovants. La capacité d'une jig à eau de laboratoire à récupérer le béton a été évaluée par une série d'essais. L'approche expérimentale a consisté à appliquer le jiggage à plusieurs échantillons composés de différents matériaux de construction [Le

Guen, 2015]. Les échantillons testés étaient des mélanges de GBR, de gypse et de brique. La teneur en GBR a varié entre 90, 80 et 60 %. Le Tableau 2.2 présente les différents échantillons utilisés dans cette campagne.

Tableau 2.2

Composition des échantillons comportant des GBR, du gypse et de la brique, pour les essais de jiggage à eau : a) échantillons binaires de granulométrie 10/20 ; b) échantillons binaires de granulométrie 4/20 ; c) échantillons ternaires de granulométrie 10/20.

Tableau 2.2.a

Matériaux		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6
10/20	Taille % GBR	90	80	60	90	80	60
	% gypse	10	20	40	0	0	0
	% briques	0	0	0	10	20	40

Tableau 2.2b

Matériaux		Essai 7	Essai 8
10/20	Taille % GBR	90	80
	% gypse	10	20
	% briques	0	0

Tableau 2.2c

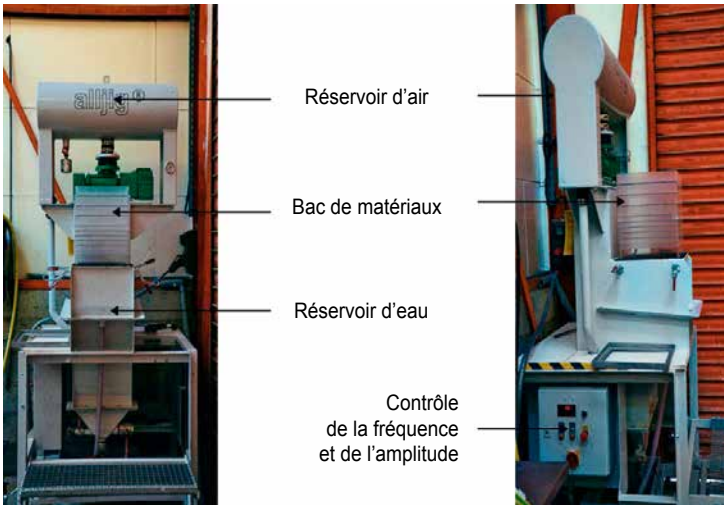
Matériaux		Essai 13	Essai 14
4/20	Taille % GBR	60	80
	% gypse	20	10
	% briques	20	10

L'appareil utilisé était une jig à eau de laboratoire (ou stratificateur), composée de quatre éléments principaux (Figure 2.3) :

- un conteneur dédié aux matériaux, en Plexiglas, composé de onze niveaux repères. Il est ainsi plus facile de composer l'échantillon étudié en respectant des ratios prédéfinis ;
- un réservoir d'eau placé entre la cuve et le réservoir d'air ;
- un réservoir d'air raccordé à un piston ;
- un tableau électrique réglant les paramètres de fonctionnement.

Figure 2.3

Vues de la jig à eau Alljig, sans matériaux dans le conteneur



Crédit photo : L. Je Guen, IFSTTAR.

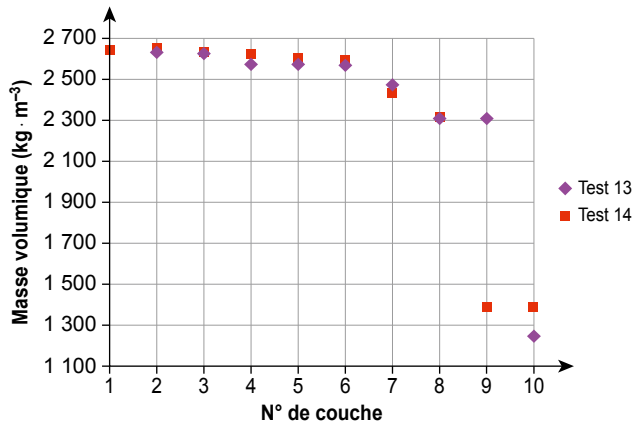
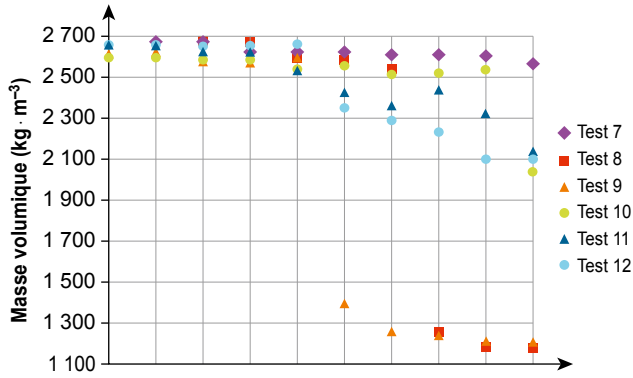
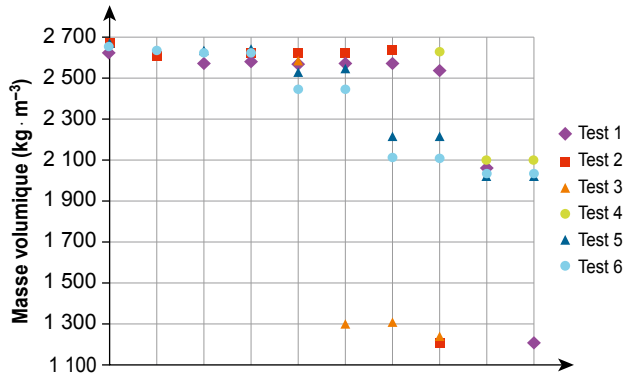
Au début de l'essai, le matériau est placé couche par couche dans le réservoir de la jig, avec le composant le plus léger au fond du récipient. Après 20 minutes de jiggage, la masse volumique des grains se trouvant dans chacune des 10 couches a été mesurées selon la norme EN 1097-6. La Figure 2.4 présente le profil de masse volumique pour chaque échantillon testé (Tableau 2.2).

Chaque profil de masse volumique présente soit une discontinuité nette, soit une diminution linéaire en fonction de la hauteur dans le conteneur. Pour les trois essais effectués avec le mélange de GBR et de gypse 10/20 (essais 1, 2 et 3), on peut noter que la discontinuité de la masse volumique varie selon le pourcentage de gypse. Lorsque le gypse est remplacé par la brique (essais 4, 5 et 6), la masse volumique diminue plus progressivement avec la hauteur. Les mélanges 4/20 mm suivent les mêmes tendances. Pour cette taille, la concentration en béton dans les couches inférieures est plus élevée. Enfin, pour les essais effectués avec les mélanges ternaires (GBR, brique et plâtre), la concentration du béton dans les couches inférieures reste élevée, mais un certain mélange entre les éléments de brique et de plâtre est observé dans les couches supérieures (essais 13 et 14).

En conclusion, une bonne concentration et récupération du béton a été obtenue dans les couches inférieures. La granulométrie initiale n'a pas modifié significativement cette tendance. La stratification des mélanges ternaires est moins bonne que celle des mélanges binaires.

Figure 2.4

Profils de masse volumique ; les couches sont numérotées du bas vers le haut



2.3.3. Tri par capteur

2.3.3.1. *Essais en laboratoire*

Le tri par capteurs optiques et le tri par capteur proche infrarouge (NIR) ont été testés à l'échelle du laboratoire sur des grains dispersés de DCD [Le Guen, 2015]. Pour ces essais, les images des échantillons ont été prises avec une caméra Nikon D200 SLR. Elles ont été traitées avec le logiciel PACT développé par Tomra, fabricant de machines de tri. L'analyseur pour les essais NIR est un spectromètre FTIR Spotlight 400 de chez Perkin Elmer.

Les grains testés étaient composés de béton, de mortier, de brique, de céramique, d'enrobé, de gypse, de verre et de métal, avec des tailles comprises entre 10 et 30 mm.

La procédure d'essai a été la suivante. 45 éléments ont été prélevés dans l'échantillon contenant les 8 matériaux. Pour les tests optiques, ils ont été photographiés (humides et secs) et les images ont été traitées avec le programme de séparation optique. Parallèlement, un spectromètre NIR a analysé les mêmes particules (uniquement sèche dans cette première étape). Les spectres NIR ont été analysés dans la bande de longueurs d'ondes 1 000 à 2 500 nm, qui est la plage habituelle des trieuses NIR industrielles.

L'analyse optique différencie facilement les fragments de béton de ceux d'asphalte, de brique, de plâtre, de métal et de verre. Pour la céramique et le mortier, les résultats sont meilleurs en conditions humides.

Les résultats des mesures NIR ont donnés de bons résultats pour séparer le béton du bitume, du verre, du métal et du gypse. La brique, la céramique et le mortier sont plus difficiles à séparer du béton par cette technique.

2.3.3.2. *Essais à échelle industrielle*

Les essais à échelle industrielle ont été réalisés avec une technologie de tri optique visant à extraire le plâtre d'un DCD « classique ». La technologie est développée par la société Pellenc Selective. La détection du matériau par sa couleur est réalisée par l'association de capteurs de proximité infra-rouge et de rayons X.

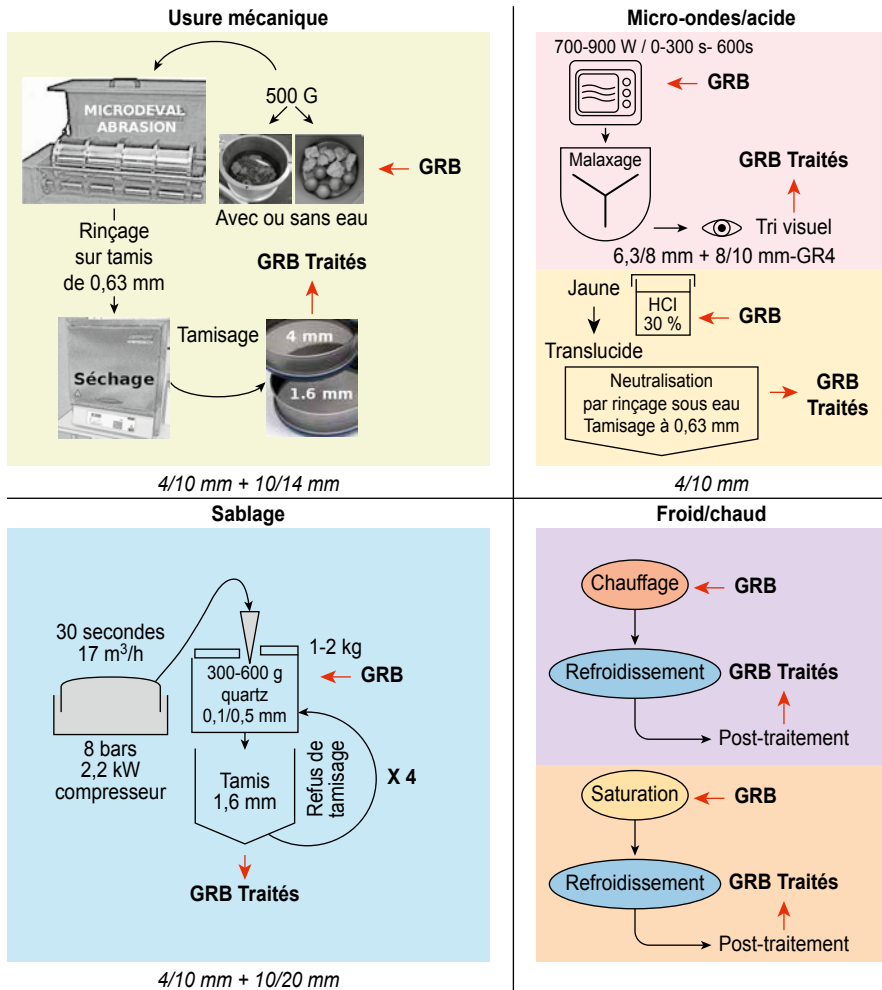
Concernant les résultats, le niveau d'efficacité, défini par le rapport entre les matériaux récupérés et les matériaux en entrée, est estimé à 82 %, avec une perte de granulats égale à 5 % et une récupération complète du bois et du gypse. Les données obtenues par les essais à échelle industrielle démontrent donc la bonne efficacité du procédé de tri optique pour une application spécifique au tri des DCD, avec une grande capacité de valorisation.

2.3.4. Libération

La Figure 2.5 présente les différents procédés testés dans une première étape : usure mécanique, sablage, micro-ondes, traitement thermique et traitement à l'acide [Braymand *et al.*, 2016]. Ces procédés ont été testés avec des granulats recyclés de différentes origines.

Figure 2.5

Procédés simples de séparation testés en laboratoire



Plusieurs critères ont été pris en compte pour désigner le processus le plus pertinent : efficacité du nettoyage du granulat naturel parent, non-endommagement du granulat parent durant le traitement, valorisation possible

des déchets de deuxième génération, transférabilité à une échelle semi-industrielle, impact limité sur l'environnement et la santé, coûts.

L'étude a montré que les technologies simples (micro-onde à faible consommation d'énergie ou sablage) sont inefficaces. Les procédés chimiques ne sont techniquement applicables que si le granulat parent ne réagit pas avec l'acide choisi. Ils peuvent être considérés comme méthodes de référence [Zhao *et al.*, 2013a], mais ils sont difficilement adaptables à échelle industrielle, compte tenu de leur impact sur la santé et l'environnement.

Les traitements individuels sont assez efficaces pour éliminer le mortier sans endommager le granulat primaire : la masse volumique réelle reste cependant inférieure à celle du granulat naturel, et l'absorption d'eau est plus élevée.

La combinaison des avantages de chaque procédé décrits ci-dessus conduit à retenir les traitements thermomécaniques proposés ci-après [Shima *et al.*, 2005], qui combinent plusieurs procédés et leurs avantages respectifs. Les Figure 2.6 et 2.7 présentent les deux procédés thermomécaniques retenus (à chaud et à froid), et leurs paramètres et plages de variation. Le procédé complet comprend une phase de prétraitement (immersion ou saturation dans l'eau), un traitement thermique, un post-traitement mécanique (usure et/ou chocs), une étape de séparation par tamisage et un contrôle de la qualité (du résultat).

Figure 2.6

Procédés thermomécaniques haute température et combinaisons de leurs paramètres (69 essais)

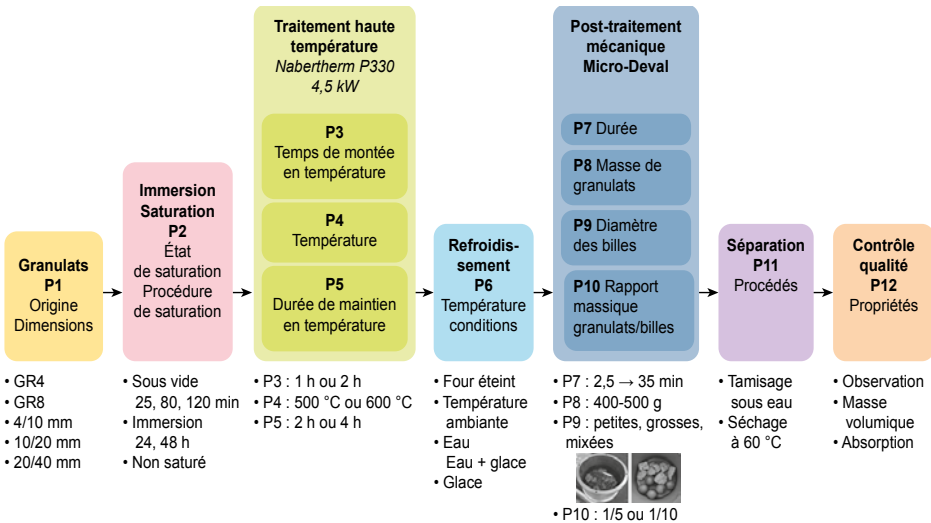
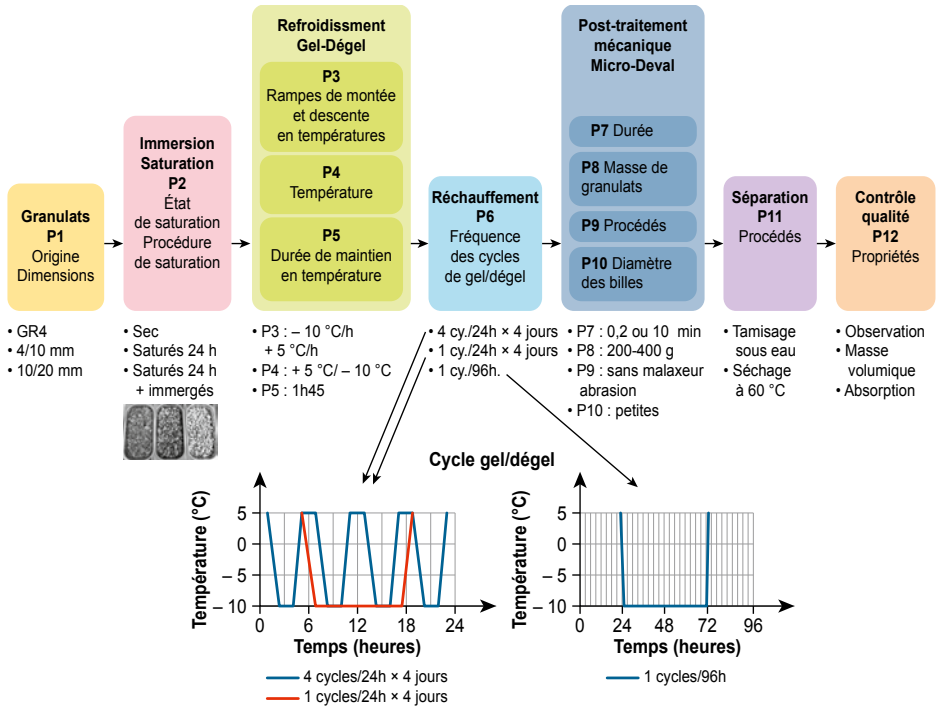


Figure 2.7

Procédés thermomécaniques basse température et combinaison de leurs paramètres (54 essais)



Les procédés thermiques haute température provoquent l'endommagement du mortier par dilatation différentielle et par dégradation des phases minérales (hydrates du ciment). Une température supérieure à 500 °C est nécessaire pour obtenir un résultat satisfaisant, notamment pour dégrader la Portlandite [de Juan et Gutiérrez, 2009 ; Fares *et al.*, 2010]. [Homand-Etienne et Houpert, 1989] montrent qu'une température de 600 °C est nécessaire pour dégrader le mortier dans le cas de granulats siliceux parents, par transformation allotropique du quartz.

L'efficacité du procédé complet, comprenant la saturation préalable ou le refroidissement rapide après chauffage (tel que présenté par [Bazant et Kaplan, 1996] et confirmé par [de Juan et Gutiérrez, 2009]) a été effectué et analysé dans le but d'identifier les paramètres pertinents.

Les dommages causés au mortier primaire par les cycles de gel-dégel sont principalement dus aux contraintes thermiques liées à l'expansion de l'eau transformée en glace. Une saturation préalable élevée de l'échantillon peut améliorer l'efficacité du procédé [Yang *et al.*, 2006].

Les dommages causés au mortier primaire par un procédé thermique à chaud sont principalement dus à la dégradation de la liaison mortier/granulat, du moins si la température est supérieure à 500 °C. Dans un second temps, un post-traitement mécanique par usure (MDE par exemple) peut être efficace pour améliorer la séparation, avec un temps d'application de 30 minutes au moins, ce que confirment les travaux de [Yoda *et al.*, 2003]. Une durée de traitement suffisamment longue et une consommation énergétique élevée sont nécessaires pour atteindre une efficacité minimale par un traitement abrasif par chocs (20 minutes dans la machine Los Angeles).

La plupart des auteurs définissent l'efficacité du nettoyage des GBR par la perte de masse uniquement. Les premiers essais réalisés ont montré que cette approche était insuffisante. Il convient de rappeler que la masse volumique des granulats propres traités s'approche de celles du granulat parent. Toutefois, à l'issue des essais thermomécaniques, aucune réelle corrélation entre perte de masse de l'échantillon et masse volumique du matériau traité n'a été observée [Braymand *et al.*, 2017b]. Pour les expériences thermomécaniques, plusieurs critères ont été sélectionnés pour apprécier leur efficacité : l'aptitude à nettoyer les granulats, leur intégrité finale, la possibilité de récupérer les résidus de mortier en vue de leur valorisation, la capacité d'adaptation à une échelle semi-industrielle, les impacts sur l'environnement et sur la santé, le coût.

À titre d'exemple, le Tableau 2.3 présente les résultats obtenus avec les deux méthodes optimisées, dont les paramètres sont :

- traitement thermomécanique à chaud :
 - pas de saturation,
 - montée à une température de 600 °C en une heure,
 - 2 heures de traitement thermique,
 - refroidissement à la température ambiante,
 - 10 minutes de traitement d'usure avec des billes de grande taille ;
- traitement thermomécanique à froid :
 - échantillon saturé et immergé,
 - 4 cycles par jour pendant 4 jours,
 - de + 5 °C à – 10 °C,
 - gradient de température de – 10 °C/h et de + 15 °C/h
 - 10 minutes de traitement d'usure avec des billes de petite taille.

Tableau 2.3

Traitement thermomécanique ; résultats du procédé optimisé



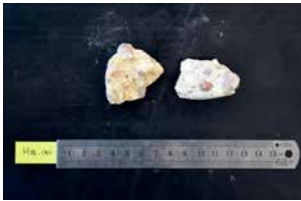


GBR 10/20		Traitement à froid	Traitement à chaud
Perte de masse après traitement	%	4,38	4,59
Perte de masse après post-traitement mécanique	%	11,35	25,59
		Billes MDE	
Perte de masse totale	%	16,47	28,86
Particules fines (< 1,6 mm)	%	1,95	9,77
Masse volumique initiale de l'échantillon		2,24	2,24
Masse volumique de l'échantillon traité		2,29	2,21

La masse volumique moyenne du matériau traité avant tri est inférieure à celle du matériau non traité (2,21 vs 2,24) car il contient non seulement des granulats propres mais aussi des granulats avec du mortier non détaché et des granulats endommagés. Ce résultat met en évidence la nécessité de trier le matériau après traitement. À l'heure actuelle, le contrôle et le tri visuels sont toujours les méthodes les plus appropriées pour analyser la propreté des granulats, bien que l'observation soit subjective et que les grains endommagés peuvent ne pas être détectés.

Le pourcentage massique de granulats nettoyés pouvant être réutilisés est faible (19 %). Toutefois, les granulats obtenus sont de bonne qualité. En outre, 24 % des granulats traités sont propres mais cassés, 18 % sont du mortier et 27 % sont partiellement nettoyés. Le reste est composé de fines. La masse volumique, la porosité et l'absorption d'eau mesurées pour chaque type de granulats sont présentées dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4

Masse volumique, porosité et absorption d'eau mesurées sur chaque type de granulats

Granulat	Masse volumique	Porosité	Absorption d'eau	Image
4/10 propre en non endommagé	2,72 g/cm ³	2,70 %	0,99 %	
Propre et endommagé	2,35 g/cm ³	2,41 %	5,67 %	
Partiellement propre	2,39 g/cm ³	8,21 %	3,43 %	
Mortier	2,09 g/cm ³	17,67 %	8,46 %	
Granulat non traité	2,25 g/cm ³	12 %	6 %	
GBR 4/20 initial	2,55 g/cm ³	1 %	0,75 %	

2.4. Besoins de recherche

Le développement d'équipements de tri adaptés aux DCD est encore embryonnaire. Actuellement, les technologies existantes sont souvent trop coûteuses et leur utilisation n'est pas justifiée par une efficacité satisfaisante. Des efforts de recherche sont donc nécessaires pour adapter les technologies existantes aux particularités des DCD et pour réduire le risque économique associé aux investissements dans de nouvelles technologies. Il convient de souligner que le développement d'un nouvel équipement doit tenir compte des interactions entre les différentes unités opérationnelles, et que la recherche doit se concentrer sur des procédés intégrés. Évidemment, la méthode de tri en continu doit être utilisée, car les systèmes par lots (discontinus) ne sont pas adaptés dans une usine de recyclage.

2.5. Conclusions

Les expériences réalisées dans le cadre du Projet National RECYBETON ont apporté des éléments pour une meilleure compréhension de plusieurs procédés d'élaboration des GBR, qui peuvent potentiellement améliorer les pratiques actuelles.

Concernant le concassage, aucun procédé spécifique n'a été distingué comme étant capable de produire des GBR ayant à la fois un spectre granulaire réduit et une bonne qualité. Plusieurs stratégies sont possibles, selon que l'on cherche à récupérer le maximum de granulats naturels, ou à maximiser la réutilisation des DCD. Des essais en vraie grandeur seraient nécessaires pour confirmer les résultats de laboratoire.

Le tri par densité a été également étudié. Les essais ont démontré la capacité de la jig à eau appliquée au béton, à la brique et au plâtre. L'efficacité de ce procédé a été validée pour des mélanges binaires et ternaires. Il en ressort que le gypse est facilement séparé des mélanges où il se trouve, tant pour les compositions binaires que ternaires, en raison de sa différence de densité avec les (deux) autres matériaux testés (brique et béton concassé). Pour la brique, l'efficacité du tri est moins probante, en raison de la faible différence de densité avec les GBR, notamment. L'efficacité du tri est cependant améliorée lorsqu'une grande quantité de brique est présente. Globalement, le procédé de jig à eau est pertinent pour trier le béton, la brique et le plâtre. Son efficacité est satisfaisante jusqu'à des taux relativement faibles de matériaux « non désirés » (environ 10 %). Il serait opportun d'associer ce procédé à d'autres procédés, comme le tri par capteurs, afin d'affiner le tri en fin de chaîne, en particulier pour séparer la brique résiduelle du béton.

Les essais de tri par capteur optique ont donné des résultats prometteurs. Tout d'abord, le capteur différencie clairement la brique rouge, le gypse blanc,

l'enrobé sombre, le verre transparent et le métal gris foncé du béton. La séparation du mortier et de la céramique du béton a été plus difficile. En effet, la céramique possède beaucoup de couleurs différentes, donc certaines sont similaires à celles des fragments de béton. Le mortier a généralement des couleurs similaires à celles du béton. Néanmoins, en conditions humides, les petites différences qui existent peuvent être suffisamment exacerbées pour obtenir un béton propre. Plus généralement, le tri optique des grains humides a donné de meilleurs résultats qu'à sec.

Par ailleurs, les mesures NIR ont également montré une bonne capacité à distinguer la brique, le gypse, l'enrobé, le verre, le métal, le mortier et la céramique du béton. Pour le mortier et les céramiques, les résultats sont meilleurs que pour le tri optique.

Enfin, la libération du granulats d'origine a été étudiée. Peu de technologies existantes peuvent être transposées à échelle industrielle, à coûts environnementaux et économiques raisonnables. Le traitement à haute ou à basse température favorise l'endommagement du mortier, qui peut ensuite être libéré du granulats parent grâce à un post-traitement mécanique.

D'autres conclusions peuvent également être formulées :

- une perte de masse élevée n'est pas synonyme d'un traitement efficace ;
- pour les traitements thermiques à haute température, une température allant jusqu'à 600 °C est nécessaire pour dégrader les constituants tels que les CSH et la Portlandite. Cependant, cette température endommage les granulats calcaires et silico-calcaires ;
- pour le traitement thermique à basse température, les conditions industrielles ont limité la valeur de la température appliquée et la durée du traitement, ce qui a réduit son efficacité. L'immersion et la saturation sont recommandées avant l'application du froid pour assurer une meilleure libération du mortier ;
- pour obtenir un granulats propre, un tri visuel est nécessaire pour compléter le tri par tamisage ;
- l'efficacité effective des traitements, caractérisée par la proportion de matériau nettoyé et non endommagé par rapport à la quantité initiale, est faible pour les traitements étudiés et elle n'a pas dépassé 26 %.

Chapitre 3.

Caractérisation des granulats de béton recyclé

S. Rémond¹, J.M. Mechling², E. Garcia-Diaz³, R. Lavaud⁴,
R. Trauchessec², B. Cazacliu⁵

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. Heidelbergement 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 (A_b) 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' A_b 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 heures pour quasi-saturer le mortier adhérent, puis chauffés à 500 °C pendant 2 heures, 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 granulats 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 granulats 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, affaiblit 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 des 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 granulats naturels, et aussi parce que les méthodes de séparation endommagent le granulats naturels.

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 fraction 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 C₄AF). 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

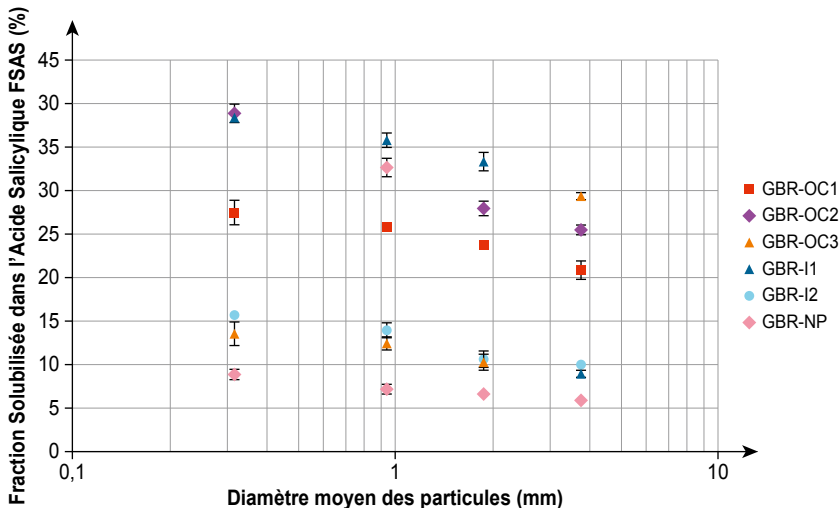
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
Pâte de ciment blanc	95,5	96,4	94,9	95,6
Pâte de ciment gris	62,6	63,1	63,3	63,0
Sable siliceux	0,8	0,9	0,9	0,9
Sable calcaire	3,4	3,0	3,2	3,2

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 (PM₁₀₅₋₄₇₅), 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 ($Rb + Ra \approx 20\%$), 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

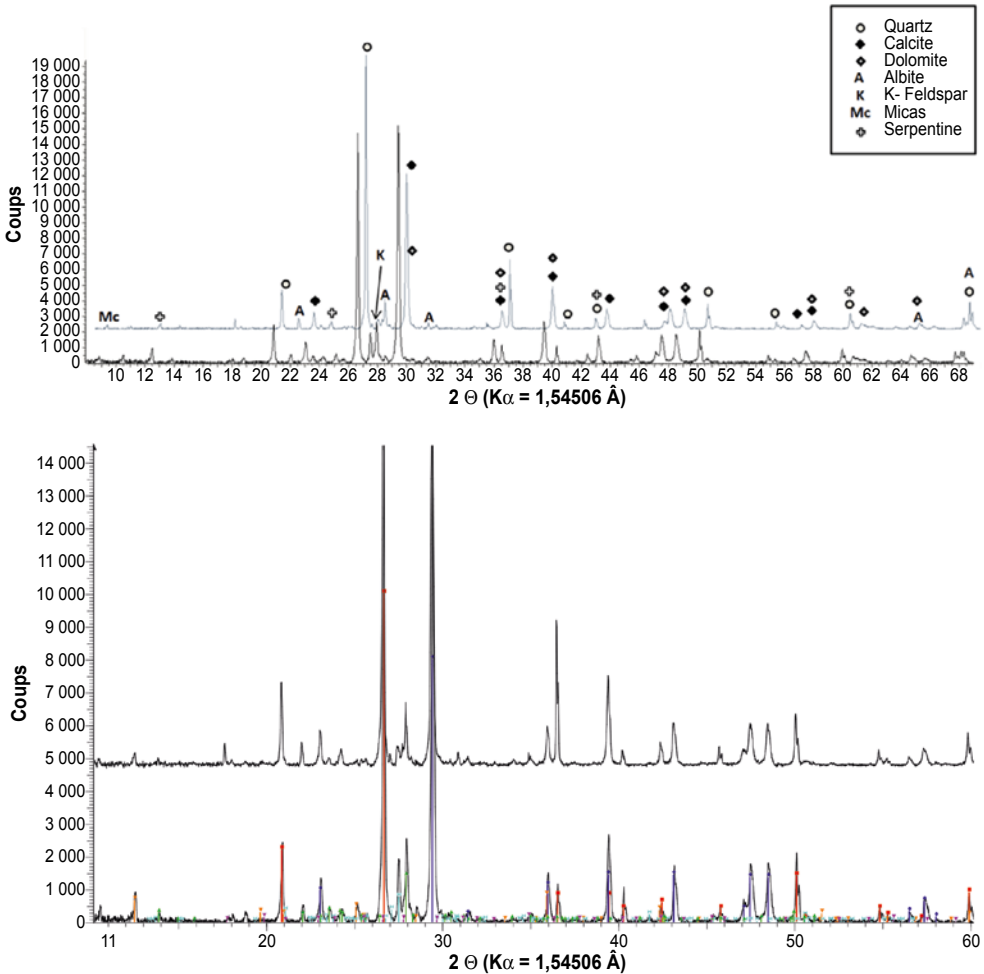
Principaux minéraux détectés par DRX, à l'exclusion du quartz et de la calcite (fortement présents)

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 - P321 (154) - 3 - 113,005 - I/lc 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/lc 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,*f*e)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 - KAISi₃O₈ - 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/lc 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 : $3,2 \times 2,6$ mm (analyse en lumière polarisée)



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 ₂ O 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 ₂ O 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 ₂ O	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 ₂ O	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 ₂ O 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).

$$\text{Teneur GBR} = \frac{P_{\text{mélange}} - P_{\text{GN}}}{P_{\text{GBR}} - P_{\text{GN}}} \quad (3.1)$$

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 $Ab_{24,\text{GBR}} = 10 \pm 0,5$), 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, $Ab_{24\text{GBR}} > 11 \times Ab_{24\text{GN}}$). 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...

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

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 $2\,327\text{ kg/m}^3$ pour les gravillons et $2\,065\text{ kg/m}^3$ 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 CO₂ 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 · L ⁻¹)	Écart moyen (g · 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 · L ⁻¹)	Écart moyen (g · 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 mate 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.

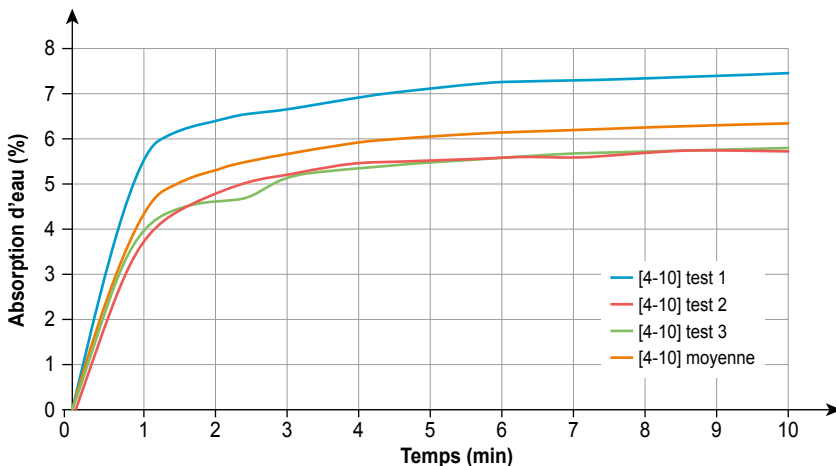
Selon la norme [NF P 18-545, 2011] article 10, les granulats de béton recyclé (GBR) utilisés dans le Projet National RECYBETON sont classés « Code C » pour l'absorption d'eau, ce qui interdit leur utilisation pour la fabrication de bétons exposés à certains environnements agressifs ou pour certaines 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, à 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 Tegger, 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	
		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/m³, 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.

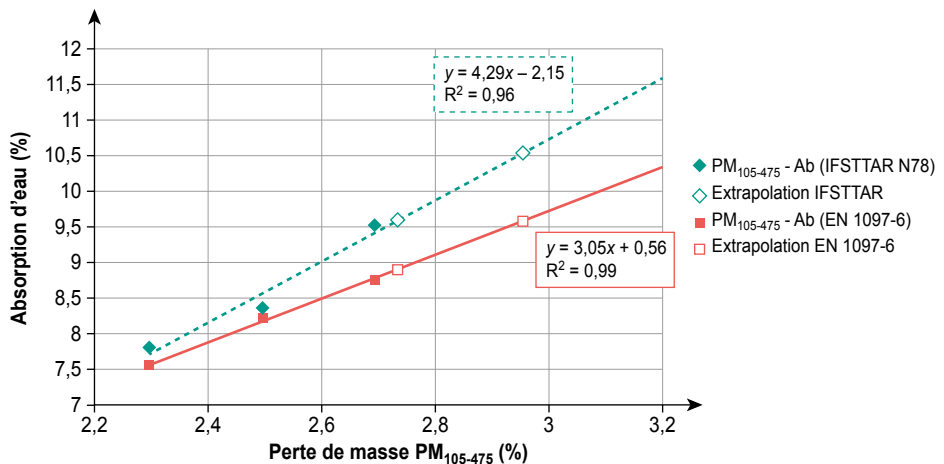
$$Ab_{GBR} = Ab_{PCD} \times PCD + Ab_{GN} \times (1 - PCD) \quad (3.3)$$

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 ($PM_{105-475}$).

[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 $PM_{105-475}$ 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 $PM_{105-475}$ 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 $PM_{105-475}$ a ensuite permis d'identifier Ab_{24} des deux fractions fines à partir de leur $PM_{105-475}$ (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 granulats naturels 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 granulats naturels 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 granulats 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 :

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

- K_g : constante granulaire de Féret : $4,5 < K_g < 5,5$ pour les granulats naturels ;
- $f_{c_{28}}$: résistance à la compression du béton à 28 jours ;
- $f_{cm_{28}}$: 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 ;
- V_a 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 :

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

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 :

$$f_{c_{28}} = \frac{p f_{cm_{28}}}{(q f_{cm_{28}} + 1)} \quad (3.7)$$

- $f_{c_{28}}$: la résistance à la compression du béton à 28 jours en MPa ;
- $f_{cm_{28}}$: 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) :

$$f_{cm_{28}} = 13,4 R_{c_{28}} \left[\frac{V_c}{V_c + V_e + V_a} \right]^{2,85} (\text{EMP})^{-0,13} \quad (3.8)$$

où V_c , V_e , et V_a sont respectivement le volume de ciment, d'eau et d'air dans la matrice. $R_{c_{28}}$ 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 :

$$f_{c_{28}} = p f_{cm_{28}} \quad (3.9)$$

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).

$$\lim_{f_{cm_{28}} \rightarrow \infty} f_{c_{28}} \rightarrow \frac{p}{q} \quad (3.10)$$

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.

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

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]

Classe du béton d'origine	Granulat d'origine	Sable		Mélange sable/gravillon	
		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 granulats concassé siliceux naturel (10/14) pris comme granulats 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 granulats 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 granulats 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 granulats naturel et un GBR de différentes tailles

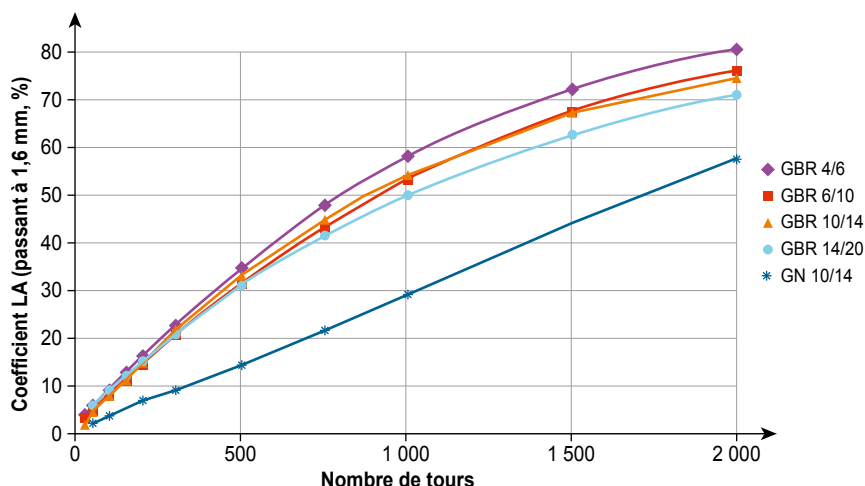
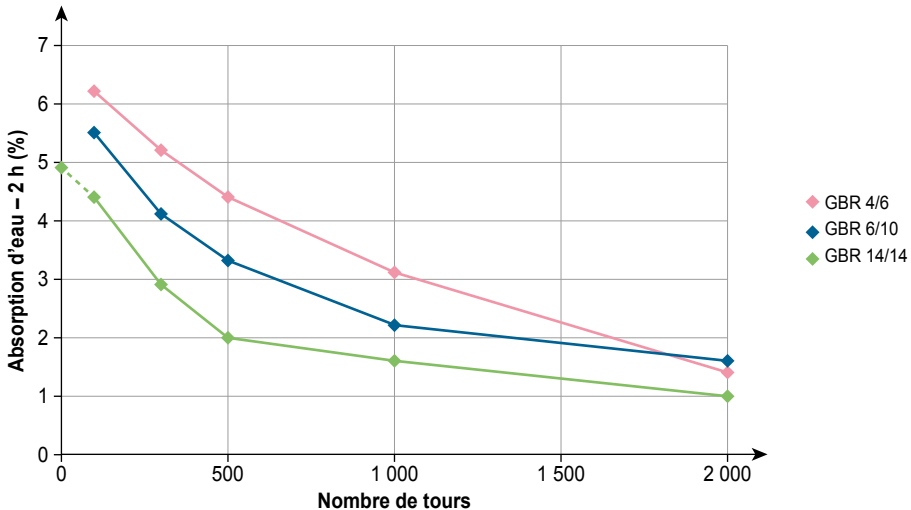


Figure 3.8

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

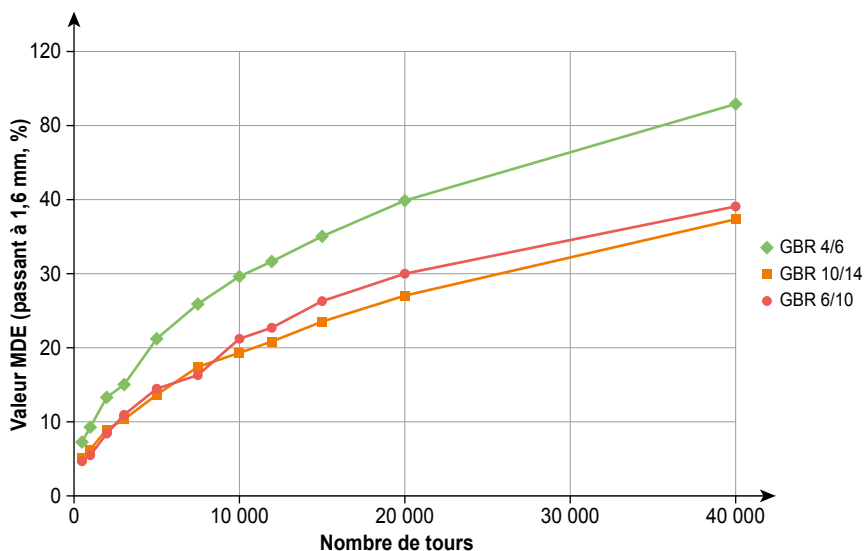


et qu'elle a ensuite tendance à se stabiliser à une valeur supérieure, mais proche de celle du granulat naturel d'origine. Ces résultats suggèrent que la majeure partie du mortier adhérent est séparée dès les premiers tours dans la machine Los Angeles, mais aussi qu'il s'agit surtout des éléments les 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 A_b . 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).

Partie II.

Liants incorporant des granulats de béton recyclé

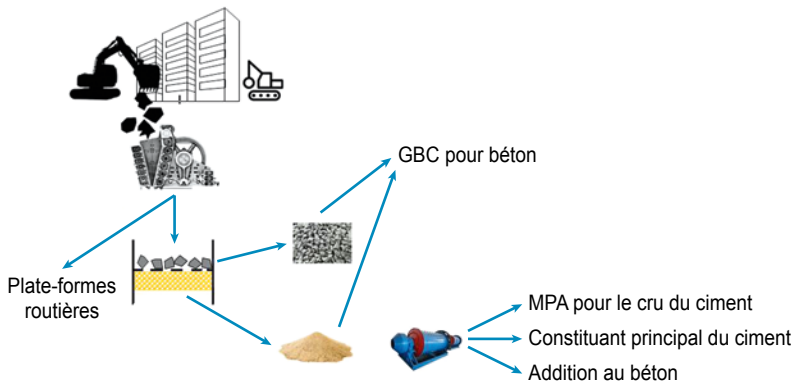
Laurent Izoret, ATILH

Les parties III et IV de ce livre montreront que le sable obtenu lors du concassage du béton recyclé (qui représente environ 50 % de la masse totale des déchets traités, selon le type et l'utilisation des concasseurs) est moins facile à utiliser dans un nouveau béton, comparativement aux gravillons.

Par conséquent, comme le sable est un « produit fatal » du processus de concassage, une solution alternative est de l'utiliser dans le cru cimentier, ou encore de le broyer et de le transformer en un composant du ciment (en substitution partielle du clinker) ou en un ajout au béton.

Les alternatives mentionnées ci-dessus représentent trois solutions viables pour le recyclage des sables de GBR :

- a) comme matière première alternative (MPA) pour le cru Portland ;
- b) comme constituant principal du ciment Portland autre que le clinker et ;
- c) comme ajout au béton. La première utilise le sable sans réduction granulométrique (« tel quel »), les deux autres après une nouvelle réduction de la granulométrie (broyage fin). Ces trois solutions sont représentées schématiquement ci-après (voir les options en bas à gauche).



Cette partie de l'ouvrage comprend deux chapitres. Leur objectif est d'estimer la faisabilité de chacune de ces solutions (chapitre 4, option a ; chapitre 5, options b et c), même si l'option a) a déjà été étudiée précédemment [Galbenis et Tsimas, 2006 ; De Schepper *et al.*, 2013 ; Schoon *et al.*, 2015 ; Marrocoli *et al.*, 2016]. Mais elle restait à démontrer à échelle industrielle en France.

Chapitre 4.

Béton recyclé utilisé comme matière première alternative pour la fabrication du clinker portland

C. Diliberto¹, L. Barnes-Davin², L. Izoret³, A. Lecomte¹,
J.-M. Mechling¹, P. Natin^{†2}

Résumé – Comme indiqué dans l'introduction générale, l'utilisation de la fraction fine des granulats de béton recyclé (GBR) comme matière première alternative pour la production du clinker Portland est l'une des trois options envisagées pour le recyclage du béton. Elle est basée sur l'hypothèse vraisemblable que la composition chimique et minéralogique d'un sable de GBR est principalement contrôlée par la nature des sables et gravillons locaux ayant servi à fabriquer le béton parent, qui sont le plus souvent, en première approximation, de nature silico-calcaire (même si des granulats tout siliceux ou tout calcaire existent dans certaines régions). De ce fait, ils peuvent apporter au système les principaux éléments chimiques souhaités, c'est-à-dire le calcium et la silice.

L'estimation de la valeur potentielle d'un matériau alternatif entrant dans un cru cimentier est un problème classique qui peut être résolu en appliquant une approche semi-expérimentale : connaissant la composition chimique de chaque constituant sélectionné, elle revient à chercher, par itérations successives, les proportions du mélange cru donnant la composition du futur clinker [Bogue, 1929], en respectant divers indicateurs de cuisson. Cette approche a été implémentée dans une feuille de calcul Excel où le solveur sert à trouver le taux optimum de substitution des matières premières traditionnelles par le ou les matériaux alternatifs, en optimisant à la fois la composition potentielle du futur clinker et les indicateurs de cuisson.

La méthode a été appliquée à quatre sables de GBR provenant de quatre régions françaises différentes (contextes géologiques distincts), puis à la production d'un clinker Portland à échelle industrielle.

1. Université de Lorraine, Institut Jean Lamour, Nancy.

2. Vicat Centre Technique, L'Isle-d'Abeau.

3. ATILH, Paris La Défense.

4.1. Introduction

Le recyclage de sous-produits industriels en tant que matières premières alternatives dans le cru cimentier, pour leur intérêt chimique, remonte à plus de 20 ans. Cette pratique est connue sous l'appellation « ingénierie d'enrichissement par matériaux alternatifs ». Elle a déjà concerné un grand nombre de sous-produits, tels les sables de fonderie ou les boues d'alumine. Cependant, jusqu'à présent, en raison des faibles quantités disponibles, elle n'a jamais été appliquée aux déchets de construction et de démolition (DCD). Ce chapitre est consacré au recyclage des sables de GBR en tant que matière première alternative entrant dans le cru destiné à produire le clinker Portland, sur la base tout d'abord d'études en laboratoire destinées à déterminer le taux maximum de substitution possible puis, à plus grande échelle, avec la production industrielle d'un clinker dont le cru contenait une teneur significative de sable de GBR (plus de 10 %).

4.2. État de l'art

4.2.1. Principes

Le cru cimentier est un mélange polyminéral et polydispersé [Chatterjee, 1991] dont la composition peut varier significativement en raison de la variabilité des matières premières constitutives. Malgré cette variabilité, la composition du cru doit suivre des règles strictes établies au regard des premiers travaux de Vicat [Vicat, 1817]. Ces règles stipulent que le dosage des constituants ne peut être fixé aléatoirement car il détermine les rapports entre les oxydes majeurs (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et CaO) qui, après dissociation thermique au cours de la cuisson, vont former les nouvelles phases minéralogiques du clinker (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF). La chaux libre résiduelle (CaO_L), parfois considérée comme la « cinquième phase » du clinker [Harrisson, 2010], est un indicateur de la qualité de la cuisson [Fundal, 1996].

Ces principes sont restés immuables, bien qu'ils aient été souvent affinés et améliorés. Le calcul de la composition du cru cimentier consiste alors à déterminer les proportions de matières premières qui donnent la composition chimique et minéralogique du futur clinker. La composition désirée découle d'hypothèses initiales sur la teneur en C_3S et C_3A , ainsi que sur la formation de la phase liquide [Taylor, 1997]. La méthodologie est basée sur une approche semi-empirique en deux étapes : i) caractérisation chimico-minéralogique des matériaux et du cru envisagé ; ii) essai de cuisson en laboratoire basé sur le calcul du mélange cru [Chatterjee, 1991 ; Fundal, 1996].

4.2.2. Calculs et méthodes analytiques

4.2.2.1. Formulation du cru, calculs

Une farine crue industrielle, issue de matières premières traditionnelles (calcaire, marne, argile, bauxite et oxyde de fer), est prise comme référence. Différentes variantes sont alors calculées sur la base de sa composition, en introduisant, dans le cas présent, des sables de GBR comme matières premières alternatives.

Concrètement, les proportions des différents constituants du mélange sont ajustées en cherchant à conserver au mieux le facteur de saturation en chaux (LSF), le module silicilique (SM), le module alumino-ferrique (AM) et la quantité de liquide à 1 400 °C et 1 450 °C du clinker de référence. Ces paramètres sont essentiels pour trouver la composition du cru car ils contrôlent directement la qualité du clinker [Christensen et Johansen, 1979 ; Oliveira, 1992 ; Lea, 2003]. Le calcul de LSF, SM, AM et du pourcentage de liquide à 1 400 °C et 1 450 °C est rappelé ci-après :

$$\text{LSF} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (4.1)$$

$$\text{SM} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (4.2)$$

$$\text{AM} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (4.3)$$

$$\% \text{ de liquide à } 1400 \text{ °C} = 2,95 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 2,2 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} \quad (4.4)$$

$$\% \text{ de liquide à } 1450 \text{ °C} = 3 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 2,25 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} \quad (4.5)$$

La quantification des phases minéralogiques est estimée à partir des formules de Bogue [Bogue, 1929]. Les calculs sont très proches de ceux de la norme CIPW dont les principes ont été établis dans les années 1900 par les pétrographes Croos, Iddings et Pirsson, et le géochimiste Washington. La minéralogie du clinker est calculée en se basant sur les minéraux typiques qui peuvent précipiter à basse pression dans un mélange porté à haute température, en considérant quatre contraintes sur l'évolution de leur cristallisation, et en posant des hypothèses sur la chimie des minéraux. Cette démarche relève d'une simplification de la géochimie des roches ignées typiquement rencontrées dans la nature. Dans la méthodologie de Bogue, le calcul est basé sur des contraintes similaires : en bref, Fe_2O_3 est consommé pour former C_4AF , et l'alumine restante (Al_2O_3) est consommée pour former C_3A . La teneur en C_3S et C_2S est déterminée en solutionnant simultanément deux équations, après avoir décompté la chaux consommée par les phases alumineuses et la chaux libre (CaO_L). [Stutzmann *et al.*, 2014] ont réalisé une étude sur l'origine et sur l'amplitude des variations de composition des quatre phases principales du

clinker, quantifiées selon Bogue, via une analyse de type « propagation des erreurs », en combinant l'effet des imprécisions de l'analyse chimique et de la variabilité de composition des matières premières. L'écart-type trouvé est d'environ 9,6 % pour l'alite et la bélite, et de 2,2 % et 1,4 % pour l'aluminate et la ferrite. Ces valeurs importantes, comparativement aux erreurs de mesure des teneurs en oxydes, sont attribuées aux incertitudes sur les constantes de Bogue. Cependant, jusqu'à l'apparition récente des techniques de quantification par diffraction des rayons X et raffinements Rietveld, les calculs de Bogue sont restés la méthodologie communément utilisée dans l'industrie cimentière.

Les équations de Bogue (modifiées par Taylor), prenant en compte la chaux libre, sont rappelées ci-après :

$$\%C_3S = 4,071(\%CaO - \%CaO_L) - (7,6 \% SiO_2 + 6,718 \% Al_2O_3 + 1,43 \% Fe_2O_3) \quad (4.6)$$

$$\%C_2S = -3,071(\%CaO - \%CaO_L) + 8,6 \% SiO_2 + 5,07 \% Al_2O_3 + 1,08 \% Fe_2O_3 \quad (4.7)$$

$$\%C_3A = 2,65 \% Al_2O_3 - 1,69 \% Fe_2O_3 \quad (4.8)$$

$$\%C_4AF = 3,04\%Fe_2O_3 \quad (4.9)$$

4.2.2.2. Tests de clinkérisation et préparation des échantillons

Afin d'évaluer la faisabilité de la clinkérisation d'une matière première alternative donnée, des essais préliminaires sont effectués en laboratoire.

Dans le cas présent, les différents matériaux ont été co-broyés dans un broyeur à anneau puis homogénéisés pendant 24 h dans un mélangeur de type « Turbula ». La poudre a ensuite été pastillée. Les pastilles, placées dans un creuset en platine, ont été cuites à haute température dans un four électrique, avec une montée en température de 10 °C/min. Un palier de 20 minutes a été appliqué à 1 200 °C, 1 300 °C, 1 400 °C et 1 450 °C, à la fin duquel un échantillon a été rapidement prélevé et refroidi à température ambiante, puis réduit en poudre fine.

L'évaluation de la réactivité est basée sur la mesure de la teneur en chaux libre résiduelle du clinker « final » (1 450 °C), qui dépend de la réactivité intrinsèque de la matière première alternative quand la stoechiométrie du mélange est bien équilibrée, en fonction de la montée en température.

La teneur en chaux libre résiduelle a été estimée par la mise en solution d'un échantillon de clinker broyé de masse connue dans une solution alcoolique d'acétate d'ammonium sous ébullition douce (« méthode à l'acétate d'ammonium (MAA) »). L'extrait qui en résulte est ensuite filtré et titré avec l'EDTA, ce qui permet de connaître la teneur en CaO libre. La même technique est également appliquée pour quantifier la portlandite dans un ciment hydraté. La solution alcoolique empêche l'hydrolyse du ciment [Arjunan et Kumar, 1994].

4.2.2.3. *Analyses chimiques et minéralogiques*

Les analyses chimiques ont été effectuées avec un spectromètre de fluorescence X (FX) Bruker AXS S4 Explorer, combinant les mesures sur pastille de poudre pressée pour les alcalins, le soufre et le chlore, et sur perle fondue pour les éléments majeurs et mineurs. Le traitement des données a été effectué avec le logiciel SpectraPlus.

Les phases minérales ont été identifiées par diffraction de rayons X (DRX), sur poudre pressée, avec un diffractomètre PHILIPS « X-Pert Pro » équipé d'une anticathode Cu K α , sous 40 kV et 40 mA. L'identification des phases a été effectuée avec le logiciel « Diffrac Plus EVA[®] » et la quantification des phases minérales a été réalisée par analyse Rietveld à l'aide du logiciel Topas [Taylor *et al.*, 2000 ; Schmidt et Kern, 2001].

La caractérisation minéralogique a été effectuée par microscopie optique, d'une part sur lames minces (épaisseur 30 μ m) en lumière polarisée transmise, polarité croisée [Deer *et al.*, 1962 ; Roubault *et al.*, 1963], et d'autre part sur sections polies obtenues après immersion des échantillons dans une résine époxy, découpe, puis polissages successifs avec des disques abrasifs P600 (30 μ m), P1200 (15 μ m) et des feutres imprégnés de pâte de diamant de granulométrie comprise entre 6 et 1 μ m.

Les analyses au microscope électronique à balayage (MEB) ont été faites en mode électron rétrodiffusé (contraste Z).

4.2.2.4. *Analyses thermiques*

Des analyses thermiques ont été réalisées avec un appareil ATG/ATD Setaram TG92. Chaque échantillon broyé, de 50 mg, a été placé dans un creuset en platine et porté à haute température à une vitesse de 10 °C/min sous débit d'air, de 20 à 1 450 °C.

4.3. Résultats RECYBETON

4.3.1. Études préliminaires en laboratoire

4.3.1.1. *Caractérisation chimique et minéralogique des sables de GBR*

Quatre sables de GBR 0/4 ou 0/6, provenant de plateformes industrielles de recyclage, ont été retenus pour entrer dans la composition des farines crues. Ils provenaient de quatre régions françaises géologiquement différentes. Concrètement, deux des sables de GBR étaient de nature essentiellement siliceuse (notés S) : granites vosgiens « S#1 » et silex de la vallée de la Seine « S#2 ». Les deux autres étaient de nature silico-calcaire (notée SC), provenant respectivement de Lille « SC#1 » et des vallées de la Drôme et de l'Ardèche « SC#2 ». La composition chimique de ces sables de GBR, après broyage et homogénéisation, est donnée Tableau 4.1, ainsi que celle d'un calcaire, d'une marne et d'une argile typiques, pour comparaison.

Tableau 4.1

Composition chimique des sables de GBR industriels (en % massiques)

	S#1	S#2	SC#1	SC#2	Calcaire	Marne	Argile
PAF	17,09	18,06	21,55	20,56	42,63	35,43	15,36
SiO ₂	57,04	58,45	46,61	47,42	1,33	13,17	44,93
Al ₂ O ₃	4,76	2,47	4,54	5,58	0,43	4,14	12,32
Fe ₂ O ₃	2,06	1,61	2,85	2,12	0,9	3,24	4,77
CaO	15,51	17,12	20,66	20,77	53,84	41,14	16
MgO	0,93	0,62	1,18	0,81	0,6	1,21	1,09
MnO	0,09	0,07	0,12	0,07	0,03	0,03	0,03
SO ₃	0,35	0,47	0,62	0,39	0,1	0,69	1,66
K ₂ O	0,99	0,47	0,78	1,05	0	0,56	2,14
Na ₂ O	0,5	0,15	0,3	0,81	0,04	0,07	0,13
TiO ₂	0,12	0,08	0,19	0,17	0,02	0,19	0,67
P ₂ O ₅	0,06	0,06	0,14	0,11	0,04	0,1	0,09
SrO	0,12	0,1	0,12	0,14	nd	nd	Nd
Total	99,64	99,72	99,66	100	99,96	99,97	99,19

PAF = Perte au feu ; S#1 Granite vosgien ; S#2 Silex de la vallée de la Seine ; SC#1 Silico-calcaire de Lille ; SC#2 Silico-calcaire du sud de Lyon (vallées de la Drôme et de l'Ardèche).

La chimie de ces sables est caractérisée par des teneurs élevées en CaO et SiO₂, et des teneurs faibles en Al₂O₃ et Fe₂O₃. Comme prévu, le taux de ces oxydes varie selon l'origine des granulats utilisés lors de la fabrication des bétons parents : la teneur en CaO est plus élevée pour les sables de GBR silico-calcaires que pour les sables siliceux.

L'analyse DRX des sables de GBR montre qu'ils sont principalement composés de quartz et de calcite (Figure 4.1). L'albite (NaAl[Si₃O₈]) et le microcline (KAl[Si₃O₈]) sont les autres minéraux qui ont pu être identifiés par DRX et confirmés par microscopie optique (Figure 4.2). Ils sont en quantité moindre que le quartz et la calcite.

L'omniprésence du quartz dans ces ressources alternatives est un problème qui doit être considéré attentivement. En effet, ce minéral est réputé être un « poison » vis-à-vis de la qualité de la farine crue [Christensen, 1979 ; Fundal, 1996] car, au cours de la cuisson, des amas de bélite peuvent se former à proximité de ses grains les plus gros [Maki *et al.*, 1995]. Un suivi particulier de la taille des grains de quartz a donc été réalisé durant l'étude de la broyabilité.

Figure 4.1

Analyse DRX des sables de GBR

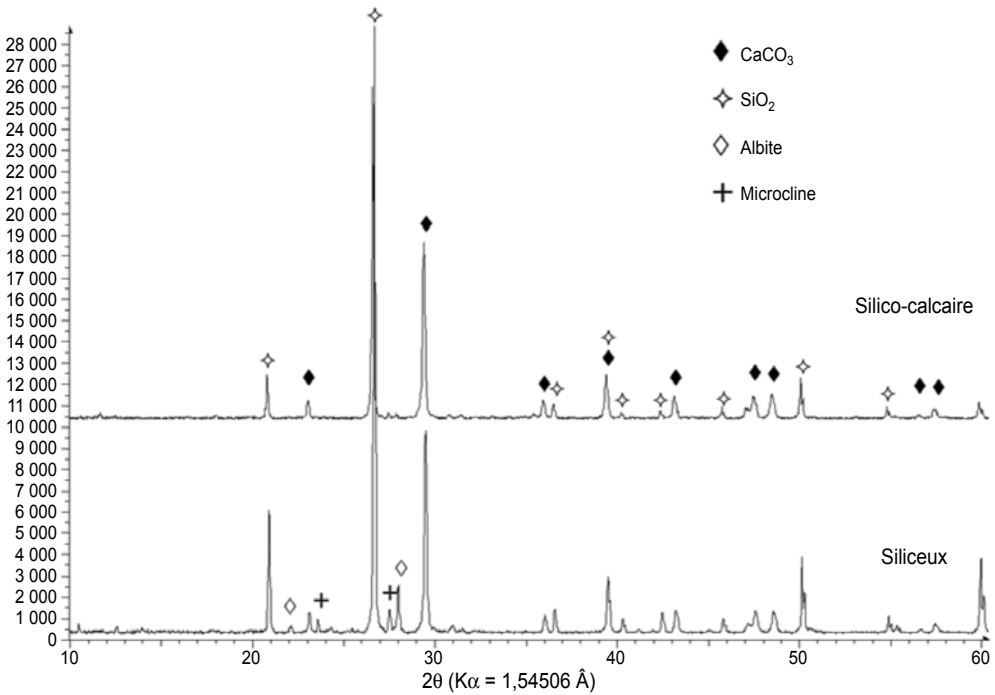
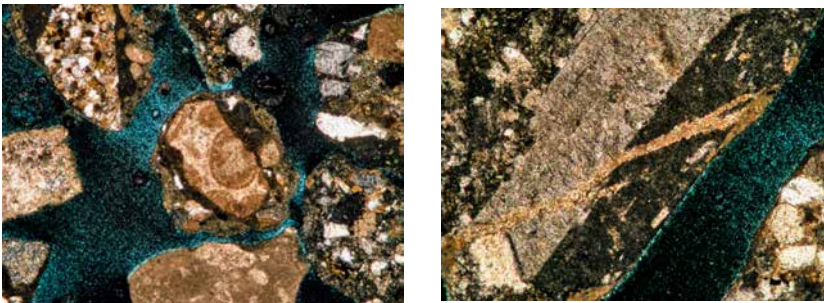


Figure 4.2

Analyse minéralogique par microscope optique (lumière transmise polarisée, polarité croisée). Échelle des images : 2,1 × 1,6 mm. Légende : 1 = calcaire, 2 = macle microcline (Feldspath-K, e.g. KAl[Si₃O₈])



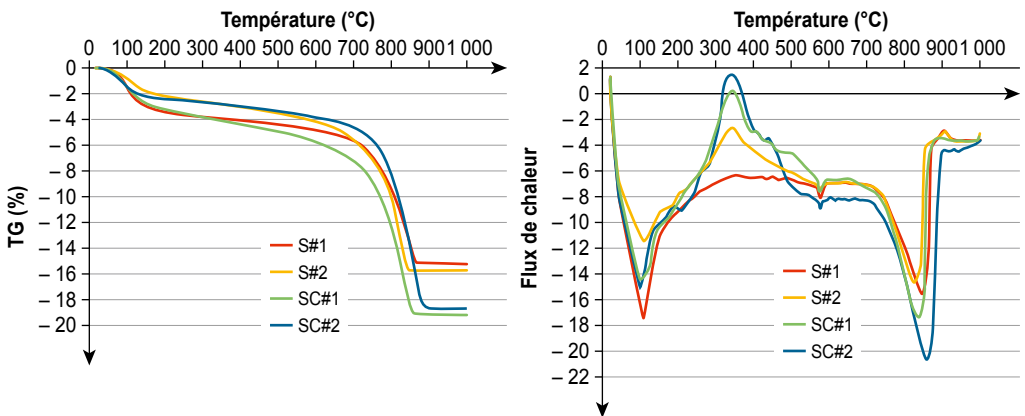
Crédit photo : J.-M. Mechling, IJL.

Une analyse ATG/ATD a complété la caractérisation de ces sables de GBR (Figure 4.3). Une perte de masse vers 100 °C apparaît pour tous les échantillons ; elle correspond au départ de l'eau libre et à la déshydratation partielle des hydrates de l'ancienne pâte de ciment (CSH, Afm, etc.). À 450 °C,

un petit pic endothermique apparaît à son tour, notamment pour les sables de GBR silico-calcaires ; il correspond à la déshydratation de la Portlandite. L'intensité du signal est faible, indiquant que cette phase est très peu présente. La Portlandite a donc été fortement carbonatée au fil du temps. À 573 °C, un autre pic endothermique est observé. Il correspond à la transformation du quartz α à quartz β . Enfin, un pic endothermique important apparaît vers 800 °C. Il correspond à la décarbonatation de la calcite, avec une perte de masse significative, de l'ordre de 10 % pour les sables de GBR siliceux et de 13 % pour les silico-calcaires. La teneur en carbonate de calcium correspondante est de 20-25 % pour les sables siliceux et de 30-34 % pour les sables silico-calcaires.

Figure 4.3

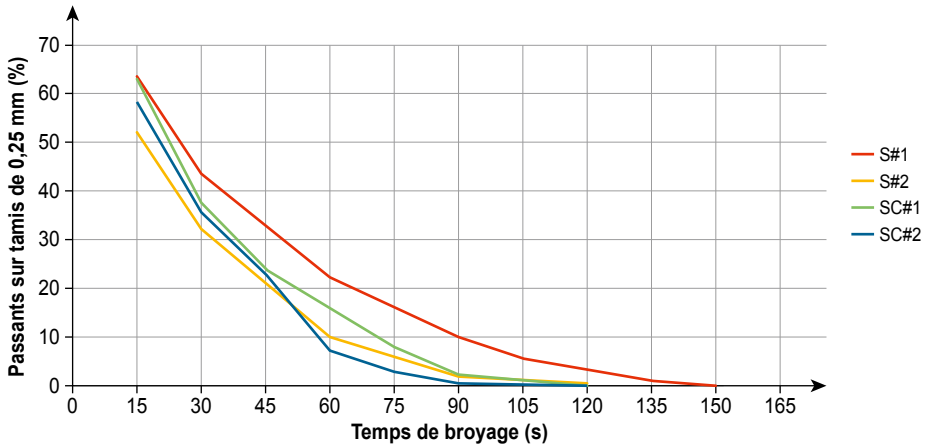
Analyse ATG/ATD des sables de GBR



4.3.1.2. Préparation de la farine crue et broyabilité

La broyabilité des matériaux est un paramètre important dans l'élaboration de la farine crue. Des valeurs de tailles maximales seuils ont été fixées pour les grains de quartz et de calcaire [Reggad, 1993 ; Fundal, 1996], afin de pouvoir obtenir un clinker de qualité conforme à celle prévue lors de la composition du cru. Pour l'étude de ce paramètre, un échantillon de chaque sable, de même masse et de granularité 0/4, a été broyé par passages successifs dans un broyeur à anneaux de laboratoire, à la même fréquence, jusqu'à disparition de tout refus à 250 μm . Après chaque passage, le refus à 250 μm a été pesé puis replacé dans la jarre, avec les passants associés, afin que l'échantillon garde toujours la même masse. Le pourcentage de refus à 250 μm en fonction du temps de broyage est indiqué Figure 4.4.

Les sables de GBR, à l'exception du sable siliceux S#1, ont un comportement assez similaire. Huit broyages successifs suffisent pour ne plus avoir aucun refus à 250 μm , soit un temps de broyage cumulé de 105 secondes.

Figure 4.4Évolution du refus à 250 μm en fonction du temps de broyage

Dans une seconde étape, une masse identique de chaque sable de GBR a été broyée à la même fréquence et pendant la même durée, et le pourcentage de passants à 315, 250 et 200 μm a été mesuré (Tableau 4.2).

Tableau 4.2

Granulométrie (passants) des sables de GBR broyés

Passant à (%)	S#1	S#2	SC#1	SC#2
315 μm	99,7	100	100	100
250 μm	95,6	99,55	99,8	99,9
200 μm	84,8	95,6	96,7	99,3

Cet essai confirme que le sable siliceux S#1 est plus difficile à broyer ; sa nature pétrographique (granite), et plus particulièrement la présence de quartz en son sein, explique cette différence, comparativement au sable siliceux S#2, principalement composé de micro-quartz (silex).

4.3.1.3. Étude de la cuisson

Les sables de GBR ont une composition chimique proche de celle de l'argile. Une première étude expérimentale (mélanges 1) a alors consisté à remplacer toute l'argile du cru de référence par les différents sables de GBR. Le taux de substitution optimal est d'environ 11 % pour les sables siliceux et de 14 % pour les sables silico-calcaires. Une seconde série d'essais (mélanges 2) a consisté à substituer toute l'argile et toute la marne du cru de référence par les sables de GBR. Le taux de substitution passe alors à 19 % pour les sables siliceux et à 24 % pour les sables silico-calcaires. De la bauxite et de l'oxyde

de fer ont alors dû être ajoutés aux différents crus pour compenser le manque d'alumine. Les proportions des mélanges optimisés, leur composition chimique, la composition potentielle des clinkers et les indicateurs de cuisson associés sont donnés Tableau 4.3.

Tableau 4.3

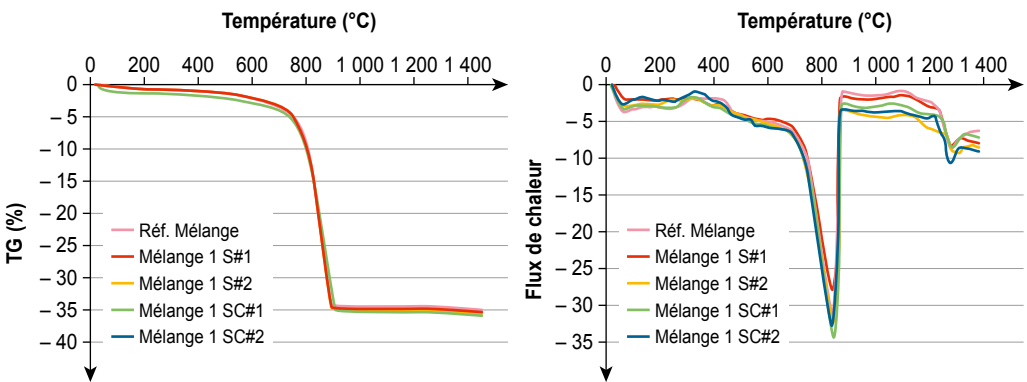
Proportions, composition chimique et marqueurs pertinents pour différents crus

(% masse)	Référence	Mélanges 1				Mélanges 2			
		S#1	S#2	SC#1	SC#2	S#1	S#2	SC#1	SC#2
Calcaire	38	40	40	38	38	74,85	75,2	70,6	71,2
Marne	48	48	48	47	47	0	0	0	0
Argile	14	0	0	0	0	0	0	0	0
Bauxite	0	1	1	1	0	5,5	8,5	4,2	4,6
Oxyde de fer	0	0	0	0	0	08	0	1	0,8
GBR	0	11	11	14	15	18,8	16,3	24,2	23,5
Somme	100	100	100	100	100	100	100	100	100
(% masse)									
PAF (975 °C)	35,6	36,07	36,18	36,01	35,94	35,9	36,1	35,9	35,8
SiO ₂	13,12	13,51	13,66	13,6	13,81	13,82	13,74	13,81	13,82
Al ₂ O ₃	3,91	3,09	2,84	3,15	2,98	3,32	3,92	3,02	3,36
Fe ₂ O ₃	2,63	2,30	2,25	2,42	2,25	2,49	1,85	2,79	2,45
CaO	42,83	43,24	43,41	42,93	43,15	43,29	43,35	43,09	43,25
MgO	0,96	0,93	0,89	0,96	0,92	0,63	0,57	0,72	0,63
SO ₃	0,64	0,45	0,47	0,49	0,46	0,23	0,25	0,31	0,25
K ₂ O	0,57	0,38	0,32	0,37	0,42	0,19	0,08	0,19	0,25
Na ₂ O	0,07	0,11	0,07	0,09	0,17	0,13	0,06	0,11	0,22
TiO ₂	0,19	0,13	0,13	0,14	0,12	0,14	0,19	0,14	0,14
P ₂ O ₅	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,05	0,04	0,07	0,06
Somme	100,6	100,3	100,3	100,2	100,3	100,2	100,1	100,1	100,2
LSF	97,98	99,14	99,31	97,51	97,4	96,39	96,38	96,39	96,26
SR	2	2,51	2,68	2,44	2,64	2,38	2,38	2,38	2,38
A/F	1,49	1,34	1,26	1,3	1,33	1,34	2,12	1,08	1,37
Phase Liq 1 400 °C (%)	29,4	24,4	22,9	25,1	23,8	25,1	25,5	24,8	25,2
Phase Liq 1 450 °C (%)	29,9	24,8	23,3	25,5	24,2	25,5	26	25,3	25,7

Des analyses ATG/ATD conduites jusqu'à 1 450 °C ont été effectuées sur les farines crues afin d'observer les différentes phases de la cuisson (Figure 4.5). Elles montrent les pertes de masse liées à la déshydratation des produits d'hydratation et des argiles (150-250 °C et 450-500 °C respectivement) et à la décarbonatation vers 800 °C. La perte de masse à cette température est la plus conséquente. L'apparition de la phase liquide (C_3A et C_4AF) est révélée par le pic endothermique qui apparaît vers 1 350 °C. La perte de masse totale est de 35-36 %. Elle est égale à celle de la farine crue de référence. La présence des sables de GBR ne change donc pas la température d'apparition de la phase liquide.

Figure 4.5

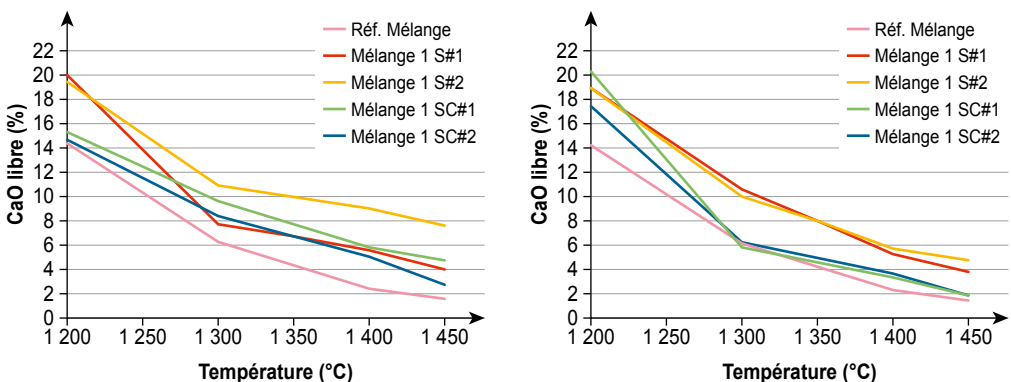
Analyses ATG/ATD des farines crues



La réactivité des crus cimentiers a été évaluée par le titrage de la chaux libre résiduelle (CaO_L) (titrage chimique EDTA), après trempé à 1200, 1300, 1 400 et 1 450 °C (Figure 4.6). Rappelons que ce paramètre est un indicateur de la « facilité de cuisson » du mélange dans les conditions fixées.

Figure 4.6

Teneur en chaux libre en fonction de la température pour les mélanges testés (1 et 2)



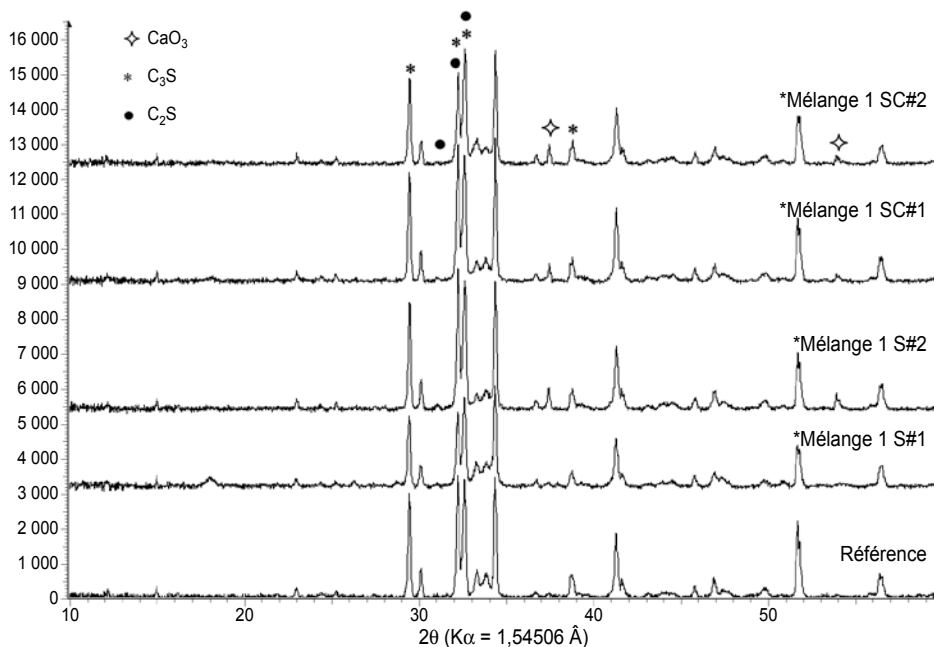
Dans l'industrie du ciment, la plage acceptable de la teneur finale (à 1 450 °C) en chaux libre se situe classiquement entre 1,5 et 2 %. C'est un compromis entre la nécessité d'éviter tout risque d'expansion lors de l'hydratation de cette chaux, si la teneur en chaux libre dépasse 3 %, et l'optimisation de la consommation thermique pour la cuisson (mélange de référence). L'expérience montre que la teneur en chaux libre diminue rapidement au-delà de 1 300 °C (apparition de C_3S par réaction entre C_2S et CaO). La quantité résiduelle de chaux libre, dans les conditions constantes du laboratoire, est donc un indicateur de la réactivité chimique de la matière première alternative testée. L'échelle d'évaluation est la suivante (teneur en chaux libre résiduelle) ; de 0 à 2 % : bonne réactivité ; de 2 à 4 % : réactivité moyenne ; au-delà de 4 %, faible réactivité.

La teneur en chaux libre à 1 450 °C des clinkers à base des sables siliceux est relativement élevée (4 à 8 %) et la présence de quartz dans ces sables peut expliquer les difficultés de la cuisson des crus correspondant. La teneur en chaux libre des clinkers à base des sables silico-calcaires est proche de celle du clinker référence (3 à 4 %).

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X montre la présence des quatre phases principale du clinker : C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF (Figure 4.7). La chaux libre est encore présente à 1 450 °C pour les mélanges 1, comme déjà révélé par le titrage chimique.

Figure 4.7

Diffractogramme des différents clinkers



Les proportions des phases du clinker final (1 450 °C) ont été calculées à l'aide des équations de Bogue et, parallèlement, déterminées par analyse Rietveld en utilisant les paramètres de Nishi, c'est-à-dire sans distinguer les polymorphes du C_3S . Cette option se justifie car : i) elle a donné le meilleur ajustement avec les résultats obtenus [de la Torre *et al.*, 2002] ; ii) les conditions thermiques et de trempe du laboratoire sont régulières ; iii) il y a une faible présence de MgO . Ce dernier paramètre est bien en dessous du seuil maximum de 4 %, au-delà duquel la périclase (phase cristalline de l'oxyde de magnésium) peut se former. Les résultats sont présentés Tableau 4.4.

Un petit, mais large pic situé à 18 °C en 2 θ est visible sur le diffractogramme du mélange 1 S#1. Il correspond au pic de la Portlandite (inattendue). Ce composé révèle une conservation de l'échantillon dans des conditions inappropriées (humidité relative de l'air) avant analyse DRX. Il ne s'agit donc que d'un artefact.

Tableau 4.4

Composition selon Bogue et analyse Rietveld des clinkers

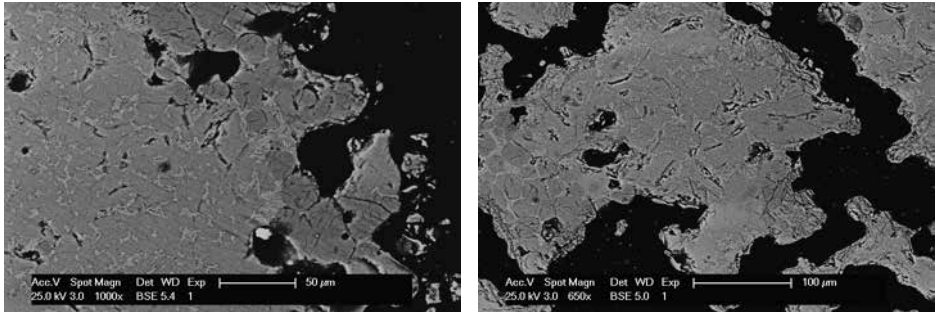
Phase (%)	Mélange 1				Mélange 2											
	S#1		S#2		SC#1		SC#2		S#1		S#2		SC#1		SC#2	
	Bogue	Rietveld	Bogue	Rietveld	Bogue	Rietveld	Bogue	Rietveld	Bogue	Rietveld	Bogue	Rietveld	Bogue	Rietveld	Bogue	Rietveld
C_3S	67,6	68,7	69,4	67,5	67,4	67,8	68	66,3	66,9	60,6	54,8	64,9	67,9	56,4	67,1	69,7
C_2S	9,7	9,2	9,1	14,8	10,1	13,4	10,6	13,7	11,4	14,4	20,4	9,7	10,6	20,9	11,1	6,6
C_3A	6,7	8,1	5,8	2,6	6,6	5,1	6,4	6,9	7,2	8,3	11,4	15,7	5,1	7,5	7,4	11,7
C_4AF	10,9	11,5	10,7	10,8	11,5	10,5	10,7	10,1	11,8	14,4	8,8	6,5	13,2	14,2	11,6	11,2
CaO		2,3		2,4		1,4		1,5		0,9		3,1		1		0,7

La somme des teneurs en C_3S et C_2S des clinkers substitués est proche de celle d'un clinker Portland typique (même si le rapport C_3S/C_2S est parfois différent entre les calculs de Bogue et l'analyse Rietveld). La valeur élevée de LSF pour les mélanges 1 conduit à une teneur plus élevée en C_3S . La teneur plus élevée en chaux libre des clinkers fabriqués avec les sables siliceux est également confirmée par DRX.

Les observations MEB sur section polie des clinkers (Figure 4.8) montrent les gros grains anguleux de C_3S et les grains arrondis de C_2S . C_3A et C_4AF sont les phases interstitielles. Les formes et tailles des phases minéralogiques sont les mêmes que celles du clinker de référence. La présence des grains de quartz ne génère *a priori* pas d'amas de bélite.

Figure 4.8

Micrographies MEB des clinkers substitués, à base des sables de GBR issus des Vosges (S#1). Images obtenues en électron rétrodiffusé. Agrandissement : 1 000 × à gauche, 500 × à droite



Crédit photo : J.-M. Mechling, IJL.

4.3.1.4. Conclusion sur les essais en laboratoire

Les essais de « clinkérisation » en laboratoire montrent que la substitution d'un ou de deux composants traditionnels du cru cimentier par des sables de GBR permet de fabriquer un clinker viable, du moins si la composition chimique de la farine crue est bien équilibrée (obtention de phases hydrauliques de même composition, de même morphologie, et en mêmes proportions que les phases du clinker de référence). L'origine géologique des sables de GBR (en particulier leur teneur en silice) a une influence sur la clinkérisation, en augmentant la teneur finale en chaux libre. Cependant, le taux de substitution peut atteindre 25 % en masse.

4.3.2. Production industrielle d'un clinker portland avec un sable de GBR comme matière première alternative

4.3.2.1. Introduction

Les essais préliminaires de synthèse des crus cimentiers ont montré la faisabilité d'une substitution importante des matières premières traditionnelles par des sables de GBR, à des taux pouvant atteindre 25 % (en masse), sans que le clinker perde significativement de ses qualités, notamment sans formation excessive de chaux libre. Ce résultat positif a permis de décider la réalisation d'un essai à échelon industriel.

L'intérêt principal d'un tel essai est d'échapper aux effets d'échelle, tant au niveau du broyage que de la cuisson. Il n'est envisagé que si les essais préalables de cuisson et de faisabilité ont donné des résultats satisfaisants. Cette pratique est utilisée actuellement dans l'industrie cimentière, lorsque l'industriel souhaite qualifier un nouveau matériau en tant que matière première alternative. Dans le

cas présent, le but était de produire un « clinker recyclé ». Il a consisté à utiliser une farine crue intégrant une proportion importante des matières premières alternatives digne d'intérêt, en l'occurrence un sable de GBR, et à comparer les propriétés du clinker recyclé obtenu à celles de la production habituelle.

4.3.2.2. *Matériaux et méthodes*

L'essai a été effectué à la cimenterie VICAT de Créchy située non loin de Vichy, en Région Auvergne-Rhône-Alpes. Cette usine a été choisie pour son agencement et ses équipements, avec un hall de préhomogénéisation linéaire et un hall de stockage du clinker compartimenté, permettant de réaliser des essais avec une quantité limitée de matériaux et d'isoler la production testée. Cette usine a une capacité moyenne de 425 kT de clinker/an. Elle est équipée d'un hall de préhomogénéisation discontinu, d'un broyeur cru à boulets Polysius à double rotateur et de rendement 120 T/h, de silos d'homogénéisation et d'un four rotatif Polysius (75 m de longueur, 4,40 m de diamètre) équipé d'un échangeur voie sèche Dopol à quatre étages sans pré-calcaire. Ce four est alimenté à 60-65 % avec des combustibles alternatifs (déchets de bois, huile, boues humides et séchées, eau chargée en déchets G2000). En régime normal, sa production est de 1 350 T de clinker par jour. Le broyage du ciment est assuré par un broyeur Polysius à chambre unique, équipé d'un séparateur de 3^e génération, de capacité 120 T/h pour un CEM I de finesse 3 950 ± 220 cm²/g.

4.3.2.2.1. *Matières premières traditionnelles*

Les matières premières traditionnelles de l'usine sont principalement des matériaux provenant des environs ; les constituants majeurs en dosage massique (98 %) sont le calcaire (51 %), la marne (36 %), des sables de fonderie (6 %) et des terres excavées de travaux publics (5 %). Les constituants mineurs, d'origines externes, sont la bauxite, des oxydes de fer et le gypse qui représentent 2 % du total.

4.3.2.2.2. *Matières premières alternatives – Sable de GBR*

Après calculs liminaires, 900 tonnes d'un sable de GBR silico-calcaire provenant du sud de Lyon (Valence) ont été préparées sur une plateforme de recyclage, transportées à Créchy et stockées à la cimenterie afin de réaliser un tas de préhomogénéisation de 5 160 tonnes. Ce tas a été constitué les 21 et 22 avril 2016.

Compte tenu de la composition minéralogique du sable de GBR, en particulier sa teneur en quartz, la stratégie de formulation du mélange cru a été de substituer les sables de fonderie habituellement utilisés par le sable de GBR, afin de garder une teneur en quartz acceptable.

4.3.2.2.3. *Analyses chimiques et minéralogiques*

Les analyses chimiques et minéralogiques ont été effectuées avec les matériels et logiciels décrits au § 4.2.2.3.

La comparaison des compositions minéralogiques calculées selon Bogue et Rietveld a montré une bonne corrélation, avec toutefois des valeurs « Rietveld » plus élevées, notamment pour la teneur en C_3S qui est supérieure de 4 à 6 points à la valeur calculée selon Bogue.

Une attention particulière a été portée à la teneur en quartz, à partir de l'analyse minéralogique des clinkers effectuée par DRX et Rietveld sur des échantillons tamisés à 45 μm , en utilisant la méthode de « dosage aliquote ».

L'analyse microstructurale a été réalisée sur des sections polies obtenues selon le protocole décrit au § 4.2.2.3, avec un microscope métallographique Zeiss Axioscope.

4.3.2.2.4. Broyage du ciment, performances physiques et mécaniques

Le broyage du ciment a été réalisé à l'aide d'un broyeur à boulets de longueur 3 mètres et de diamètre intérieur 0,9 mètre, constitué de deux chambres de longueur 1 et 2 mètres respectivement, et équipé d'un séparateur aéraulique O-Sepa 3^e génération. Son débit de sortie est de 500 kg/h.

Les caractéristiques physiques et les performances mécaniques des ciments ont été mesurées selon les normes européennes dédiées, c'est-à-dire NF EN 196-1 pour la résistance mécanique, NF EN 196-3 pour le temps de prise, et NF EN 196-6 pour la finesse.

4.3.2.3. Résultats et discussion

4.3.2.3.1. Analyse chimique et minéralogique du sable de GBR industriel

Durant l'approvisionnement des 900 tonnes de sable de GBR, trois échantillons représentatifs de 5 kg chacun ont été prélevés. Ces échantillons ont été analysés (chimie et minéralogie) et les données obtenues ont servi à alimenter l'outil de calcul du mélange cru.

Les résultats de ces caractérisations chimiques et minéralogiques sont donnés Tableau 4.5, où l'on peut constater l'homogénéité chimique du stock.

Tableau 4.5

Composition chimique et minéralogique de trois échantillons représentatifs du sable de GBR

	H ₂ O	PAF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	Quartz
Unité	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	Ppm	%
#1	8,14	16,9	43,2	6,7	1,84	26,5	0,94	0,47	1,46	1,45	0	43,3
#2	7,51	17,6	42	6,13	2,02	27,1	1,13	0,37	1,35	1,7	250	41,2
#3	7,57	16,3	43,3	6,95	1,99	24,9	1,12	0,38	1,43	1,78	0	43,6
Moyenne	7,74	16,9	42,9	6,59	1,95	26,2	1,06	0,41	1,41	1,64	83	42,7
Écart type		0,65	0,76	0,42	0,1	1,14	0,11	0,06	0,06	0,17		1,29

4.3.2.3.2. Du mélange cru à la farine crue

Un tas de préhomogénéisation de 5 160 tonnes de matières premières, incorporant les 900 tonnes de sable de GBR, a été constitué. Afin d'ajuster les proportions du mélange selon les règles classiques, un échantillon représentatif correspondant à 1 heure de production a été prélevé à la tour d'échantillonnage, et analysé toutes les heures.

Comme indiqué précédemment, compte tenu de la formulation du cru industriel actuel et étant donné la teneur en quartz du sable de GBR (43 % en moyenne), la meilleure stratégie pour obtenir un cru similaire a été de remplacer les sables de fonderie par le sable de GBR.

Les rapports et indices du cru caractérisant le tas de préhomogénéisation sont les suivants : LSF 98 ; MS 2,6 ; A/F 1,7 ; SO₃ 0,35 %. Ils conduisent à la composition finale du Tableau 4.6, où sont rappelés les paramètres du cru traditionnel.

Tableau 4.6

Composition du cru traditionnel et recyclé, et teneur en quartz (% massiques)

	Calcaire	Marne	Sable de Fonderie	Sable de SBR	Terre d'excavation	Composants mineurs	Total	Quartz
Cru traditionnel	51	36	6	0	5	2	100	8,6
Cru avec Sable de SBR	54,5	25,6	0	14,6	2,3	3	100	9,8

Le Tableau 4.6 montre que l'incorporation du sable de GBR a pu se faire en remplaçant les 6 % de sables de fonderie par 14,6 % de sable de GBR, en augmentant légèrement la teneur en calcaire, et en réduisant légèrement la teneur en matériaux mineurs et significativement celle de la marne (de 36 à 25 %). La composition finale du tas de préhomogénéisation était alors très similaire à celle d'un tas standard. Concernant la teneur en quartz, elle était de 9,8 %, c'est-à-dire une valeur très proche de la valeur de référence, comprise entre 8 à 9 %.

À la cimenterie de Créchy, la stratégie adoptée pour l'homogénéisation de la farine est de procéder par lot ; l'analyse chimique des échantillons de contrôle prélevés régulièrement à la sortie du broyeur permet de corriger la composition d'entrée, de sorte à ce que la chimie cumulée atteigne la cible fixée à la fin du remplissage du silo. Dès le début de la consommation du tas, un échantillon de contrôle a été prélevé toutes les heures à la sortie du broyeur cru afin de réajuster aussi vite que possible la composition chimique de la farine déjà dans le silo. Le lot ainsi obtenu a ensuite été homogénéisé par brassage aéraulique pendant 2,5 heures. Dans ces conditions, quatre silos d'homogénéisation ont été

remplis, soit 5 760 tonnes de farine crue. L'opération de broyage de la farine crue « recyclée » n'a conduit à aucune différence significative par rapport aux valeurs cibles (les résultats détaillés sont donnés dans le rapport RECYBETON dédié).

La pratique actuelle à l'usine de Créchy est d'utiliser dans le mélange cru des sables de fonderie comme source de quartz. Une attention particulière a donc été développée pour le suivi de la teneur en quartz dans la farine crue. Une analyse minéralogique a été réalisée par DRX sur des échantillons de farine crue tamisée à 45 µm, après calibration, en utilisant la méthodologie du dosage « aliquote ». Les valeurs obtenues ont montré que la teneur en quartz de la farine contenant le sable de GBR était tout à fait comparable à la valeur caractéristique des deux clinkers régulièrement produits, ce qui a validé la pertinence de la stratégie choisie et les calculs réalisés. Les valeurs considérées étaient les moyennes de plusieurs échantillons prélevés à différents moments durant le remplissage des silos d'homogénéisation.

4.3.2.3.3. Cuisson du mélange et production du clinker

- Caractéristiques du cru alimentant le four

Des échantillons du cru ont été prélevés à chaque poste de travail (toutes les 8 heures) sur lesquels les analyses suivantes ont été effectuées au laboratoire de la cimenterie : perte au feu, analyse chimique complète par FX, analyse minéralogique par DRX, analyse de la finesse par tamisage (refus à 200, 90 et 45 µm) ainsi que de la teneur en quartz sur le mélange brut complet et sur la fraction supérieure à 45 µm. À l'exception d'un rapport A/F un peu élevé, les critères cibles (LSF, MS) ont tous été conformes aux attentes, avec des valeurs très proches de celles des crus habituels (les détails sont donnés dans le rapport RECYBETON).

- Conditions opérationnelles

L'alimentation du four avec le cru alternatif a commencé le samedi 30 avril 2016 à 9 h 00 et s'est terminée le lundi 2 mai 2016 à 22 h 00 (soit 61 heures au total). Durant ce délai, 3 000 tonnes de clinker ont été produites, dont 2 700 tonnes qui ont été stockées séparément du clinker actuel, dans un emplacement dédié.

Du point de vue de l'opérateur en salle, le clinker RECYBETON est un peu plus difficile à cuire que le clinker habituel, avec quelques instabilités thermiques et la formation/disparition d'encroûtements. Toutefois, la cuisson n'est pas très différente de celle du clinker résistant aux sulfates (SR) produit à Créchy, et les périodes de transition (début et fin) se sont déroulées normalement.

4.3.2.3.4. Caractéristiques du clinker recyclé industriel

Durant la période de production, un échantillon de clinker a été prélevé deux fois par poste (toutes les 4 heures), soit pour environ 3 000 tonnes de clinker produit. Les premières 300 tonnes ont été déclassées (clinker de faible qualité), soit 10 % de la production, contre 11 % pour la production normale de 2016.

Sur ces 14 échantillons représentatifs de la production du clinker, les teneurs en phases silicatées et en chaux libre ont été quantifiées par analyses FX et DRX. Les résultats ont montré que la teneur en C_3S était un peu plus faible (63 %) que celle du clinker moyen (64 %), avec un écart type un peu meilleur ; la teneur moyenne en C_2S a montré alors la tendance inverse, avec une plus faible dispersion. Concernant la teneur en chaux libre, considérée comme indicateur de la qualité de la cuisson, les valeurs ont été presque identiques entre clinker recyclé et clinker standard, avec les mêmes dispersions. Ces résultats démontrent alors la faisabilité industrielle de la production d'un clinker Portland avec une farine crue contenant une proportion substantielle (15 %) de sable de GBR.

- Chimie et minéralogie

La composition chimique du clinker recyclé a été comparée à celle du clinker de référence. Les résultats, non détaillés ici, montrent que le clinker RECYBETON a présenté un facteur de saturation en chaux modéré (95 par rapport à 96 pour la référence), et un module silicilique (SM) moyen (2,4-2,5), gage que le clinker s'est formé dans de bonnes conditions, avec cependant une tendance à produire des encroûtements. La proportion calculée de phase liquide a confirmé la capacité de la combinaison chimique.

En ce qui concerne le degré de sulfatation, les indices dédiés ont affiché des valeurs comparables, indiquant un excès d'alcalins par rapport au soufre, ce qui est conforme au contexte chimique habituel de la cimenterie de Créchy.

Les affinements Rietveld des trois clinkers sont très cohérents, montrant une teneur totale en C_3S légèrement plus faible, et par conséquent une teneur en C_2S légèrement supérieure, associées à des teneurs semblables en C_3A et C_4AF .

- Microstructure

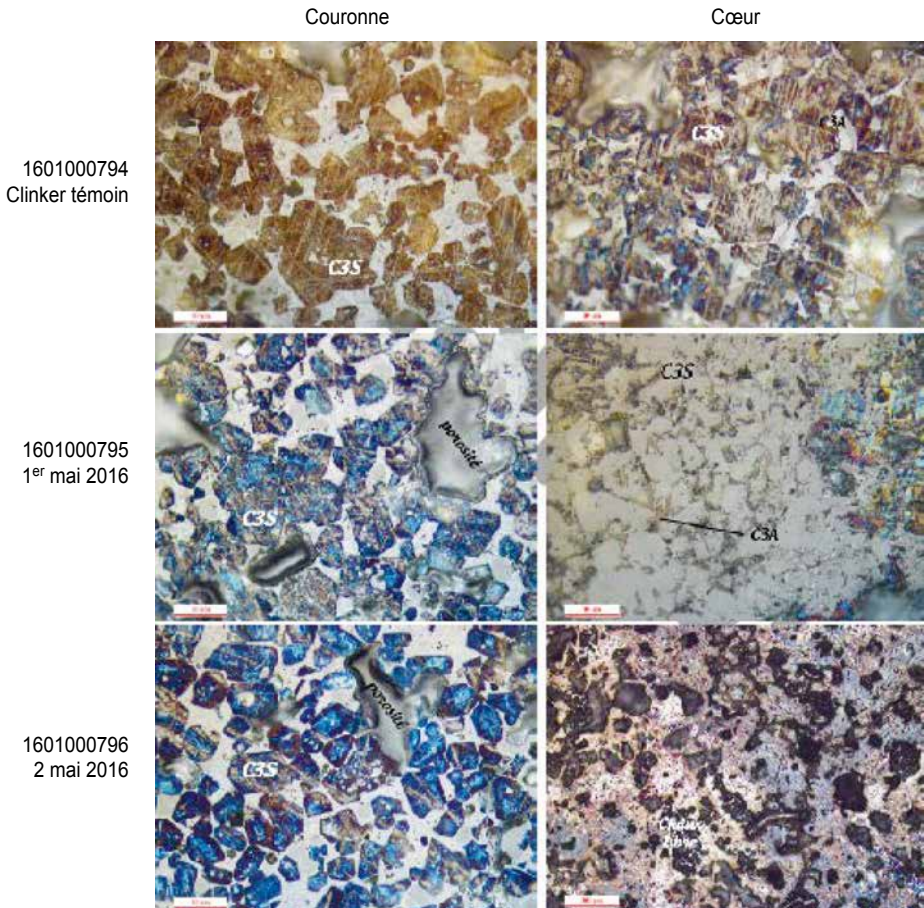
Les observations microstructurales au microscope optique sur sections polies (Figure 4.9) ont montré que les granules de clinker présentent une zonation typique entre le cœur et la couronne ; le cœur est plus dense et plus dur. Cette caractéristique structurelle est comparable à celle rencontrée dans le clinker standard.

La distribution de taille des cristallites du clinker RECYBETON est très semblable à celle du clinker de référence. La taille moyenne des cristaux est relativement homogène (l'alite avoisine 30 μm) et il y a peu d'amas de chaux libre.

Compte tenu de la quantité de quartz apportée par le sable de GBR, une attention particulière a été portée aux amas de bélite, qui sont connus pour engendrer des pertes de résistance mécanique. On constate que les amas de bélite sont plutôt rares (Figure 4.9).

Figure 4.9

Microstructure des clinkers en couronne et à cœur (794 : clinker de référence avant l'essai ; 795 : clinker RECYBETON ; 796 : clinker de référence juste après l'essai)



Crédit photo : Vicat.

4.3.2.3.5. Performances mécaniques du ciment CEM I RECYBETON à l'échelle du laboratoire

Un échantillon moyen représentatif de la période de production a été constitué à partir des 14 échantillons prélevés deux fois par poste de travail. Sa masse était de 30 kg environ. Après homogénéisation, 1 kg a été prélevé à l'aide d'un diviseur à couloir. Il a servi à déterminer la composition chimique et minéralogique (voir ci-dessus). Le reste a été utilisé pour produire un « clinker sulfaté » broyé à 4 000 cm²/g (broyeur à boulets de laboratoire) avec ajout de gypse (6 % en masse).

Cet échantillon a été utilisé pour mesurer les performances mécaniques, e.g. la résistance à la compression selon la norme EN 196-1, la demande

en eau et la finesse (Surface Spécifique Blaine SSB, exprimée en cm^2/g). Le Tableau 4.7 présente les caractéristiques physiques et les performances mécaniques obtenues. Ces dernières ont été comparées à celles du clinker de référence à l'aide d'un « facteur de mérite », égal au rapport entre les valeurs RECYBETON et les valeurs de référence, fois 100. Celui-ci diminue en fonction de l'âge, allant de 94 à 91 % entre 1 jour et 28 jours, respectivement.

Ces performances sont cohérentes avec les caractéristiques minéralogiques des clinkers (Tableau 4.8), avec une teneur en C_3S inférieure de 3 points pour le clinker RECYBETON, ainsi qu'un taux de C_3A cubique beaucoup plus faible que dans le clinker de référence. Ce dernier critère est connu pour être le résultat de conditions de cuisson difficiles, conduisant à une perte de réactivité hydraulique.

Tableau 4.7

Propriétés physiques et résistance mécanique du clinker RECYBETON sulfaté (ciment de laboratoire)

	d_{50}	SSB	e/c	ST(i)	SO_3	Rc 1j	Rc 2j	Rc 7j	Rc 28j
	μm	cm^2/g		min.	%	MPa	MPa	MPa	MPa
Clinker RECYBETON sulfaté						19,1	29,2	46	56,6
Moyenne CRECY 2016	12,7	4 060	0,304	238		20,3	31,5	49,9	62,4
Différence (RECYBETON-REF)						- 1,2	- 2,3	- 3,9	- 5,8
Facteur de mérite						94	93	92	91

Tableau 4.8

Composition minéralogique du clinker RECYBETON

Clinker	Alites totales	Bélites totales	Rapport Alites/bélites	% C_3A cubique/ C_3A Total
Clinker RECYBETON	62,7	16,2	3,87	33
Moyenne 2016	65,5	14,1	4,89	50

4.3.2.3.6. Performances mécaniques du ciment CEM I RECYBETON broyé semi-industriellement

Le Tableau 4.9 donne les caractéristiques physiques et les propriétés mécaniques du ciment RECYBETON broyé dans le broyeur à boulets pilote à la même finesse qu'un ciment CEM I 52,5 N typique (avec 6 % de gypse en masse). Il montre que les résistances mécaniques sont très similaires, voire

même un peu meilleures au jeune âge, à celle du même type de ciment broyé industriellement (moyenne de 2016). Étonnamment, la valeur à 28 jours est plus faible pour le ciment RECYBETON par rapport au ciment de référence, malgré des paramètres physiques identiques (d_{50} et finesse de broyage). Cette « perte de performance » peut être due aux différences de composition minéralogique entre les deux clinkers et à la différence de demande en eau.

Tableau 4.9

Caractéristiques physiques et performances mécaniques du CEM I RECYBETON broyé à échelle pilote

	d_{50}	SSB	e/c	Tp(i)	SO ₃	Rc 1j	Rc 2j	Rc 7j	Rc 28j
	µm	cm ² /g		min.	%	MPa	MPa	MPa	MPa
Broyage pilote RECYBETON	10,8	3 992	0,349	272		20,2	34,6	51,9	59
Moyenne CRECY 2016	12,7	4 060	0,304	238		20,3	31,5	49,9	62,4
	Différence (RECYBETON-REF)					- 0,1	3,1	2	- 3,4
	Facteur de mérite					100	110	104	95

d_{50} : diamètre médian ; SSB : Surface Spécifique Blaine ; e/c : demande en eau du ciment ; Tp(i) : temps de prise initiale ; Rc : résistance à la compression.

4.3.2.3.7. Performances mécaniques du ciment RECYBETON dans le béton

Des bétons ont été réalisés avec un ciment RECYBETON CR1 dont la fabrication est présentée ci-dessus (CEM I à base de clinker dont le cru intègre une quantité substantielle de sable de GBR) et avec un ciment RECYBETON CR2, qui est un ciment de type CEM/II B-SBR où 25 % de sable de GBR ont été utilisés comme constituant principal autre que le clinker (par comparaison avec un CEM II/A-L 42,5 N standard). La description de ces bétons, en termes de formulation et de propriétés à l'état frais et durci, est donnée en annexe. Par ailleurs, le ciment RECYBETON CR1 a fait l'objet d'une utilisation expérimentale en dallage béton (cf. chapitre 22).

4.4. Besoins de recherche

La question de la capacité d'un cru cimentier Portland à donner un clinker viable, en termes de composition minéralogique et de réactivité attendue, lorsqu'il contient un taux substantiel de sable de GBR, a reçu une réponse positive, tant à l'échelle du laboratoire qu'à l'échelle industrielle. La voie est maintenant ouverte pour d'autres essais industriels car il s'agit plus d'une

question d'optimisation en fonction de la variation de la ressource que d'une recherche de paramètres pertinents.

La situation est différente en ce qui concerne les propriétés du ciment obtenu. Si les performances mécaniques à courts termes des mortiers et bétons fabriqués avec ce ciment peuvent être considérées comme acceptables (par exemple à 28 jours), il n'y a pour l'instant aucun retour sur les évolutions à long terme, tant au niveau de la résistance mécanique que de la durabilité dans différents environnements. Ces deux points méritent donc une attention particulière et l'acquisition de données nouvelles grâce à des recherches complémentaires sont encore nécessaires, afin de satisfaire aux exigences essentielles du ciment Portland recyclé, à savoir sa stabilité et sa résistance mécanique sans limitation dans le temps.

4.5. Conclusion

Il a été montré dans ce chapitre que la composition minéralogique des sables de GBR est principalement dominée par le quartz et la calcite, avec une présence mineure de feldspaths et de micas.

À partir d'essais de cuisson en laboratoire, il a été montré également que, malgré leur teneur élevée en quartz, les sables de GBR sont des matières premières alternatives pouvant entrer dans le cru cimentier, avec un taux maximum de substitution de 25 % en masse. Ces conclusions ont été jugées suffisantes pour décider d'entreprendre un essai à pleine échelle, et produire un clinker Portland recyclé en cimenterie.

L'optimisation de la formulation du mélange cru incorporant le sable de GBR a été réalisée sans difficulté, conduisant à une farine crue contenant une proportion importante de ce matériau de substitution : 15 % en masse. Cette proportion a été obtenue par remplacement des sables de fonderie utilisés dans la formulation actuelle du mélange cru. La production du clinker issu de cette « farine crue recyclée » a montré peu de différences par rapport aux conditions de cuisson de la farine crue traditionnelle, en termes de procédé.

L'analyse du clinker a montré que ses caractéristiques chimiques et minéralogiques sont très semblables à celles du clinker de référence et qu'il donne des performances mécaniques très acceptables, le clinker étant broyé au moyen d'un broyeur pilote d'usine donnant de bonnes performances.

Cette démonstration montre qu'il est possible de recycler le sable de GBR dans le processus de fabrication du ciment Portland, avec de bonnes performances, et elle ouvre la voie à l'optimisation industrielle.

Cela confirme que les pratiques actuelles de l'industrie cimentière française, en termes de substitution des matières premières, sont également valables pour le recyclage des sables de GBR.

Chapitre 5.

Béton recyclé utilisé comme constituant du ciment ou comme ajout cimentaire au béton

M. Cyr¹, C. Diliberto², L. Izoret³, A. Lecomte²

Résumé – Parmi les trois façons de recycler la fraction fine des granulats de béton recyclé (GBR) dans le ciment et le béton, la première est une utilisation en tant que matière alternative dans le cru cimentier destiné à la fabrication du clinker. Cette voie ne soulève pas de problème particulier (voir chapitre 4), du moment que la composition minéralogique du mélange initial est bien conçue et donne, après cuisson, le clinker Portland attendu, avec les propriétés d'usage associées. La deuxième et la troisième voie sont respectivement la substitution au clinker, en tant que constituant du ciment et, après broyage, l'ajout direct au béton en tant que matériau cimentaire supplémentaire. Ces deux voies sont évaluées dans le présent chapitre.

La première partie du chapitre concerne l'évaluation des propriétés physico-chimiques de ciments Portland composés (CEM II) produits à une échelle semi-pilote, obtenus par substitution de l'ajout calcaire initial par un sable de GBR, à différents taux, en tenant compte de sa composition minérale. La fraction fine des GBR (sable) est donc considérée ici comme un constituant potentiel principal du ciment.

La deuxième partie du chapitre présente l'évaluation de la possibilité d'utiliser les fines de GBR en tant que fillers minéraux ajoutés aux mortiers ou aux bétons (pouvant participer au liant équivalent, au sens de la norme EN 206). Deux types de produits sont étudiés : i) des fines de dépoussiérage récupérées lors du concassage des bétons recyclés pour la production des sables et gravillons de GBR ; ii) des fines obtenues par broyage de différents sables de GBR. Les travaux comprennent la caractérisation de ces matériaux, l'étude de leur activité hydraulique et pouzzolanique éventuelle et de leur effet sur les propriétés des mortiers frais et durcis lorsqu'ils sont utilisés en remplacement d'une partie du ciment Portland. Ces deux types de fines de GBR sont considérées soit

1. LMDC, INSA de Toulouse.

2. Université de Lorraine, Institut Jean Lamour, Nancy.

3. ATILH, Paris La-Défense.

comme une addition de type I (charge), soit comme une addition de type II (pouzzolane), puisqu'elles peuvent avoir une certaine activité liante à long terme.

5.1. Introduction

Dans le chapitre 4, la production d'un ciment de type CEM I 52,5 N obtenu à partir d'un clinker fabriqué avec un cru contenant une quantité significative (15 % en masse) de granulats de béton recyclé (GBR) (sable), en substitution des matières premières traditionnelles, a été étudiée et évaluée.

En termes de performance sur mortier ISO, ce CEM I 52,5 N RECYBETON a présenté une résistance mécanique identique à celle de la production industrielle normale, du moins entre 1 et 7 jours. À 28 jours, une perte de performance de 6 % a été observée et expliquée par une demande en eau légèrement supérieure et par de petites différences dans la composition minéralogique du clinker.

L'utilisation de sable de GBR comme constituant du cru cimentier ne soulève donc pas d'interdit en termes de normalisation, tant que le résultat de la cuisson aboutit au clinker Portland conçu à partir de la composition minéralogique initiale, et que les propriétés d'usage associées sont atteintes.

La deuxième façon de recycler les fines de GBR est de considérer ce matériau comme un constituant principal du ciment, complémentaire au clinker. Les expériences présentées dans ce chapitre explorent les possibilités de production d'un ciment de type CEM II, constitué d'un clinker Portland normal et d'un calcaire traditionnel (LL) remplacé progressivement par des fines de GBR, avec une plage de composition allant d'un CEM II/A-M (LL-GBR) à un CEM II/B-M (GBR-LL), les termes extrêmes de cette série étant un CEM II/A-LL (15) 42,5 R et un CEM II/B-GBR (25).

La troisième façon de recycler les fines de GBR est de les considérer comme un matériau cimentaire supplémentaire utilisé comme ajout au béton. Deux types de fines de GBR ont été étudiés : des fines de dépoussiérage, récoltées à l'issue du concassage de bétons recyclés pour la production de sables et de gravillons de GBR, et des fines obtenues par broyage de différents sables de GBR. Les travaux comprennent la caractérisation de ces matériaux, l'étude de leur activité hydraulique et pouzzolanique, et de leurs effets sur les propriétés de mortiers frais et durcis lorsqu'ils sont utilisés en remplacement d'une fraction du ciment Portland. Les résultats montrent que les fines de GBR peuvent être considérées comme une addition de type I (charge), voire même comme une addition de type II (pouzzolane), puisqu'une certaine activité liante a été observée à long terme.

5.2. État de l'art

5.2.1. Composition des ciments : principes et méthodes

La composition des ciments est régie par les règles décrites dans la norme européenne EN 197-1 et dans sa version nationale NF EN 197-1.

Cette norme fondamentale définit les constituants principaux (plus de 6 % en masse) et les constituants secondaires (moins de 5 % en masse) du ciment. Parmi les constituants principaux, on trouve le clinker Portland et neuf autres matériaux qui sont les calcaires (L, LL), le laitier de haut fourneau granulé (S), les cendres volantes provenant des centrales thermiques au charbon (V, W), les matériaux pouzzolaniques (P, Q), les schistes calcinées (T) et les fumées de silice (D).

Parmi les constituants secondaires, on trouve les matériaux issus du procédé de fabrication du ciment, tels le calcaire et le clinker mal clinkérisé, parfois appelé « fines brûlées ».

En outre, du sulfate de calcium est toujours ajouté (aux constituants principaux + secondaires) afin d'optimiser le temps de prise.

Selon les proportions massiques de chaque constituant, le ciment se classe par exemple dans la catégorie CEM I (clinker + sulfate de calcium), CEM II/A-LL (clinker + calcaire + sulfate de calcium) ou CEM III/A (clinker + laitier de haut-fourneau + sulfate de calcium). Le Tableau 1 de la norme NF EN 197-1 décrit en détail les compositions agréées.

5.2.2. Perspective de normalisation

Comme mentionné précédemment, l'essence de la norme EN 197-1 est de spécifier les matériaux pouvant être utilisés comme constituants du ciment. Hormis la liste des produits agréés, aucune possibilité d'auto-déclarer un nouveau matériau comme constituant du ciment n'est donc tolérée. En d'autres termes, la composition du ciment est basée sur des « constituants reconnus et éprouvés », afin d'assurer la constance des performances et la stabilité des ciments, y compris à long terme.

Cette logique « conservatrice » s'explique pour des raisons de sécurité des constructions. Cependant, elle est considérée par certains comme une entrave à l'innovation, empêchant notamment les opportunités de développement de ciments à faible impact environnemental, moins émetteurs de CO₂. Toutefois, il faut rappeler ici l'exigence première d'un ciment Portland, y compris « recyclé », qui est d'assurer « stabilité et résistance mécanique » aux constructions, pour garantir la protection des biens et des personnes.

Récemment, un rapport technique a été élaboré par le CEN/TC51, dont l'objet est de donner des lignes directrices à la rédaction d'un guide technique destiné à proposer une nouvelle version de la norme européenne des ciments. Ce guide (CEN/TR 16912, Guidelines for a procedure to support European standardization of cements, publié en 2016) distingue :

- i) les ciments nouveaux à base de clinker Portland et de constituants principaux déjà agréés (i.e. « bien connus et éprouvés ») autres que le clinker, mais dans des proportions non conformes à celles du Tableau 1 de la norme EN 197-1,
- ii) les ciments à base de clinker Portland mélangé à un ou plusieurs nouveaux constituants principaux,
- iii) les ciments nouveaux à base d'un système chimique qui diffère sensiblement du clinker Portland.

Le cas des fines de GBR se rattache clairement à l'option ii) de la future norme, au titre de laquelle ce composant pourrait être considéré comme un nouveau constituant principal du ciment, autre que le clinker.

Concernant la norme des bétons NF EN 206/CN, la situation est assez similaire puisque l'aptitude d'un constituant doit être reconnue par une norme produit spécifique, par exemple EN 12620 pour les fillers calcaires ou EN 15167-1 pour les laitiers granulés de haut-fourneau prébroyés (ou laitier moulu). Lorsque, pour un constituant particulier, il n'existe pas de norme européenne qui spécifie explicitement son utilisation dans le béton, ou lorsqu'il existe une norme européenne qui ne couvre pas le produit particulier, ou encore lorsque le constituant s'écarte de manière significative de la norme européenne, l'établissement de l'aptitude du constituant peut résulter :

- d'un agrément technique européen qui se réfère spécifiquement à l'utilisation du constituant dans le béton conforme à la norme ;
- de dispositions valables sur le lieu d'utilisation du béton, qui se réfèrent spécifiquement à l'utilisation du constituant dans le béton conforme à la norme.

Ces perspectives de normalisation ont été prises en compte dans la préparation du dossier technique soumis au CEN/TC51, en y intégrant les résultats du Projet National RECYBETON. L'objectif du dossier technique est de donner au comité de normalisation un aperçu complet des propriétés d'un nouveau matériau lorsqu'il est mélangé au ciment, afin d'en assurer une utilisation appropriée et pertinente en toutes circonstances.

5.3. Résultats RECYBETON

5.3.1. Production semi-pilote des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M. Substitution du calcaire par des fines de GBR

5.3.1.1. *Composition du ciment et méthodologies*

Compte tenu de la nature des matériaux agréés en tant que constituant principal du ciment, autres que le clinker, la démarche a consisté à déterminer lequel pouvait être le plus facilement substitué par des fines de GBR. Compte tenu de la composition minéralogique des GBR (voir chapitre 4), il est apparu logique de substituer le calcaire additionné au clinker dans les ciments de catégorie CEM II/A ou B-LL. Le remplacement progressif du calcaire par les fines de GBR a alors conduit aux compositions cimentaires suivantes :

- CEM II/A-LL15 42,5 R : Clinker + 15 % de calcaire + 6 % de gypse ;
- CEM II/A-M (LL7-GBR8) : Clinker + 7 % de calcaire + 8 % de fines de GBR + 6 % de gypse ;
- CEM II/B-M (LL9-GBR16) : Clinker + 9 % de calcaire + 16 % de fines de GBR + 6 % de gypse ;
- CEM II/B-GBR25 : Clinker + 25 % de fines de GBR + 6 % de gypse.

Ces ciments ont été produits à une échelle semi-pilote par concassage puis broyage dans un broyeur à boulets, suivi de tamisages et de reconstitutions granulométriques afin d'obtenir une granularité similaire à celle d'un ciment industriel pris comme référence, en l'occurrence le CEM II/A-LL 42,5 R de l'usine de Port-la-Nouvelle (LafargeHolcim France).

Ce mode d'élaboration a été choisi car, en conditions industrielles, la production d'un ciment exige une très grande quantité de matière (environ 2 000 tonnes au minimum). Elle nécessite en outre un nettoyage complet, amont et aval, des silos afin d'éviter toute pollution par le ciment précédent et pour le ciment suivant.

5.3.1.2. *Évaluation des propriétés physico-chimiques des ciments Portland composés*

Les propriétés des ciments composés ainsi fabriqués ont été mesurées sur poudre, sur pâte et sur mortier, conformément aux prescriptions de la norme NF EN 196 et de ses différentes parties.

5.3.1.2.1. Caractéristiques sur poudres

La masse volumique des ciments composés diminue avec l'ajout des fines de GBR, en raison de leur plus faible masse volumique, par rapport à celle du clinker. Elle varie de 3,065 g/cm³ pour le ciment CEM II/A-LL à 2,966 g/cm³ pour le ciment CEM II/B-GBR. La surface spécifique Blaine est similaire pour

tous les ciments (soit 4 500 à 4 760 cm²/g). Ce résultat a été confirmé par granulométrie laser.

Les ciments sont principalement composés d'oxyde de calcium et d'oxyde de silicium. Une faible augmentation de la teneur en ce dernier est observée avec l'ajout des fines de GBR, puisqu'elle atteint 27 % pour le ciment CEM II/B-GBR. La teneur en chaux libre est similaire pour tous les ciments (environ 2 %) mais le résidu insoluble augmente linéairement avec la teneur en fines de GBR ; elle atteint 9 % pour le ciment CEM II/B-GBR. Cette évolution est due à la présence du quartz dans les fines de GBR (confirmé par FX et DRX).

La perte au feu ne diminue pas significativement avec la substitution des fillers calcaires par les fines de GBR, en raison de la présence de carbonates, de sulfates, CSH... dans les fines de GBR.

5.3.1.2.2. Caractéristiques sur pâtes de ciment

L'incorporation de fines de GBR dans le ciment entraîne un léger raidissement de la pâte, qui a été compensé par un supplément d'eau, pour garder la consistance normale. Ainsi, la valeur de la demande en eau a augmenté de 8 % entre les ciments CEM II/A-LL et CEM II/B-GBR. Ce comportement s'explique *a priori* par la présence de l'ancienne pâte de ciment microporeuse au sein des fines de GBR [Hansen, 1992a ; Evangelista et de Brito, 2007b ; Evangelista *et al.*, 2015].

Le temps de prise augmente avec le taux d'incorporation des fines de GBR, et donc avec la diminution concomitante du taux de clinker. Pour le CEM II/A, l'ajout des fines de GBR n'affecte pas le temps de prise, tant initial que final. Pour le CEM II/B, l'augmentation de la teneur en fines de GBR, de 16 % (avec 9 % de calcaire) à 25 %, retarde le temps de prise initial de 30 minutes, mais n'affecte pas le temps de fin de prise.

5.3.1.2.3. Caractéristiques sur mortiers

La chaleur d'hydratation des différents ciments, mesurée avec un calorimètre semi-adiabatique de Langavant, est présentée Tableau 5.1. L'ajout des fines

Tableau 5.1

Chaleur d'hydratation cumulée (J/g) des ciments à 12 h, 24 h, 48 h, 51 h et 120 h

	CEM II/A LL	CEM II/A M(LL-SBR)	CEM II/B M(LL-SBR)	CEM II/B SBR
12 h	217,5	210,3	181,8	156,2
24 h	287,5	276,6	247,9	233,8
48 h	309,5	296,2	268,5	254,4
51 h	309,5	297,1	268,9	255,9
120 h	316,7	302,7	278,2	268,6

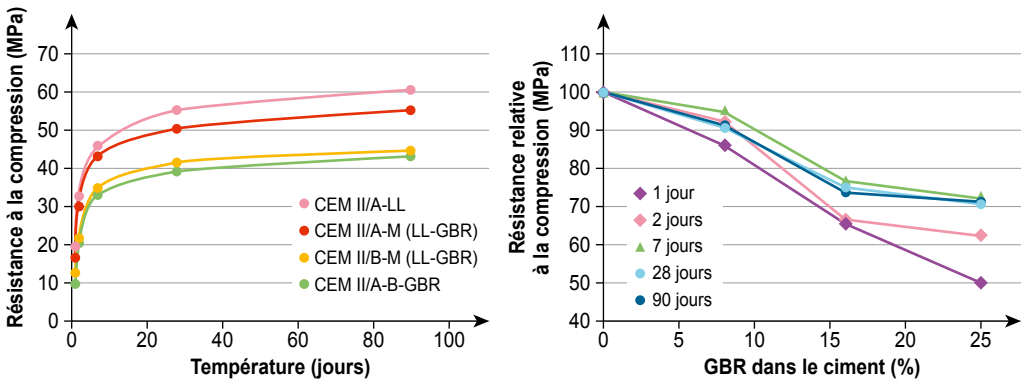
de GBR réduit la chaleur d'hydratation des ciments, et diffère le pic maximum de température. Rappelons que ce phénomène a été également observé pour le temps de prise initial, qui est retardé pour le CEM II/B-GBR. Les ciments avec les fines de GBR présentent donc une chaleur d'hydratation plus faible et retardée, qualités intéressantes pour des utilisations particulières.

Les valeurs de résistance à la compression des différents ciments dans le temps, et leur résistance à la compression relativisée à celle du ciment CEM II/A-LL, sont données Figure 5.1. La résistance à la compression des ciments incorporant les fines de GBR est inférieure, quelle que soit l'échéance, à celle du ciment de référence (CEM II/A-LL). La diminution est plus importante pour le ciment CEM II/A que pour le ciment CEM II/B. Elle est importante à court terme (1 et 2 jours), mais moins franche à plus long terme (28 et 90 jours). Les résistances relatives à la compression sont proches les unes des autres à partir de 7 jours.

Les fines de GBR ne se comportent donc pas comme des fillers inertes, car elles ont une certaine activité liante, du moins à long terme. On peut également noter que le remplacement total des fillers calcaires (entre le ciment avec 16 % de fines de GBR et 9 % de calcaire LL, et celui avec 25 % de fines de GBR et 0 % de calcaire LL) n'a pas entraîné une réelle perte de performance.

Figure 5.1

Résistance à la compression et résistance relative à la compression par rapport à celle du CEM II/A-LL en fonction du temps



Les ciments contenant des fines de GBR présentent finalement des valeurs de résistance mécanique qui sont compatibles avec une classe de résistance 32,5 N et 42,5 N, selon le taux de substitution. On obtient ainsi des CEM II/A et des CEM II/B ayant des propriétés suffisantes pour des utilisations courantes. Cependant, de toute évidence, la classe de résistance d'un ciment ne peut être donnée que sur une base statistique étendue. D'autres études sont donc nécessaires, au niveau industriel notamment.

5.3.2. Concept de combinaison au ciment au sein du béton

5.3.2.1. Introduction

Les fines de GBR ont aussi été évaluées en tant qu'ajouts minéraux pouvant remplacer une partie du ciment, au sein du béton. Les additions au béton sont définies comme des constituants minéraux finement divisés utilisés pour améliorer ou conférer des propriétés spécifiques au béton. Dans la norme NF EN 206/CN, elles sont séparées en deux catégories : les additions de type I, qui sont (presque) inertes, tels les fillers siliceux ou les pigments, et les additions de type II, qui sont des additions ayant des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques latentes, telles les cendres volantes, les fumées de silice et le laitier de haut fourneau granulé broyé.

Les GBR contiennent des granulats naturels et de la pâte de ciment hydraté, mais ils peuvent contenir aussi des composés anhydres, comme du clinker non hydraté et des additions qui peuvent ne pas être totalement inertes lorsqu'elles sont réutilisées dans un nouveau béton [Braga *et al.*, 2012 ; Braga *et al.*, 2014]. De plus, des phases siliceuses présentes dans les granulats peuvent aussi avoir une certaine réactivité. Ainsi, les fines de GBR peuvent être considérées soit comme une addition de type I, c'est-à-dire une charge inerte constituée par les minéraux inertes présents dans les granulats et la pâte hydratée, soit comme une addition de type II pouvant présenter une activité pouzzolanique ou hydraulique, grâce au ciment resté anhydre, aux additions ou aux granulats naturels réactifs présents [Evangelista et de Brito, 2007b ; Kim et Choi, 2012 ; Oksri-Nelfia *et al.*, 2016 ; Topic *et al.*, 2017].

L'objectif de ces travaux a été d'évaluer l'activité des fines de GBR, sur pâtes et sur mortiers. Les produits utilisés avaient deux origines :

- des fines de dépoussiérage récupérées lors du concassage de bétons recyclés (pour la production de sables et de gravillons de GBR). Dans ce qui suit, ces fines de dépoussiérage sont repérées « fines de GBR-D ». À noter que les installations existantes ne produisent pas de grandes quantités de ces fines, du moins suffisamment pour former une ressource intéressante pour des applications industrielles ;
- des fines obtenues par broyage de sables de GBR, car la réutilisation des sables de GBR dans le béton reste problématique, en raison de leur forte demande en eau. Dans ce qui suit, ces fines sont repérées « fines de GBR ».

Les travaux ont porté sur la caractérisation de ces deux types de fines, sur l'étude de leur activité hydraulique et pouzzolanique, et sur leurs effets vis-à-vis des propriétés de mortiers frais et durcis lorsqu'elles sont substituées à une partie du ciment Portland.

5.3.2.2. Caractéristiques des fines de GBR et de GBR-D

Les fines de GBR-D ont été fournies par une plateforme industrielle qui concasse des bétons recyclés à proximité de Paris (Gonesse).

Les fines de GBR ont été obtenues par broyage de sables issus de quatre plateformes industrielles de recyclage des bétons situées dans des régions géologiques différentes : Paris (Pa) où les granulats sont majoritairement des silex ; sud de Lyon (Ly) où les granulats sont silico-calcaires ; Strasbourg (St) où les granulats sont de nature granitique ; Lille (Li) où les granulats sont plutôt silico-calcaires. Ces sables de GBR ont été broyés par lots de 5 kg dans un broyeur à barres, pendant une durée de 30 et 120 min, afin d'obtenir différentes surfaces spécifiques (Blaine) variant entre 4500 et 7500 cm²/g, et un d₅₀ compris entre 9 et 20 µm. On notera que des temps de broyage équivalents ont été observés pour que les différents sables atteignent un même niveau de finesse.

Le Tableau 5.2 dédié aux propriétés des différentes fines montre que les fines de GBR-D contiennent une plus grande quantité de résidus de pâte de ciment hydraté que les fines de GBR. Les différences de composition entre les quatre fines de GBR sont dues à la nature des granulats d'origine dans le béton.

Tableau 5.2

Propriétés chimiques, minéralogiques et physiques des fines de GBR et de GBR-D

	Fines de GBR				Fines de GBR-D
	Pa	Ly	St	Li	
Composition chimique (%)					
CaO	17,1	20,8	15,5	20,7	36,7
SiO ₂	58,5	47,4	57,0	46,6	22,6
Al ₂ O ₃	2,3	5,6	4,8	4,5	3,2
Fe ₂ O ₃	1,6	2,1	2,1	2,9	1,4
SO ₃	0,5	0,4	0,4	0,6	1,6
Na ₂ O	0,2	0,8	0,5	0,3	0,1
K ₂ O	0,5	1,1	1,0	0,8	0,4
MgO	0,6	0,8	0,9	1,2	1,2
LOI	18,1	20,6	17,1	21,6	32,3
Composition minéralogique					
Granulats	Quartz (< 50 %), calcite (20-30 %), dolomite (3-5 %), Feldspaths, Micas				Quartz (< 20 %), calcite (45 %), dolomite (6 %)
Phases anhydres	C ₃ S et C ₂ S				C ₃ S et C ₂ S
Phases hydratées	CSH (< 18 %), Portlandite (traces), AFt (traces)				CSH (< 60 %), Portlandite (2 %), AFt
Propriétés physiques					
Masse volumique (kg/m ³)	2 440	2 490	2 480	2 450	2 180

5.3.2.3. Résultats et discussion

5.3.2.3.1. Activité hydraulique

Des composés anhydres provenant du ciment d'origine ont été détectés en faibles quantités dans les fines de GBR. Afin d'évaluer si ces phases anhydres réagissaient au contact de l'eau, des échantillons de chaque type de fines ont été gâchés avec de l'eau déionisée (rapport eau/fines de 0,40 et 0,55 pour les fines de GBR et de GBR-D, respectivement) et l'hydratation a été suivie par calorimétrie isotherme à 20 °C pendant plusieurs jours.

Après 72 heures, la chaleur dégagée par les mélanges se situait entre 2 et 7 J/g, c'est-à-dire une quantité très éloignée des valeurs typiques d'un ciment Portland (300-350 J/g). Il convient de noter que les fines de GBR-D, qui contiennent une plus grande quantité de pâte de ciment (et donc probablement aussi plus de ciment anhydre) n'ont pas présenté un dégagement de chaleur plus élevé. En considérant une valeur moyenne de 5 J/g pour les deux types de fines de GBR et de 325 J/g pour le ciment Portland, et en supposant que le ciment encore anhydre dans les deux fines de GBR ait totalement réagi durant l'essai, on en déduit alors que les fines de GBR contiennent environ 1,5 % de ciment anhydre ($100 \times 5/325$), ce qui semble réaliste et cohérent avec la présence de grains de Hadley dans l'ancienne pâte (ce sont des grains creux qui contiennent encore du ciment anhydre à cœur, au-delà de la périphérie hydratée).

À l'issue de l'essai, les échantillons de pâte contenus dans les moules cylindriques ont servi à vérifier si la légère réactivité observée avait des conséquences mécaniques. Mais aucune prise ou réel durcissement n'a été constaté, même après 28 jours de conservation dans l'eau.

5.3.2.3.2. Activité pouzzolanique

De la silice peut être libérée de l'ancienne pâte de ciment ou des granulats (voir le chapitre 12 traitant de la réaction alcali-silice), ou des ajouts n'ayant pas réagi, et conférer alors aux fines de GBR et de GBR-D une certaine réactivité pouzzolanique. Cette réactivité potentielle a été évaluée sur des pâtes composées de chaux hydratée (1 part en masse), de fines de GBR ou de GBR-D (4 parts) et d'eau (2,5 parts), en quantifiant la consommation de chaux jusqu'à 90 jours (échantillons protégés de la carbonatation) par analyse thermo-gravimétrique (ATG) et par diffraction des rayons X (DRX). Les fines sélectionnées étaient celles de surface spécifique 7 500 cm²/g, pour amplifier la réactivité.

La Figure 5.2 donne un exemple des résultats obtenus. On voit clairement, sur la dérivée des courbes ATG, que la teneur en chaux hydratée (portlandite - CH) diminue avec le temps (surtout dans les 28 premiers jours), alors que de nouvelles phases hydratées apparaissent, comme le confirme l'augmentation de l'eau chimiquement liée détectée aux températures inférieures à 300 °C (on constate aussi que certains hydrates, comme les C-S-H, étaient déjà présents

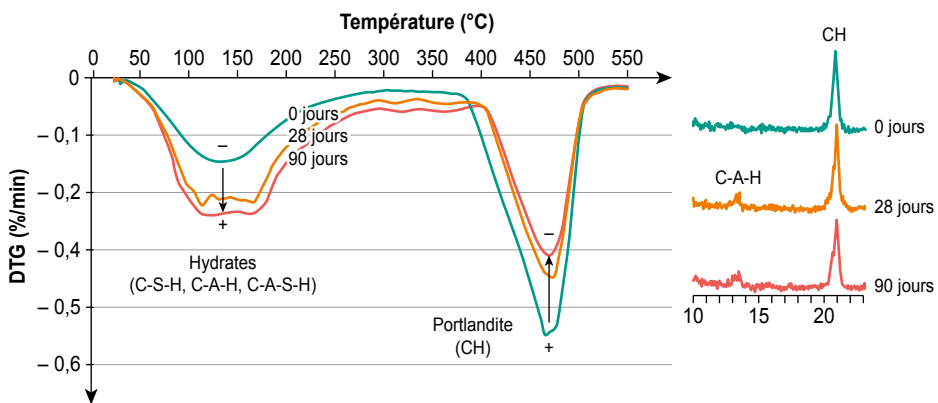
dans les fines de GBR, à âge 0). Ces nouvelles phases sont les produits de la réaction entre la chaux hydratée et le silicium et l'alumine libérés par les fines. Elles sont probablement composées de C-S-H et C-A-S-H, mais aussi d'aluminates de calcium hydratés (C-A-H), tels C_4AHx , comme on peut le voir sur le diffractogramme présenté à droite de la Figure 5.2. Ces résultats prouvent alors que ces fines de GBR ont une certaine activité pouzzolanique.

La quantification de la chaux hydratée consommée durant l'essai donne des valeurs allant de 25 % (fines de GBR Ly) à 60 % (fines de GBR-D), avec 40 % pour les fines de GBR Pa (exemple de la Figure 5.2). En fait, bien que ces valeurs paraissent importantes, l'eau chimiquement liée aux nouveaux hydrates ne représente que 1 à 2,5 % de la masse totale des échantillons secs. En supposant que seuls des C-S-H pouzzolaniques aient été formés (C/S = 1,1 et de 1,4 à 4 moles d'eau par molécule), on obtient alors entre 3 et 15 % de C-S-H dans les pâtes hydratées, ce qui est relativement faible. La calorimétrie isotherme sur les pâtes a montré des dégagements thermiques compris entre 5 et 10 J/g à 5 jours. À titre de comparaison, le métakaolin, reconnu comme pouzzolane active, dégage 50 J/g dans le même essai [M. Cyr, Rapport RECYBETON, Figure 33, § 4.4.2.4].

Ce résultat indique alors que les fines de GBR et de GBR-D sont capables de consommer de la chaux et de produire de faibles quantités d'hydrates. Elles peuvent donc être considérées comme un matériau pouzzolanique. Mais cela ne signifie pas que l'effet de cette réactivité sur les propriétés mécaniques du matériau durci soit significatif.

Figure 5.2

Réactivité pouzzolanique des fines de GBR Pa en présence de chaux hydratée, suivie par dérivée de l'analyse thermogravimétrique différentielle et diffraction des rayons X (DRX)



5.3.2.4. Effet des fines de GBR et de GBR-D sur les propriétés des mortiers

La pratique courante pour évaluer l'activité des ajouts consiste à les tester sur mortiers, en substitution d'une partie du ciment Portland. Les fines de GBR et de GBR-D ont alors été combinées à deux types de ciments, un CEM I 52,5 R et un CEM II/A-L 42,5, à des taux de substitution p de 15, 25 et 35 %. Un filler quartzueux (4 400 cm²/g) a été utilisé en tant que fines témoin chimiquement inertes, pour comparaison. Les mortiers, composés de trois parts de sable (en masse), d'une part de liant (ciment + fines de GBR), et d'un rapport eau/liant de 0,5, ont été préparés selon la norme NF EN 196-1.

5.3.2.4.1. État frais et prise

La consistance à l'état frais a été mesurée *via* le temps d'écoulement au maniabilimètre à mortier LCL, selon la norme NF P18-452. Pour le taux de substitution de 25 %, aucun effet significatif des fines de GBR n'est observé juste après malaxage. À 60 minutes, une légère diminution de la maniabilité est mesurée, comparativement au mortier témoin. Les fines de GBR-D ont montré une évolution similaire, mais avec une maniabilité légèrement plus médiocre à toutes les échéances. Ce constat est probablement lié à la teneur plus élevée en pâte hydratée de cette fine de GBR.

Le temps de prise (NF EN 196-3) mesuré sur pâte de ciment contenant 25 % de fines de GBR ou de GBR-D (avec le CEM I) montre que les fines de GBR ne modifient pas ce paramètre (3 h), contrairement aux fines de GBR-D qui accélèrent l'hydratation de 20 minutes. Ce résultat corrobore les mesures de calorimétrie isotherme. Il s'explique *a priori* par la présence des alcalins lessivés issus des fines (les alcalins étant réputés accélérateurs de l'hydratation du ciment Portland). L'utilisation d'une eau provenant de la lixiviation des fines de GBR-D a validé cette hypothèse, car le ciment a été hydraté plus rapidement avec cette eau.

5.3.2.4.2. État durci

• Indice d'activité

La résistance à la compression des mortiers a été mesurée à 1, 28 et 90 jours (conservation : 1 jour dans le moule ; dans l'eau pour les autres échéances). Les résultats ont servi à calculer un indice d'activité (IA), défini comme le rapport (en pourcent) entre la résistance à la compression du mortier préparé avec (100-p) % du ciment d'essai plus p % d'addition, en masse, et la résistance à la compression du mortier témoin préparé avec 100 % du ciment d'essai, les essais sur les deux mortiers étant effectués à la même échéance. La Figure 5.3 compare les quatre fines de GBR et les fines de GBR-D aux fillers siliceux chimiquement inertes, pour un taux de substitution de 25 % des deux ciments. On constate que :

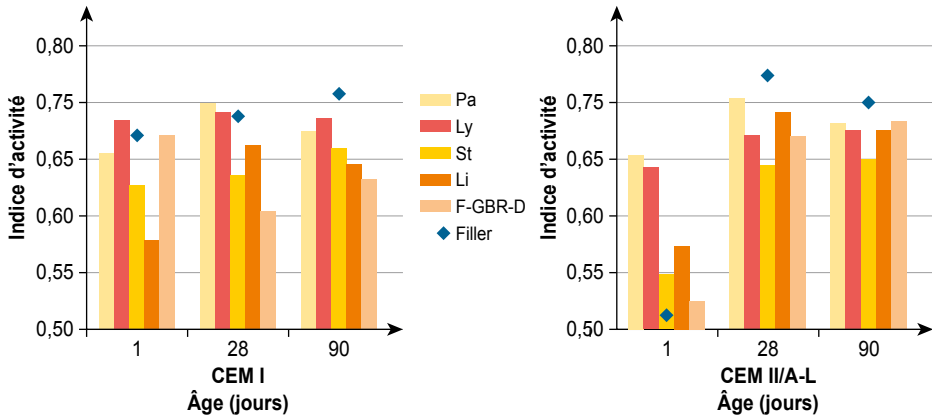
- l'IA se situe entre 0,59-0,74 pour le CEM I et 0,53-0,75 pour le CEM II/A-L ;
- l'effet de l'âge est plus significatif pour le CEM II/A-L ;

- la comparaison entre les fines de GBR et de GBR-D ne fait pas apparaître de tendances générales ;
- l'IA des fines de GBR et des fines et de GBR-D est presque toujours inférieur à celui des fillers de finesse équivalente.

Il convient de noter que l'augmentation de la finesse des fines n'a eu qu'un effet limité dans le cas des fines de GBR Pa (résultats non présentés ici).

Figure 5.3

Indice d'activité (IA) des mortiers contenant 25 % de fines (4 500 cm²/g) en remplacement des ciments CEM I et CEM II/A-L, à 1, 28 et 90 jours



• Quantification de l'activité

Le remplacement du ciment par un autre filler peut avoir un effet positif sur la résistance, telle la réaction pouzzolanique, mais aussi un effet négatif lié par exemple à la dilution provoquée par la substitution partielle du ciment par un matériau non hydraulique, à teneur en eau maintenue constante. Pour quantifier l'effet des fines de GBR et de GBR-D sur la résistance en tenant compte de l'effet de dilution, une analyse a été réalisée sur la base du modèle empirique de résistance proposé par Bolomey (équation 5.1) :

$$R_c = C_B \left(\frac{c}{e+v} - 0,5 \right) \quad (5.1)$$

où R_c est la résistance du composite, c et e sont respectivement la masse de ciment et d'eau, v est la masse d'eau qui correspond au remplissage des vides dans le mélange, et C_B est le coefficient de Bolomey, calculé à partir du mélange de référence, sans fines de GBR ou de GBR-D.

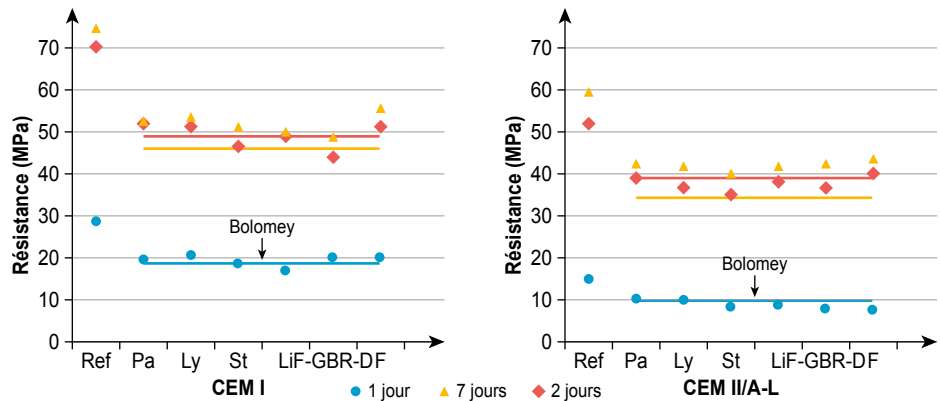
L'analyse a consisté à calculer la résistance attendue pour les mortiers contenant les fines de GBR ou de GBR-D, en utilisant les paramètres de composition des mélanges. Le calcul est basé sur l'hypothèse que la résistance dépend uniquement de la quantité réelle de ciment et d'eau, les fines de GBR

et de GBR-D étant assimilées à des charges inertes qui ne font que réduire le dosage en ciment. Ainsi, les différences éventuelles entre résistances mesurées et calculées sont attribuées au seul effet « chimique » des fines de GBR et de GBR-D.

La Figure 5.4 compare les résistances calculées aux résistances mesurées. À 1 jour, les résistances expérimentales se situent autour de la courbe de dilution, montrant que les fines de GBR et de GBR-D n'ont pas d'effet physique ou chimique significatifs sur la résistance des mortiers. À 28 et 90 jours, certaines résistances sont un peu supérieures à la courbe de dilution, sans réellement dépasser la résistance du mortier témoin incorporant la charge chimiquement inerte. Ainsi, bien que les fines de GBR et de GBR-D aient montré une petite activité pouzzolanique, les résultats présentés ici tendent à prouver qu'elles ne contribuent pas à l'amélioration significative de la résistance à long terme des mortiers.

Figure 5.4

Comparaison entre la résistance mesurée des mortiers contenant 25 % de fines et les courbes de dilution calculées avec le modèle de Bolomey



- Concept de coefficient de prise en compte k

Le concept de coefficient k décrit la contribution d'une addition minérale (via le facteur de prise en compte k) à la résistance à la compression du béton, en termes de liant équivalent. La valeur de k varie entre 0 (aucune contribution) et 1 (contribution équivalente à celle du ciment Portland), voire au-delà de 1. Selon la norme NF EN 206/CN, le concept de coefficient k intervient pour les performances de durabilité des bétons avec ajouts de type II, bien que ce coefficient soit calculé à partir des mesures de résistance. Le cas échéant, un critère de remplacement pour la durabilité est la comparaison de la résistance à la compression.

Parmi les différentes façons de calculer le coefficient k , celle utilisée ici est basée sur l'équation 5.1, où le terme C est remplacé par $C + kA$, avec A la masse de l'addition dans le béton (équation 5.2).

$$R_c = K_B \left(\frac{c + kA}{e + v} - 0,5 \right) \quad (5.2)$$

La Figure 5.5 présente les résultats du calcul du facteur k , après hydratation de 28 jours, pour les fines de GBR et de GBR-D utilisées en remplacement de (a) ; 25 % de CEM I (différentes origines des fines de GBR à 4 500 cm²/g), et de (b) ; 15, 25 et 35 % de CEM I (fines de GBR Pa, à 4 500 et 7 500 cm²/g).

La Figure 5.5a montre que :

- pour les fines de GBR-D, la valeur de k est négative à 0 à 28 jours, et proche de 0 à 90 jours. Cette addition n'apporte donc aucune contribution physique ou chimique globale à la résistance du mortier. L'explication peut être la totale hydratation de l'ancienne pâte, avec des C-S-H ne contenant plus de grains de Hadley, et/ou la présence de composés ayant un effet négatif sur l'hydratation à long terme du ciment ;
- pour les fines de GBR, les résultats sont différents selon l'origine du GBR. Les fines de GBR Pa et les fines de GBR Ly sont légèrement plus actives que les fines inertes, les fines de GBR Li et, surtout, les fines de GBR St n'ont qu'une activité limitée sur la résistance des mortiers.

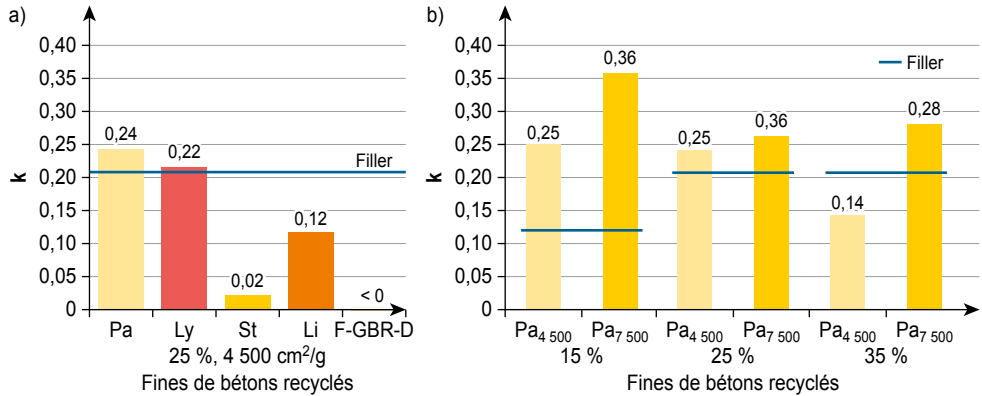
La Figure 5.5b montre l'effet de la teneur en fines et de l'augmentation de la finesse des fines de GBR Pa sur la valeur de k . On y voit que l'augmentation de la finesse conduit à des valeurs plus élevées de k , signifiant ainsi que broyer plus finement un GBR améliore logiquement son activité. La valeur k des fines de GBR Pa est plus élevée que celle des fillers inertes, pour des teneurs en fines allant jusqu'à 25 %. Il en est de même pour la teneur de 35 %, à condition que la finesse des fines de GBR soit augmentée.

On constate également que l'utilisation d'une quantité élevée de fines de GBR tend à réduire la valeur de k . Comme pour les fines de GBR-D, mais dans une moindre mesure (probablement en raison de la teneur plus faible en pâte hydratée), cela signifie alors que les fines de GBR contiennent probablement des composés qui ont un impact négatif sur le développement de la résistance des mortiers. La limitation de la teneur en fines de GBR pourrait donc être une option pour améliorer leur efficacité, puisque l'utilisation de 15 % de fines de GBR Pa a conduit à la plus forte augmentation du facteur k , par rapport aux fillers inertes utilisés à la même teneur.

On peut noter que les fillers inertes présentent une valeur k qui augmente avec le taux de substitution. Ce résultat « surprenant » a fait l'objet d'une analyse de sensibilité qui a montré qu'une variation de 1 MPa sur les mélanges à 15 % ou 35 % pouvait conduire à des valeurs k presque équivalentes. Ce résultat illustre la sensibilité élevée du coefficient k au regard des erreurs expérimentales [Cyr *et al.*, 2000].

Figure 5.5

Concept de coefficient k appliqué à 28 jours aux fines de GBR et de GBR-D, sur la base de la loi de Bolomey. a) 25 % des fines de 4 500 cm²/g ; b) 15, 25 et 35 % de fines de GBR Pa à 4 500 cm²/g



5.4. Besoins de recherche

Afin de confirmer les propriétés des ciments composés incorporant des fines de GBR, il serait souhaitable de réaliser des essais à échelle industrielle afin de vérifier statistiquement si les classes de résistance obtenues sont réalistes, au regard notamment des variations inhérentes à une ressource donnée. Par ailleurs, des fines de GBR provenant de bétons de démolition issus d'une région calcaire devraient aussi être testées, car elles pourraient donner de meilleurs résultats. Des essais de durabilité devraient également être entrepris.

Compte tenu de la présence omniprésente du quartz, il serait nécessaire de caractériser la distribution des tailles de pores (DTP) de la silice cristalline dans des conditions de broyage industriel pour s'assurer qu'elle n'a aucun effet nocif sur la santé.

Concernant l'utilisation des fines de GBR en tant que constituant du béton, les essais effectués ont montré qu'elles se comportent au mieux comme une charge inerte, avec pas ou peu d'effet pouzzolanique. Dans le contexte technologique actuel, le broyage reste une option intéressante pour recycler les fines de GBR comme charge minérale dans le béton. Cependant, compte tenu des autres voies possibles de recyclage des fines de GBR (dans le cru cimentier pour fabriquer le clinker Portland ou comme constituant principal du ciment), une étude de coût permettrait alors de retenir la meilleure option possible.

5.5. Conclusion

Concernant l'utilisation des fines de GBR en tant que constituants du ciment, les essais réalisés ont clairement montré que, selon leur composition minéralogique en relation avec la région géologique d'origine (siliceuses, granitiques et silico-calcaires), leur introduction en remplacement des fillers calcaires est une option réaliste qui permet d'obtenir des ciments courants ayant des propriétés d'usage et une résistance mécanique acceptables.

Les essais effectués sur pâtes et mortiers incorporant des fines de dépoussiérage (fines de GBR-D) et des fines obtenues par broyage de sables de béton recyclé (fines de GBR) ont montré que ces matériaux se comportent plutôt comme des charges minérales inertes, même s'ils ont une légère activité pouzzolanique.

Enfin, les fines de GBR-D se révèlent être peu efficaces en termes de contribution à la résistance des mortiers. Les fines de GBR doivent être finement broyées afin qu'elles expriment la meilleure efficacité en tant qu'addition de type I. Les sables de GBR peuvent aussi être transformés en fines de GBR par broyage, et constituer ainsi une voie intéressante pour valoriser les sables de GBR dans les bétons, dans l'hypothèse où cette coupure ne serait pas facilement réutilisable en tant que sable dans de nouveaux bétons.

Partie III.

Le béton recyclé, de la fabrication au durcissement

*Éric Garcia-Diaz*¹

Les granulats de béton recyclé (GBR) ont des caractéristiques spécifiques qui résultent de la présence de l'ancienne pâte de ciment ou du mortier poreux, mais aussi à la présence d'impuretés telles le plâtre et le gypse, par exemple. En général, par rapport aux granulats naturels, les GBR :

- sont plus légers, plus anguleux et ont des compacités plus faibles ;
- sont plus poreux, plus fragiles et ont une plus grande absorption d'eau ;
- sont susceptibles de réduire l'efficacité des superplastifiants en raison des interactions potentielles avec les sulfates et les impuretés.

Ces caractéristiques spécifiques doivent être prises en compte pour concevoir des bétons ayant des propriétés stables à l'état frais, c'est-à-dire entre le malaxage et la prise. Quel est, selon le type de béton de GBR (bâtiment ou génie civil), le niveau critique de substitution des sables et gravillons naturels par des sables et gravillons de GBR au-delà duquel ces propriétés sont significativement impactées ? Comme recommandé pour les granulats légers, faut-il ou non pré-saturer les sables et gravillons de GBR avant le malaxage ?

Cette troisième partie de l'ouvrage s'intéresse aux bétons de GBR dans leur jeune âge. Elle est subdivisée en trois chapitres :

- le premier (chapitre 6) concerne la fabrication du béton de GBR, en mettant l'accent sur les mécanismes d'attrition pour différents modes de malaxage, avec des GBR secs ou saturés ;
- le second (chapitre 7) concerne le maintien de la maniabilité (par suivi de l'affaissement) et la stabilité rhéologique (par suivi du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique) des bétons de GBR pendant les deux premières

1. C2MA, IMT Mines Alès, Université Montpellier, Alès.

heures qui suivent le malaxage. Sont abordées l'influence du taux de GBR, du degré de saturation en eau, ainsi que du couple ciment portland-superplastifiant ;

- le troisième (chapitre 8) concerne le ressuage, le retrait et la fissuration du béton au jeune âge. Les comportements des bétons de granulats naturels et des bétons de GBR, pour des applications de bâtiment et de génie civil, sont comparés. L'influence du mode de dessiccation (avec ou sans vent), la teneur en GBR et le degré de saturation en eau sont également étudiés.

Chapitre 6.

Fabrication du béton recyclé

J-M. Potier¹, B. Cazacliu²

Résumé – Il existe plusieurs difficultés liées à l'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR) dans l'industrie du Béton Prêt à l'Emploi (BPE), parmi lesquelles la nécessité d'avoir un ou des silos supplémentaires. Leur implantation n'est cependant pas toujours facile pour les centrales situées en milieu urbain, là où les GBR sont principalement disponibles. Un autre problème délicat est le contrôle de la teneur en eau des granulats et de son impact sur la rhéologie du béton frais. Il est généralement admis que l'absorption d'eau élevée des GBR génère des difficultés pour un dosage précis de l'eau efficace de la formule. De même, l'eau absorbée par les GBR, entre la fin du malaxage et le coulage sur chantier, peut faire évoluer la consistance du béton durant le transport.

Le Projet National RECYBETON a étudié l'influence du taux de pré-saturation des GBR sur la rhéologie des bétons de GBR (voir chapitre 7 pour plus de détails). L'état initial de pré-saturation des GBR n'a pas réellement d'effet sur les propriétés rhéologiques du béton frais à la fin du malaxage, le temps de malaxage étant généralement suffisant pour qu'un GBR sous-saturé absorbe une grande partie de l'eau nécessaire à sa saturation. Un autre problème est l'abrasion des granulats durant le malaxage. Afin de mieux mesurer son importance et d'en tenir compte dans la formulation des bétons de GBR, la friabilité des GBR a été étudiée dans différentes conditions de malaxage. La diminution de la taille des gains durant cette phase est causée par une combinaison d'actions de type attrition/fragmentation, dont l'ampleur est reliée à la valeur du coefficient MDE du GBR, et à sa teneur en pâte et en mortier résiduels. La pâte de ciment fraîche protège les GBR durant le malaxage, et limite leur abrasion. Toutefois, pour un malaxage inférieur à une minute, durée habituelle dans un contexte industriel, les mécanismes d'attrition n'ont pas encore réellement débuté, et par conséquent n'impactent pas significativement la qualité du béton.

Ces résultats ont été vérifiés lors de la fabrication, avec les outils industriels habituels, des bétons mis en œuvre sur les chantiers expérimentaux du Projet National RECYBETON (voir partie 7).

1. SNBPE, Paris.

2. IFSTTAR, GPEM, Nantes.

6.1. Introduction

Le béton est un matériau largement utilisé pour construire les bâtiments et les infrastructures, mais, jusqu'à présent, les granulats de béton recyclé (GBR) ont surtout été réutilisés dans les assises routières et dans les remblais, en remplacement des granulats naturels (GN). Cette solution n'est pas réellement satisfaisante, car la logique d'une économie circulaire efficace voudrait que les « vieux » bétons soient réutilisés dans de « nouveaux » bétons...

Les produits du recyclage des bétons représentent des quantités importantes ; en France, sur les 240 millions de tonnes de déchets inertes provenant de l'industrie de la construction, 18 millions environ sont des bétons de déconstruction (*cf.* chapitre 29).

Même si la France dispose d'importantes ressources géologiques de qualité, leur répartition inégale sur le territoire national et les difficultés croissantes pour obtenir les autorisations d'ouverture de nouvelles carrières font qu'il devient inéluctable de devoir utiliser cette « nouvelle ressource », surtout en zone urbaine.

6.2. État de l'art

6.2.1. Généralités

L'utilisation dans de nouveaux béton des granulats issus de la déconstruction d'anciens bétons n'est pas récente. Le premier État de l'Art sur le sujet, publié par la RILEM, remonte à 1978 [Nixon, 1978].

La première utilisation à grande échelle de matériaux provenant de la démolition des bâtiments, en tant que granulats dans le béton frais, date de la Seconde Guerre mondiale. Durant et après la guerre, les décombres issus des bombardements, surtout aériens, ont été utilisées dans les bétons de la reconstruction des villes [Buck, 1972].

Aujourd'hui, dans de nombreux pays, les bétons incorporant des granulats de béton recyclé (GBR) ont dépassé le stade de la recherche et sont devenus une réalité concrète [Grübl et Nealen, 1998 ; Koulouris *et al.*, 2004 ; Poon et Chan, 2007b].

6.2.2. Spécifications professionnelles

En 1994, des « Spécifications pour le béton à base de granulats recyclés, Recommandations pour la démolition et le recyclage du béton et des maçonneries » [RILEM, 1994] ont été publiées. Il s'agit des premières recommandations internationales pour l'utilisation des GBR dans la production des bétons. Dans cette publication, différentes catégories de gravillons recyclés ont été définies.

Elle recommande également que les granulats recyclés soient issus principalement de bétons concassés, en raison de leur qualité supérieure. Ils sont alors qualifiés de granulats de béton recyclé (GBR). En outre, elle préconise de n'utiliser que les gravillons recyclés (pas les sables), de sorte à ne pas affecter les propriétés finales du béton.

En 2009, au Portugal, des travaux expérimentaux ont été menés afin d'évaluer la faisabilité de l'utilisation des sables de GBR pour produire de nouveaux bétons [Evangelista et de Brito, 2010]. Ils ont montré que le remplacement complet du sable naturel par du sable recyclé présente de réelles difficultés, vis-à-vis de la durabilité notamment. Cependant, de faibles taux de substitution (par exemple 30 %) sont possibles pour produire certains bétons de structure.

La norme européenne EN 206 et son application française [NF EN 206/CN, 2014] contiennent des recommandations sur l'utilisation des gravillons de GBR dans le béton (Annexe E, et Annexe NA E pour la version française). Mais aucune information spécifique sur leur rôle durant la fabrication du béton n'y est donnée (voir aussi le chapitre 14). En réalité, peu d'informations existent dans les documents normatifs sur les problèmes spécifiques liés au gâchage et à la production des BPE incorporant des GBR.

En octobre 2014, « l'Institut d'Architecture du Japon » a publié une « Recommandation pour la Formulation, la Production et les Pratiques Constructives en Béton avec des Granulats de Béton Recyclé » [Noguchi, 2015]. Ce document donne des recommandations sur les principes de formulation et de fabrication, les modes de transports, les méthodes constructives et le contrôle qualité des bétons incorporant des GBR.

En particulier, pour la fabrication, les exigences sont les suivantes :

- le parc de stockage de GBR doit être équipé de séparations pour éviter le mélange avec les autres granulats, et il doit être bien entretenu et régulièrement nettoyé ;
- la centrale doit disposer de plusieurs silos à granulats ;
- la centrale doit avoir des équipements d'aspersion pour stabiliser l'humidité de surface des GBR avant utilisation.

6.2.3. Fabrication du béton avec des GBR en centrale de BPE

6.2.3.1. Teneur en eau (humidité)

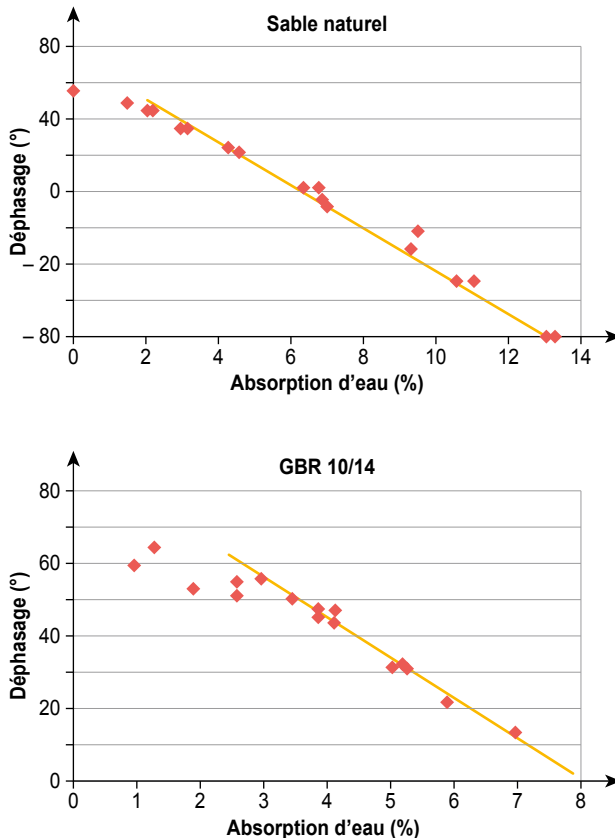
Une question essentielle est le contrôle de la teneur en eau des granulats et de son impact sur la consistance et la rhéologie du béton frais. En pratique, il est difficile de mesurer en temps réel la teneur en eau des GBR, alors que l'eau qu'ils apportent au mélange est souvent très conséquente. S'il est difficile de mesurer la teneur en eau des gravillons naturels, cela l'est plus encore pour les GBR car la mesure est tributaire de leur forte absorption d'eau. En effet,

les capteurs à micro-ondes utilisés donnent une réponse différente entre l'eau absorbée et l'eau non absorbée par les granulats. Ce problème apparaît sur la Figure 6.1, qui compare les réponses d'un capteur prototype utilisé sur un sable naturel riche en fines et sur un GBR 10/14 [Cazacliu, 2013]. Le capteur, équipé d'un émetteur et d'un récepteur, est une technologie micro-ondes sans contact, développée par Hydrostop. Les micro-ondes traversent le granulat et le décalage de phase (angle) entre ondes émises et ondes reçues est mesuré. De par sa conception, le capteur est censé mesurer aussi bien l'humidité des gravillons que celle des sables, avec la même précision.

On observe bien une évolution linéaire entre le décalage de phase et la teneur en eau des granulats, pour les deux matériaux, du moins pour les teneurs en eau élevées. Cependant, pour le GBR, lorsque la teneur en eau est inférieure à 3,5 %, le comportement du capteur est moins probant (les points ne sont

Figure 6.1

Évolution de l'angle de déphasage d'un capteur micro-ondes en fonction de l'absorption d'eau pour un sable naturel contenant un taux élevé de fines et pour un GBR 10/14



plus dans l'alignement) ; cette valeur est légèrement inférieure à celle de l'absorption d'eau du GBR utilisé, qui est $Ab_{24} = 4,2 \%$ environ. On observe un comportement similaire avec le sable naturel, toujours lorsque la teneur en eau devient inférieure à l'absorption d'eau (qui est de $0,6 \%$). Mais ici la plage de teneurs en eau concernée est bien plus réduite, ce qui n'a finalement que peu de conséquences sur la régularité de béton.

6.2.3.2. Pré-saturation des GBR

Il est généralement admis que l'absorption d'eau élevée des GBR [Sagoe-Crentsil, 2001 ; Quattrone *et al.*, 2016] et leur hétérogénéité [Joseph *et al.*, 2015] rendent difficile le maintien d'un même dosage en eau d'une gâchée à l'autre. De plus, l'eau absorbée pendant le transport entre la fin du malaxage et la mise en œuvre peut changer la consistance du béton. [Belin *et al.*, 2014] ont étudié des GBR qui ont absorbé jusqu'à 5% de l'eau du mélange entre 100 secondes et 1 heure. Ils en déduisent que les pertes de maniabilité dues à l'absorption d'eau diffèrent d'un GBR à l'autre. Ils signalent également que la cinétique d'absorption d'eau des GBR est différente entre eau pure et pâte de ciment. On rejoint ici les travaux de [Bello, 2014] qui a montré que la cinétique d'absorption d'eau des granulats légers, plongés dans une pâte de ciment, dépendait fortement du rapport eau/poudre de la pâte.

Il existe donc une influence de la teneur en eau initiale des GBR sur la qualité du malaxage des bétons de GBR. Afin d'éviter des variations de consistance, [Gonzalez *et al.*, 2013] ont proposé d'immerger les GBR dans l'eau pendant 10 minutes, suivi éventuellement d'un bref séchage à l'air, pour éliminer l'eau de surface subséquente. La saturation complète afin d'éviter tout transfert d'eau vers les granulats a aussi été proposée par d'autres auteurs [Hansen, 1992a].

[Barra et Vazquez, 1996] et [Poon *et al.*, 2004] ont étudié l'effet de l'utilisation de GBR séchés à l'étuve, séchés à l'air ou saturés surface sèche avant malaxage, en considérant une quantité d'eau totale constante dans le béton. Ils concluent que le séchage à l'air des GBR donne des bétons de meilleure maniabilité et de meilleure résistance à la compression. Les auteurs proposent que l'état saturé ne doit pas être retenu en raison du risque de ressuage. Toutefois, pour les sables de GBR, [Ji *et al.*, 2013] signalent que la sensibilité à la fissuration du béton augmente avec la teneur en eau initiale des granulats, dans une gradation croissante allant du séchage à l'étuve jusqu'à l'état saturé surface sèche.

À l'évidence, l'utilisation de GBR pré-humidifiés à des teneurs en eau différentes, en gardant l'eau ajoutée constante (donc à différentes quantités d'eau totale) conduit à une augmentation de l'ouvrabilité et une diminution de la résistance à la compression [Mefteh *et al.*, 2013 ; Sánchez-Roldán *et al.*, 2016]. [Mefteh *et al.*, 2013] ont également étudié la variation de l'affaissement de bétons incorporant des GBR séchés à l'étuve, saturés surface sèche ou pré-humidifiés à un état intermédiaire, en gardant l'eau ajoutée constante.

La perte d'affaissement n'est pas influencée par la teneur en eau initiale des granulats (quel que soit l'affaissement initial), et elle est comparable à celle d'un béton de granulats naturels. Ce résultat est interprété comme la conséquence d'une absorption rapide des GBR, qui se produit probablement pour l'essentiel pendant le temps de malaxage. D'ailleurs, [Salgues *et al.*, 2016] ont confirmé qu'un GBR partiellement saturé avait une cinétique d'absorption rapide, conduisant à sa saturation complète durant le malaxage. Cependant, plus récemment, [Khoury *et al.*, 2017] ont montré qu'un GBR pré-humidifié plusieurs semaines avant le malaxage contenait une plus grande quantité d'eau absorbée à la fin du malaxage qu'un GBR pré-humidifié au même taux, mais juste avant le malaxage.

Pour les applications industrielles, [Etxeberria *et al.*, 2007] proposent d'asperger le stock de granulats avec un sprinkler. Une recherche plus générale d'un procédé de pré-saturation, pratique et efficace, pouvant être appliqué en centrale de BPE, a été réalisée par [Ferreira *et al.*, 2011].

6.2.3.3. Procédure de malaxage – effet de la séquence de chargement

La technique du sable enrobé de ciment (SEC) a été proposée dans les années 1980 pour améliorer la résistance à la compression des bétons ordinaires à base de granulats naturels [Higuchie, 1980 ; Hayakawa et Itoh, 1982]. Cette méthode permet d'accroître jusqu'à 25 % la résistance, par rapport à un malaxage normal (en une seule étape) et pour la même quantité d'eau totale. Ils expliquent ce gain par une amélioration de l'interface pâte de ciment – granulat [Tamimi, 1994].

À la fin des années 1990, [Kurowa *et al.*, 1999] ont montré que l'eau absorbée par les GBR avant ou au cours du malaxage, pouvait améliorer la résistance du béton. Ce résultat a servi à adapter la méthode SEC à la spécificité des GBR, en augmentant la quantité d'eau introduite au départ (50 % de l'eau totale) et en retardant l'introduction du ciment [Ryu, 2002b ; Otsuki *et al.*, 2003]. Cette méthode de malaxage en deux étapes améliore effectivement le comportement mécanique des bétons de GBR (augmentation d'environ 15 % de la résistance à la compression, et de 20 à 25 % de la résistance à la traction) et leur durabilité (pénétration des ions chlorure et carbonatation), par comparaison au malaxage en une seule étape. L'effet bénéfique s'explique par une amélioration des propriétés de la nouvelle auréole de transition (AT) [Otsuki *et al.*, 2003 ; Li *et al.*, 2012]. Cette méthode appelée « approche du malaxage en deux étapes » (Two-Stage Mixing Approach TSMA) [Tam *et al.*, 2005] a été reprise ces dernières années. [Tam *et al.*, 2007] ont montré un effet bénéfique qui croît concomitamment au taux de substitution en GBR. [Poon et Chan, 2007b] ont utilisé cette procédure pour les bétons incorporant du sable de GBR, ce qui a permis de limiter certains effets néfastes, comme la chute de résistance. [Babu *et al.*, 2014] ont confirmé que cette méthode de malaxage améliorait la résistance à la compression et la durabilité des bétons à haute

performance (absorption d'eau, absorptivité, pénétration des ions chlorure, retrait de séchage et résistance à l'abrasion). Cependant, cette méthode de malaxage n'a pas d'effet avéré sur la résistance au gel des bétons de GBR à air entraîné [Liu *et al.*, 2016].

[Brand *et al.*, 2015] ont montré que la méthode TSMA est plus efficace si les GBR sont partiellement saturés, par comparaison à leur utilisation après séchage à l'étuve ou saturation.

D'autres procédés de malaxage ont été étudiés. La méthode d'encapsulation des granulats avec de la pâte de ciment (malaxage de la pâte de ciment tout d'abord, puis incorporation du sable et des gravillons) a un effet mécanique intermédiaire sur le béton de GBR, entre malaxage normal et procédé TSMA [Liu *et al.*, 2016]. L'approche du sable enrobé (Sand Enveloped Mixing Approach SEMA) a donné de meilleurs résultats que le procédé TSMA en termes de résistance à la compression des bétons de GBR. La méthode SEMA consiste à malaxer le sable (naturel), le ciment et 3/4 de l'eau totale avant l'ajout des gravillons de GBR, ce qui permet de mélanger plus facilement le sable avec le ciment et l'eau, avant que les GBR n'absorbent de l'eau [Liang *et al.*, 2015].

6.2.3.4. *Enrobage des granulats*

Le procédé spécifique de malaxage TSMA permet de recouvrir la surface des GBR par le coulis cimentaire, conduisant ainsi à une meilleure résistance à la compression des bétons de GBR. Il a été observé que l'immersion des GBR dans un liquide pouzzolanique augmente la résistance du béton de GBR, mais aussi que ce procédé a un effet négatif sur l'ouvrabilité du béton frais [Kurowa *et al.*, 1999]. Plusieurs travaux ont cherché à combiner l'utilisation d'additions minérales avec le procédé de malaxage [Ryu, 2002b]. Par exemple, l'effet d'additions (cendres volantes ou laitier) sur la résistance à la compression et la pénétration des ions chlorure des bétons de GBR peut être bénéfique en utilisant une méthode de malaxage en trois étapes, comparé à un malaxage en deux étapes [Kong *et al.*, 2010]. En outre, [Tam et Tam, 2008] ont montré que l'ajout de fumées de silice combiné au procédé TSMA développe une épaisse couche interfaciale autour des granulats et donc une plus grande résistance du béton.

Plus radicalement encore, [Liang *et al.*, 2015] ont proposé des prétraitements de surface conduisant à former une nouvelle couche de pâte de ciment enrobant les GBR, appliqués sept jours avant la fabrication du béton.

6.2.3.5. *Méthode de malaxage*

La méthode de malaxage peut également améliorer les propriétés mécaniques ou la maniabilité du béton de GBR. Par exemple, [Teramoto *et al.*, 1998] ont proposé de faire pénétrer sous vide partiel de la pâte de ciment fluide dans les microfissures des GBR. Ils ont observé que l'utilisation d'un agent haut réducteur d'eau rend le système encore plus efficace vis-à-vis de la résistance à la compression.

Une méthode alternative est celle du malaxage sous vibration. [Heng *et al.*, 2005] ont constaté une amélioration de la résistance à la compression de plus de 20 % à 91 jours par rapport à un béton mélangé sans vibration. Cependant, l'effet a été observé uniquement pour des GBR de moindre qualité, mais pas pour ceux de bonne qualité.

6.2.3.6. Utilisation de pré-mélanges granulaires

La recommandation japonaise [Noguchi, 2015] définit certains obstacles à l'utilisation des GBR dans le béton, l'un d'eux étant la nécessité de silos supplémentaires, condition souvent difficile à réaliser pour les centrales implantées en zone urbaine, là où se trouvent les GBR le plus souvent. Pour éviter ce problème, une solution est d'utiliser des pré-mélanges granulaires composés directement en carrière, avec une partie des granulats naturels substituée par des GBR. Cette solution, qui permet l'utilisation de GBR sans modification de la configuration de la centrale, est traitée au chapitre 33.

6.3. Résultats RECYBETON

6.3.1. Influence du taux de présaturation sur la rhéologie des bétons de GBR

L'étude réalisée dans le cadre du Projet National RECYBETON a concerné le comportement à l'état frais de bétons incorporant des sables et des gravillons de GBR (voir chapitre 7). Le principal objectif était d'étudier l'évolution de la rhéologie d'un béton C25/30 de consistance S4, entre 0 et 90 minutes, en fonction de la teneur en eau initiale des GBR. Les mélanges étudiés comprenaient un béton à 100 % de gravillons de GBR (0S100G), avec trois niveaux de présaturation du gravillon de GBR ($Ab_{24} + 1 \%$; $0,75Ab_{24}$; $0,3Ab_{24}$), et un béton à 30 % de sable de GBR (30S0G), avec cinq niveaux de présaturation du sable de GBR ($1,2Ab_{24}$; Ab_{24} ; $0,87Ab_{24}$; $0,5Ab_{24}$; $0,33Ab_{24}$). La teneur en eau totale a été gardée constante pour chaque type de béton (0S100G et 30S0G). De même, il a été décidé de maintenir constante la consistance initiale, égale à la limite haute de la classe S4 (affaissement de 21 cm).

Les principaux résultats sont les suivants :

- le temps de malaxage habituel est suffisant pour que les GBR sous saturés absorbent une grande partie de l'eau nécessaire à leur saturation. Ce résultat est en accord avec la méthode de gâchage utilisée pour les chantiers expérimentaux (partie 7) : pas de saturation des GBR, ajout de l'eau pour atteindre l'eau efficace souhaitée en tenant compte de la teneur en eau des GBR ;
- si des appareils permettant une pré-saturation sont disponibles, les résultats suggèrent que la teneur en eau des GBR soit comprise entre

0,8Ab₂₄ et Ab₂₄, bon compromis pour maintenir le seuil de cisaillement et la viscosité tout en minimisant les effets néfastes du temps sur les propriétés d'écoulement du béton.

6.3.2. Abrasion durant le malaxage

6.3.2.1. Programme

Durant le malaxage, les constituants du béton subissent des contraintes qui peuvent altérer leur intégrité en modifiant leur taille et en produisant des éléments fins. Afin de mieux comprendre les évolutions et, *in fine*, améliorer la formulation des bétons de GBR, la friabilité de GBR (composés à 99 % de bétons industriels broyés) a été étudiée avec différents appareils et différentes configurations de malaxage :

- un malaxeur planétaire de 30 litres,
- un malaxeur intensif vertical Eirich de 5 litres avec système excentrique courant/contre-courant (agitateur tournant dans le même sens ou dans le sens contraire au sens de rotation de la cuve inclinée) ; la vitesse de l'agitateur a été fixée à 150 tr/min (vitesse lente), 300 tr/min (vitesse nominale de laboratoire) et 500 tr/min (vitesse très rapide),
- une bétonnière à tambour de 40 litres.

Trois critères ont été évalués à différents temps de malaxage : la perte de masse des gravillons (fraction inférieure à 2,5 mm), la granularité et l'angularité.

Tout d'abord, trois gravillons de classe initiale 10/14 mm ont été testés dans un béton type : deux GBR de MDE 21 et 27 respectivement et un granulats naturel témoin, de MDE 6. Selon les essais, les GBR ont été introduits humides ou secs. La procédure de malaxage a été la suivante : mélange à sec durant 35 secondes puis introduction de l'eau, et malaxage humide jusqu'à 300 secondes.

Des essais complémentaires ont été effectués avec le gravillon de GBR 10/14 de MDE 21 et un gravillon de GBR 14/20 plus gros, de même origine et de même MDE, tous deux malaxés seuls – c'est-à-dire sans les autres composants –. Le malaxage a été réalisé soit à sec, dans le malaxeur planétaire de 30 litres, soit en conditions humides dans la bétonnière à tambour.

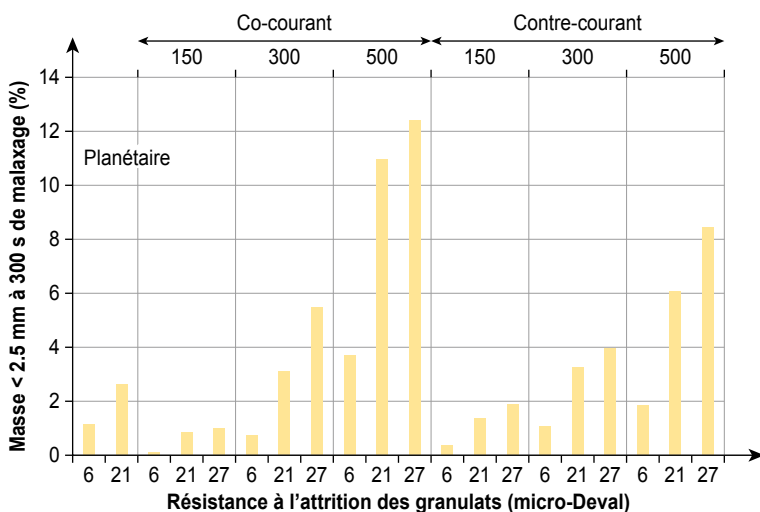
6.3.2.2. Résultats

La dégradation des GBR est considérablement augmentée lorsque la vitesse de malaxage atteint 500 tr/min dans le malaxeur Eirich (Figure 6.2). Ce résultat est valable à la fois pour les deux configurations, à co-courant et à contre-courant, et concerne tous les types de granulats : MDE 6, 21 et 27. Cependant, le malaxage à co-courant est de loin le plus dommageable. À la vitesse habituelle de malaxage (300 tr/min), la perte de masse est similaire pour les deux modes de malaxage, et comparable au résultat du malaxage dans le malaxeur planétaire. Enfin, lorsque la vitesse de malaxage diminue encore,

le malaxage co-courant devient légèrement moins agressif que celui à contre-courant. Globalement, la perte de masse augmente plus vite que la vitesse de malaxage dans la méthode à co-courant alors que la linéarité semble meilleure dans la méthode à contre-courant.

Figure 6.2

Masse de la fraction inférieure à 2,5 mm après 300 s de malaxage humide dans les trois configurations de malaxage et pour les 3 types de granulats 10/14 selon [Moreno *et al.*, 2015]



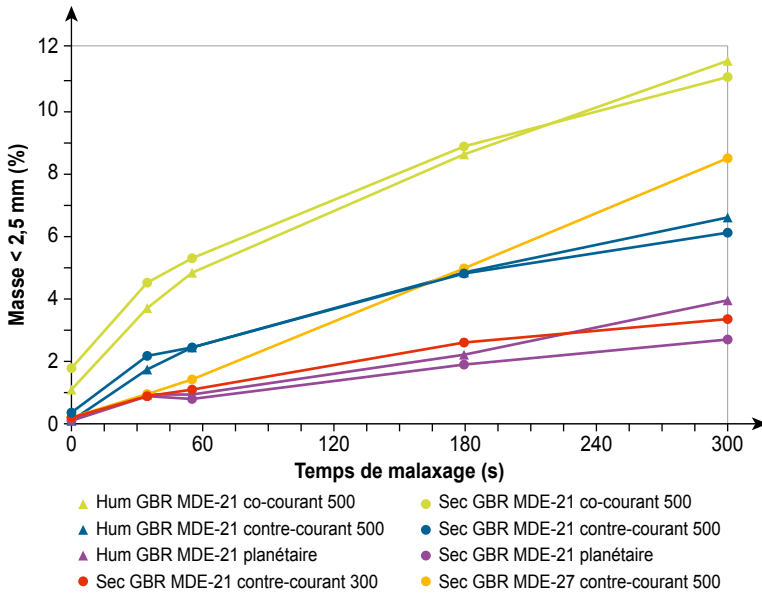
Pour le GBR de MDE 21, la perte de masse augmente plus vite avec le temps de malaxage, que ce soit pour un malaxage à vitesse lente ou à vitesse rapide (Figure 6.3). Ce résultat s'explique par la nature composite de ce granulat, qui est formé de mortier et de pierre naturelle. On suppose alors que le mortier périphérique est tout d'abord fragmenté, et que le granulat se « renforce » au fur et à mesure qu'apparaissent la pierre ou le mortier de qualité supérieure. La teneur en mortier du gravillon de GBR de MDE 27 est plus élevée, ce qui peut expliquer son taux de perte de masse constant au cours du malaxage. Il faut noter que le GBR de MDE 27 a été fabriqué à partir du GBR de MDE 21, par séparation densimétrique à l'aide d'un système de Jig à eau (voir chapitre 2 « traitement des granulats recyclés » pour obtenir une description de la méthode).

Avec le malaxeur de laboratoire et le temps de malaxage habituel, la perte de masse du gravillon naturel (GN) a été inférieure à 1 %. Ce pourcentage atteint 3 % pour le GBR de bonne qualité (MDE 21) et 5 % pour le GBR de qualité moindre (MDE 27) (Figure 6.3). Cette dernière valeur devrait être logiquement plus élevée, compte tenu de la méthode avec laquelle le GBR de MDE 27 a été produit (voir les explications ci-dessus).

La teneur en eau initiale du GBR, qu'il soit séché à l'étuve (« Sec ») ou saturé (« Humide »), n'a aucune incidence sur l'attrition lors du malaxage (Figure 6.3).

Figure 6.3

Évolution de la fraction inférieure à 2,5 mm d'un GBR 10/14, selon [Moreno *et al.* 2015]



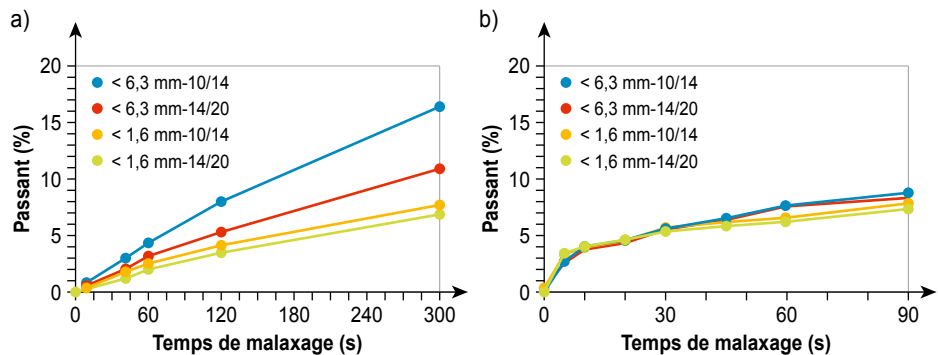
L'analyse de l'évolution de la granularité au cours du malaxage montre que c'est à la fois les mécanismes de clivage/fragmentation (création de particules de tailles intermédiaires) et d'attrition (création de particules fines) qui contrôlent la dégradation des granulats [Moreno *et al.*, 2016]. L'analyse de l'angularité montre que la surface des GBR est plus lisse, et que les angles sont plus émoussés et arrondis après malaxage [Moreno *et al.*, 2015, Moreno *et al.*, 2016]. Ce sont donc les mécanismes d'attrition qui sont globalement plus influents que ceux de clivage, du moins pour les méthodes de malaxage testées. En effet, la configuration du malaxeur influence fortement la part respective attribuée aux mécanismes d'attrition et de clivage.

Pour les GBR secs malaxés seuls avec le malaxeur planétaire vertical, sans autre constituant, comme le ciment, la granularité évolue de la même façon que durant le malaxage du béton [Hamard et Cazacliu, 2014b]. À l'opposé, le malaxage dans la bétonnière à tambour produit une légère attrition des GBR humides. En effet (Figure 6.4), dans le malaxeur planétaire, la masse des grains de tailles inférieures à 1,6 et 6,3 mm créés lors du malaxage est presque égale à celle de la masse des grains de tailles inférieures à 1,6 mm, tandis que dans la bétonnière à tambour, la fraction perdue est uniquement composée de particules fines. Le comportement des gravillons de GBR est semblable,

avec un effet d'attrition très similaire, quelle que soit la taille initiale du GBR. Évidemment, le clivage dans le malaxeur planétaire produit d'autant plus de grains de tailles intermédiaires que la taille du GBR de départ est grande. Cependant, une analyse plus détaillée de l'évolution de la granularité avec le temps de malaxage montre que pour les deux tailles de GBR, le clivage produit une majorité de particules de taille avoisinant 4 mm [Hamard et Cazacliu, 2014b]. Cela s'explique par la séparation des grains du sable primaire du béton parent, sous le cisaillement imposé par le malaxeur planétaire.

Figure 6.4

Évolution du passant à 1,6 mm et 6,3 mm : a) dans le malaxeur vertical planétaire (GBR sec) et b) dans la bétonnière à tambour (GBR humide) ; les GBR dans ces essais ont un MDE de 21 (à la fois pour les fractions 10/14 et 14/20) (analyse fournie par E. Hamard)



Des mesures d'absorption d'eau ont été effectuées sur les différentes classes granulaires de gravillons après malaxage, afin d'analyser l'évolution de la teneur en mortier avec le temps de malaxage. De manière générale, la teneur en mortier est plus élevée pour les petits gravillons, et la quantité de mortier diminue avec le temps de malaxage [Hamard et Cazacliu, 2014b]. Le comportement dans la bétonnière à tambour est comparable, mais les évolutions sont bien plus lentes.

6.3.2.3. Conclusion

On peut en conclure que le malaxage dans un malaxeur à forte énergie produit des effets néfastes sur les GBR, en réduisant la taille et en produisant des fines supplémentaires, surtout lorsque le temps de malaxage est long (comme déjà signalé par ailleurs de différents auteurs ayant traité le malaxage des bétons de GBR). On propose alors que la formulation des bétons de GBR se fasse en tenant compte des conditions réelles du malaxage, et que le temps de malaxage soit maintenu constant entre les différentes gâchées.

6.4. Besoin de recherche

Une façon d'avoir un meilleur contrôle de la rhéologie du béton serait de développer un suivi en temps réel de la teneur en eau, adapté aux GBR. Pour améliorer la qualité des granulats, il serait également intéressant de disposer d'un meilleur suivi de la teneur en sulfate des GBR. Certaines études pourraient aussi concerner l'impact de l'introduction du sable de GBR sur l'abrasion des gravillons, et sur son influence sur le malaxage (saturation, évolution sur la rhéologie pendant le transport).

6.5. Conclusion

Même si certaines questions restent encore en suspens, les expériences antérieures et les essais réalisés ici montrent que la réutilisation des GBR dans le béton est possible. Néanmoins, pour promouvoir son développement, l'utilisation de prémélanges devrait être encouragée, bien que cette solution présente un certain nombre d'inconvénients qui doivent être maîtrisés (nécessité de garder des stocks de granulats naturels pour certains marchés comme les bétons architectoniques, difficulté de vérifier la quantité de sable de GBR dans le mélange, augmentation des distances de transport, etc.). Par ailleurs, il n'y a pas d'effet indésirable significatif de l'humidité initiale des GBR sur les propriétés rhéologiques du béton frais à la fin du malaxage. Le temps de malaxage est suffisant pour que les GBR sous saturés absorbent la majeure partie de l'eau nécessaire à leur saturation. La réduction de la taille des GBR au cours du malaxage est causée par une combinaison de processus d'attrition et de fragmentation. L'intensité de ces phénomènes est tributaire du MDE (exprimant la résistance à l'abrasion) du GBR, et de sa teneur en pâte de ciment et en mortier adhérent. La pâte de ciment fraîche protège le GBR lors du malaxage et limite l'impact des processus d'attrition et de fragmentation. Toutefois, pour un temps de malaxage inférieur à une minute, durée fréquente en contexte industriel, l'attrition n'est pas très intense et n'impacte pas réellement la qualité du béton produit. Aucune difficulté de cette nature n'a été rencontrée lors de la fabrication des bétons recyclés utilisés sur les six chantiers expérimentaux du Projet National RECYBETON (partie 7).

Chapitre 7.

Effet des granulats de béton recyclé sur les propriétés du béton frais

E-H. Kadri¹, M. Mouret², D. Rogat³, Z.A. Tahar¹

Résumé – Ce travail avait pour objectif d'étudier l'effet de la teneur en eau initiale et du couple ciment-adjuvant sur le comportement des bétons lorsque le sable et/ou les gravillons naturels sont substitués à différents taux par des granulats de béton recyclé (GBR). Les paramètres rhéologiques mesurés ont été le couple et le seuil de cisaillement, le rapport moment/vitesse de rotation en régime permanent et la viscosité plastique. L'affaissement au cône d'Abrams, la teneur en air et la masse volumique ont également été mesurés. Les essais ont été réalisés entre la fin du malaxage et 90 minutes, afin de suivre dans le temps l'évolution des paramètres précédents. La demande en eau et la quantité de superplastifiant ont été ajustées afin d'avoir toujours la même classe initiale de consistance S4, soit un affaissement visé de 200 ± 20 mm. L'humidification préalable des GBR n'a pas d'effet significatif sur les propriétés rhéologiques du béton frais en fin de malaxage. Le temps de malaxage est suffisant pour que les GBR sous saturés absorbent une grande partie de l'eau nécessaire à leur saturation. Une teneur en eau des GBR comprise entre $0,8Ab_{24}$ et Ab_{24} (Ab_{24} étant l'absorption d'eau des GBR à 24 heures) paraît être un bon compromis pour minimiser l'effet négatif de l'absorption d'eau sur les propriétés d'écoulement du béton, en terme de seuil de cisaillement et de viscosité plastique. Les propriétés du béton de GBR dépendent du couple ciment/adjuvant, mais aussi du taux de substitution des granulats naturels par des GBR. Il y a donc une réelle influence des GBR sur la compatibilité (équilibre physico-chimique) du couple ciment/adjuvant. Cette influence est plus marquée avec les sables de GBR qu'avec les gravillons de GBR. Les résultats montrent également que, dans les conditions des essais réalisés, plus le pourcentage de substitution est élevé, plus la rhéologie est affectée. Il faut cependant distinguer les bétons contenant des sables de GBR, pour lesquels une dégradation apparaît lorsque le taux de substitution dépasse 30 %, et les bétons contenant des gravillons de GBR, pour lesquels peu d'effets sont observés, y compris jusqu'à 100 % de substitution.

1. L2MGC, Université de Cergy-Pontoise.

2. LMDC, INSA de Toulouse.

3. Sigma-Béton, L'Isle d'Abeau.

7.1. Introduction

La plupart des études qui visent à développer l'incorporation des granulats de béton recyclé (GBR) dans les bétons ne s'intéressent qu'à l'effet des gravillons de GBR, essentiellement sur les propriétés des bétons durcis. Quelques études concernent les sables de GBR utilisés dans des mortiers, et leurs effets sur l'étalement et la résistance.

La littérature manque donc de travaux de référence sur l'effet des sables et/ou des gravillons de GBR vis-à-vis des propriétés rhéologiques des bétons de GBR. De plus, peu d'études ont comparé l'effet de la substitution à la fois du sable et/ou des gravillons de GBR sur les paramètres du béton frais.

Des travaux de recherche doivent donc être entrepris pour combler ces lacunes, dans le but aussi de promouvoir une meilleure utilisation des GBR dans l'industrie du béton. En effet, la compréhension du comportement rhéologique et mécanique des bétons de GBR permettra d'ouvrir la voie de leur optimisation, et donc de leur utilisation par les entreprises. Ces objectifs seront d'autant mieux atteints que ces recherches prendront en compte l'utilisation des GBR tels qu'ils sont produits sur les plateformes de recyclage et de concassage, sans nécessairement subir une étape de tri supplémentaire, coûteuse pour les producteurs.

7.2. État de l'art

La rhéologie du béton frais est une science relativement récente. Jusqu'à présent, la consistance du béton frais est caractérisée par de nombreux essais technologiques, mais peu de chercheurs ont appliqué la mécanique des milieux continus au comportement rhéologique du béton frais [Bartos, 1992 ; Ferraris, 1996]. Les propriétés rhéologiques du béton sont le plus souvent décrites par le modèle de Bingham, dont les paramètres sont le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Ces deux paramètres dépendent principalement des propriétés des constituants et de leurs proportions dans le mélange, mais aussi de la température et du temps écoulé depuis la fin du malaxage.

Lorsque la contrainte appliquée dépasse le seuil de cisaillement, le béton s'écoule à une vitesse proportionnelle à la viscosité plastique. Les propriétés rhéologiques du béton frais sont déterminées avec des rhéomètres, appareils qui mesurent la contrainte de cisaillement à des vitesses de cisaillement différentes. Malheureusement, les propriétés intrinsèques du béton rendent impossible l'utilisation des rhéomètres « classiques », qui sont conçus pour les fluides ne contenant pas de particules solides grossières en suspension.

Des études récentes montrent que le comportement du béton frais à base de granulats naturels dépend de plusieurs paramètres, dont la nature et la taille des granulats, ainsi que du type et du dosage en adjuvant [Banfill, 2011 ; Ngo *et al.*, 2010 ; Vázquez *et al.*, 2014 ; Wallevik et Wallevik, 2011].

Dans les études classiques, l'analyse scientifique des propriétés d'écoulement du béton frais n'est souvent pas considérée. Cependant, des travaux récents [Tahar *et al.*, 2016] ont montré que la rhéologie du béton de GBR est influencée négativement lorsque la substitution en sable de GBR dépasse 30 %.

L'utilisation des GBR dans les bétons à hautes performances n'est pas encore une pratique courante, en raison notamment de la dégradation rapide des propriétés mécaniques et de durabilité avec le taux de substitution. En outre, on sait que l'ancienne pâte de ciment présente dans les GBR leur confère une masse volumique plus faible, et une absorption d'eau plus élevée, relativement aux granulats naturels. [Gómez-Soberón, 2002b] a constaté une augmentation significative de la porosité du béton lorsque les granulats naturels sont remplacés par des GBR.

[Zhao *et al.*, 2015b] ont étudié l'influence des sables de GBR sur les propriétés de différents mortiers. Ils sont arrivés à la conclusion que l'affaissement des mortiers contenant des sables de GBR secs est toujours plus grand que celui de mortiers contenant des sables de GBR saturés.

En partant de ces constats, l'objectif des présents travaux a été d'étudier l'effet de la teneur en eau initiale des GBR sur le comportement des bétons de GBR, pour différentes combinaisons ciment-adjuvant et pour différents taux de substitution (15, 30, 70 et 100 %) du sable et/ou des gravillons naturels par des GBR. La variation des propriétés rhéologiques du béton frais dans le temps a été également étudiée, entre la fin du malaxage (T_0) et 90 minutes ($T_0 + 90'$).

7.3. Résultats RECYBETON

7.3.1. Effets de la teneur en eau initiale des GBR sur la rhéologie du béton frais

La forte capacité d'absorption d'eau des granulats de béton recyclé (GBR) influence directement les propriétés du béton frais. C'est pourquoi plusieurs études se sont focalisées sur l'effet de la teneur en eau des GBR vis-à-vis de la maniabilité du béton (voir par exemple [Meffeh *et al.*, 2013]). Cependant, le plus souvent, les résultats présentés, qui montrent l'importance de l'état de pré-saturation des GBR sur le dosage en eau ou sur l'évolution de la maniabilité du béton dans le temps, ne sont basés que sur un essai unique, tel l'affaissement ou l'étalement. Or, la connaissance d'un seul paramètre technologique ne permet pas de discriminer correctement la fluidité de différentes formules de béton [de Larrard, 1999]. Par conséquent, une caractérisation à plusieurs paramètres, comme celle obtenue par exemple avec un rhéomètre, est plus pertinente pour évaluer l'influence de la teneur en eau des GBR sur les propriétés d'écoulement du béton frais, entre la fin du malaxage jusqu'à la livraison sur chantier.

7.3.1.1. Programme expérimental

7.3.1.1.1. Matériaux et formulation des bétons

Parmi les formules de béton développées dans le cadre du Projet National RECYBETON (voir annexes), deux d'entre elles, de classe de résistance C25/30, ont été retenues :

- 0S100G où 100 % (en masse) des gravillons naturels ont été substitués par des gravillons de GBR ;
- 30S0G où 30 % (en masse) du sable naturel a été substitués par un sable de GBR.

À noter qu'au regard des résultats de la littérature, les taux de substitution étudiés sont élevés ; en particulier, le dosage en sable de GBR correspond à la limite au-delà de laquelle les propriétés mécaniques et de durabilité du béton sont compromises (voir par exemple [Evangelista et de Brito, 2007]).

Il faut noter également qu'indépendamment de l'état hydrique testé (Tableau 7.2), l'eau totale des bétons (eau ajoutée + eau absorbée par les granulats) a été maintenue constante pour toutes les formules.

7.3.1.1.2. Pré-humidification des granulats

Le Tableau 7.1 donne la masse volumique et l'absorption d'eau à 24 heures (Ab_{24}) des granulats naturels et des GBR. Les coefficients Los Angeles (LA) et Micro-Deval (MDE) y sont également indiqués pour le plus gros des deux gravillons.

Tableau 7.1

Masse volumique, absorption d'eau, LA et MDE des granulats naturels et des GBR

		Masse volumique (kg/m ³)	Ab ₂₄ (%)*	LA	MDE
Granulats naturels	0/4 mm	2 580	0,8	/	/
	4/10 mm	2 710	0,5	/	/
	6,3/20 mm	2 710	0,5	16	17
GBR	0/4 mm	2 180	9,2	/	/
	4/10 mm	2 290	5,2	/	/
	10/20 mm	2 260	5,1	37	23

* Mesures réalisées selon la norme NF EN 1097-6.

[Le *et al.*, 2016] ont montré que l'application du protocole de mesure de la norme NF EN 1097-6 peut conduire à une sous-estimation du coefficient Ab_{24} des sables de GBR, en raison du séchage excessif nécessaire pour éliminer les ménisques entre les grains anguleux et les fines. Toutefois, dans le cas présent,

à défaut d'un autre protocole pertinent, c'est la valeur « normative » qui a été retenues pour définir l'absorption d'eau de référence et, comparativement, les différents états hydriques testés (Tableau 7.2). Ainsi, pour une teneur en eau en-deçà ou au-delà du coefficient Ab_{24} , les granulats sont considérés sous-saturés ou sursaturés ; pour une teneur en eau égale à Ab_{24} , les granulats sont considérés dans l'état saturé surface sèche (SSS).

Tableau 7.2Conditions de teneur en eau testées (relativisées à Ab_{24})

(%)	0S100G	30S0G
Granulats naturels		1
GBR	0,30 / 0,75 / 1,20	0,33 / 0,50 / 0,87 / 1,0 / 1,2

Les données du Tableau 7.2 suscitent quelques commentaires :

- quelle que soit la formule étudiée, la teneur en eau des granulats naturels a toujours été prise égale à l'état SSS, afin de ne distinguer que l'influence du taux d'humidité des GBR sur l'écoulement du béton ;
- une gradation fine de la teneur en eau des sables de GBR a été retenue pour évaluer précisément l'évolution des propriétés d'écoulement lorsque seul le sable de GBR est substitué ;
- un séchage à 80 °C des GBR a été nécessaire lorsque leur teneur en eau (naturelle) dépassait l'état hydrique visé ($0,3Ab_{24}$ pour les gravillons de GBR et $0,33Ab_{24}$ pour les sables de GBR).

La procédure de pré-humidification a toujours été la même :

- a) quartage et homogénéisation de l'échantillon prélevé ;
- b) mesure de sa teneur en eau en l'état ;
- c) préservation de l'échantillon dans un fût non absorbant et fermé ;
- d) ajustement de la quantité d'eau pour atteindre le taux d'humidité visé (24 heures avant le malaxage) ;
- e) homogénéisation de la teneur en eau par rotation du fût avant utilisation.

7.3.1.1.3. Malaxage et simulation du transport

Pour chaque composition de béton et chaque teneur en eau des GBR, deux gâchées de 25 litres ont été réalisées en utilisant un malaxeur à axe vertical à cuve ouverte (Figure 7.1). La machine comporte deux pales qui exercent un mouvement planétaire sur le béton, et un racloir périphérique qui pousse le béton vers les pales, de sorte qu'aucune zone morte ne subsiste près de la paroi de la cuve, et n'échappe au malaxage.

La séquence de malaxage a été la suivante :

- introduction des gravillons, de la moitié du sable, du ciment, des fillers calcaires et de l'autre moitié du sable, puis malaxage pendant 1 minute ;

- introduction de l'eau ajoutée incorporant le ou les adjuvants, en malaxant pendant 0,5 minute ;
- poursuite du malaxage pendant 3,5 minutes.

Figure 7.1

Malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons (ColloMatic XM2-650 – Collomix)



Figure 7.2

Bétonnière à axe incliné équipé d'un variateur de fréquence pour simuler l'agitation du béton pendant le transport et la livraison sur chantier



La première gâchée a servi à la caractérisation du béton à la fin du malaxage (T0). La seconde gâchée a servi à sa caractérisation à T0 + 45' et à T0 + 90'.

Afin de simuler les conditions de transport dans un camion toupie, la deuxième gâchée a été constamment mise en rotation de T0 à T0 + 45' (ou T0 + 90') dans une bétonnière à axe incliné équipée d'un variateur de vitesse (Figure 7.2). Une faible vitesse de rotation (3 tr/mn) a simulé le transport. Une vitesse plus rapide de rotation (12 tr/mn), pendant 2 minutes, a simulé la phase de vidange, avant la réalisation des mesures de caractérisation.

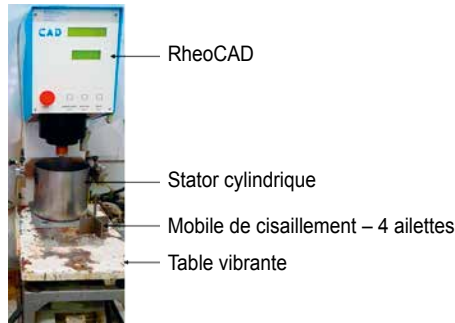
7.3.1.1.4. Essais de caractérisation

Deux essais ont été réalisés aux différentes échéances de mesure : l'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2, et la mesure des paramètres rhéologiques avec un rhéomètre à béton. À ce stade, il a été décidé de fixer la même consistance initiale, égale à la limite supérieure de la classe S4 (soit un affaissement de l'ordre de 21 cm). La teneur en superplastifiant a alors dû être ajustée pour la formule 0S100G et pour la teneur en eau des gravillons de GBR de 1,2Ab₂₄ (surcroît de 7 % de superplastifiant par rapport à la formule théorique). Aucune autre disposition compensatoire n'a été nécessaire pour les autres formules testées.

Les mesures rhéologiques ont été effectuées avec un rhéomètre de la société CAD Instrumentation. Il fonctionne à vitesse contrôlée et mesure le couple nécessaire pour cisailer un échantillon de béton de 5 litres à un nombre de tours fixé. Le mobile de cisaillement utilisé ici était une pale à quatre ailettes (Figure 7.3).

Figure 7.3

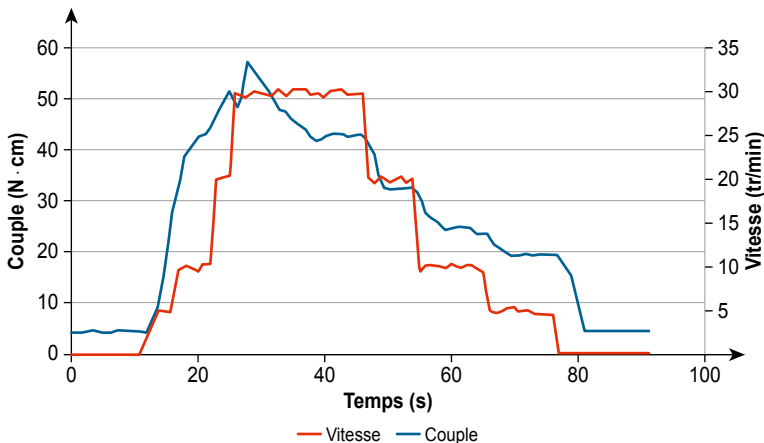
Appareil pour les essais rhéologiques



Chaque échantillon a été mis en place dans la cuve cylindrique en une seule couche, sous vibration rapide (3 s). Les mesures ont débuté dès la mise en marche, la cuve étant soumise à une vibration (50 Hz, 1 g) à l'aide d'une table vibrante (Figure 7.3). Le programme de cisaillement a commencé par une montée rapide à la vitesse de rotation de 30 tr/min, pour supprimer les effets d'une éventuelle consolidation [Legrand, 1972], suivi d'une diminution de la vitesse de rotation par paliers (30, 20, 10, 5) tr/min (Figure 7.4). Chaque changement de vitesse n'a été effectué qu'après quasi-stabilisation du couple (variation inférieure à 5 N · cm) du palier précédent, en supposant ainsi qu'un régime permanent avait été atteint.

Figure 7.4

Évolution typique des conditions de cisaillement durant les mesures rhéologiques



7.3.1.2. Résultats

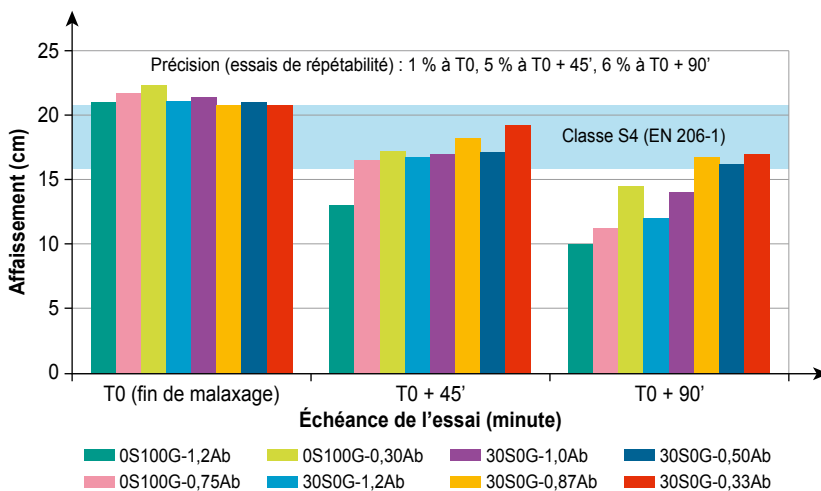
7.3.1.2.1. Affaissement

En ayant un affaissement quasi-identique au départ (à T0), quelle que soit la teneur en eau des GBR (Figure 7.5) – conséquence probable de l’incorporation systématique du superplastifiant (voir les formules en annexe) dont l’un des effets est d’avoir pu « niveler » les différences de volume d’eau entre les grains –, on observe que l’affaissement diminue avec le temps, pour toutes les formules. Le processus irréversible d’hydratation est alors impliqué, mais il est aggravé lorsque l’état hydrique des GBR (sable ou gravillons) est supérieur ou proche de la saturation.

Certaines études font état de résultats différents, indiquant que les GBR totalement secs entraînent une perte d’affaissement significative, comparativement aux GBR pré-humidifiés ou à l’état SSS [Poon *et al.*, 2004 ; Mefteh *et al.*, 2013]. Mais les conditions expérimentales de ces travaux sont différentes de celles des présents travaux (bétons n’incorporant ni adjuvant, ni additions minérales, sans remaniement entre les mesures, etc.).

Figure 7.5

Évolution dans le temps de l’affaissement en fonction de la composition des bétons et du taux de saturation des GBR



7.3.1.2.2. Paramètres rhéologiques

L’évolution typique entre le couple C et la vitesse de rotation ω est illustrée Figure 7.6.

Deux observations peuvent être faites :

- il existe une relation linéaire entre C et ω :

$$C = C_0 + K_\omega \tag{7.1}$$

où C_0 et K sont des paramètres ajustés par la méthode des moindres carrés.

- L'écoulement est toujours altéré au cours du temps, quelle que soit l'état de saturation des GBR, en raison de la maturation du matériau (structuration pendant le processus d'hydratation, bien qu'une agitation continue ait été appliquée dès la fin du malaxage).

En supposant que le paramètre C_0 (couple seuil dynamique) ait une signification physique (extrapolation à 0 tr/mn des mesures effectuées entre 30 tr/mn et 5 tr/mn), il présente alors une évolution cohérente en fonction de l'affaissement, comme le montre le nuage de points de la Figure 7.7. Par conséquent, dans les limites du fuseau de dispersion (lignes continues sur la Figure 7.7) qui ne dépendent pas de l'échéance de l'essai, les commentaires faits précédemment pour l'évolution de l'affaissement s'appliquent également pour le couple seuil C_0 .

Figure 7.6

Relation typique entre le couple et la vitesse de rotation à différentes échéances, en régime d'écoulement quasi-permanent

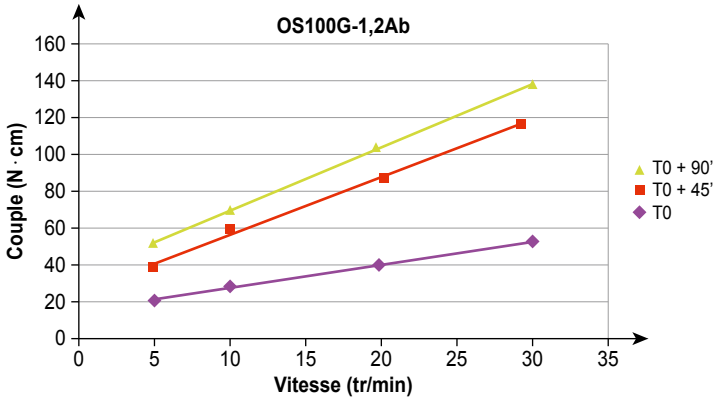
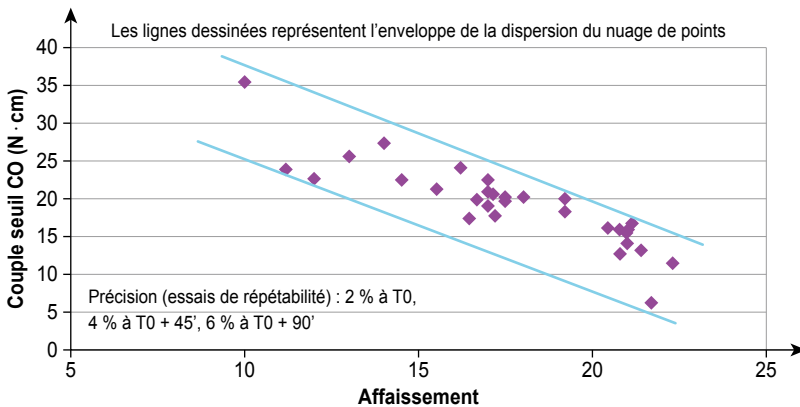


Figure 7.7

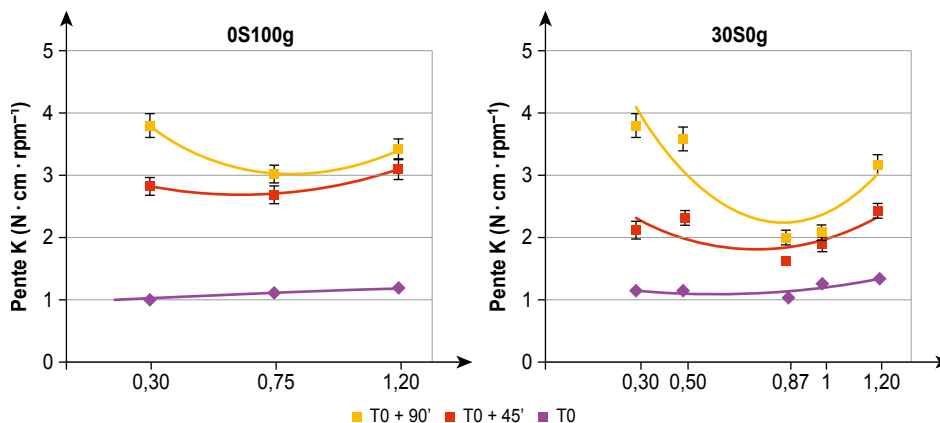
Couple seuil dynamique C_0 en fonction de l'affaissement



Lorsque l'écoulement est initié (couple seuil dépassé), le paramètre K donne une image indirecte des propriétés de viscosité du béton. Comme le montre la Figure 7.8, indépendamment du déroulement de l'essai et de la taille des GBR (sable ou gravillons), les valeurs de K, définies avec une précision de 5 %, sont plus faibles lorsque la teneur en eau des GBR est proche, mais inférieure à l'état saturé. Ce résultat contredit celui obtenu à partir de l'essai d'affaissement, pris comme référence dans tous les cahiers des charges. Il apporte donc une signification pratique nouvelle, non encore signalée dans la littérature (à la connaissance des auteurs) : un béton vibré adjuvanté (superplastifiant et/ou retardateur) incorporant des GBR présentent une meilleure capacité d'écoulement si les GBR sont quasi-saturés.

Figure 7.8

Évolution des propriétés de viscosité du béton en fonction de la teneur en eau des gravillons de GBR (à gauche) et des sables de GBR (à droite)



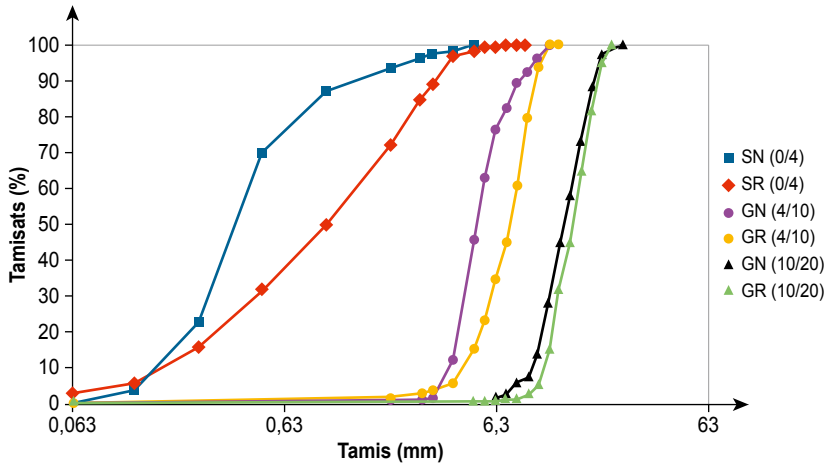
Teneur en humidité des GBR exprimée en fraction du coefficient d'absorption d'eau à 24 heures Ab_{24}

7.3.2. Caractérisation du comportement rhéologique du béton recyclé

Dans cette seconde campagne d'essais, cinq ciments de catégorie CEM I ont été utilisés ; un CEM I 52,5 R CE CP2 (A), un CEM I 52,5 R CE (B), un CEM I 52,5 N CE CP2 (C), un CEM I 52,5 N SR3 CE PM CP2 (D) et un CEM I 52,5 N CE ES CP2 (E). Le ciment B avait une teneur en C_3S plus élevée, et les ciments A et D une teneur en C_3A plus élevée, par rapport aux autres ciments. Les gravillons naturels calcaires comprenaient deux coupures concassées (4/10 et 10/20 mm), de même que les gravillons de GBR (4/10 et 10/20 mm). Le sable calcaire naturel était un concassé (0/4 mm), de même que le sable de GBR (0/4 mm) (voir Annexe 1.3).

Figure 7.9

Granularité des sables et gravillons naturels et de GBR



La granularité des granulats naturels et des granulats de GBR est présentée Figure 7.9. Le sable de GBR est plus grossier que le sable naturel (son module de finesse (3,27) étant significativement plus élevé que celui de sable naturel (2,25)). Les absorptions d'eau des granulats sont les suivantes : 0,9 % et 0,4 % pour le sable et les gravillons naturels ; 10 % et 5,5 % pour le sable et gravillons de GBR. Il apparaît donc clairement que les GBR considérés présentent une absorption d'eau nettement supérieure à celle des granulats naturels (voir chapitre 3). Elle est due à la gangue de mortier qui adhère au granulat d'origine. Les observations visuelles ont montré que les GBR présentent une surface rugueuse et fissurée, comparativement à celle des granulats naturels plus lisses : cette différence participe à la porosité élevée des GBR [de Juan *et al.*, 2009 ; Tahar *et al.*, 2017].

Quatre adjuvants (A1, A2, A3 et A4) ont été utilisés. Ce sont soit des polycarboxylates réducteurs d'eau (A1 et A4), soit des éthers polycarboxyliques hauts réducteurs d'eau (A2 et A3).

En conservant le même squelette granulaire et la même quantité de ciment, deux familles de béton ont été testées, avec les couples ciment/adjuvant ci-après, soit 40 formulations différentes au total : A/A1, B/A2, C/A3, D/A4 et E/A4. Ces couples ont été sélectionnés sur la base du retour d'expérience de la société SIGMA-BETON. Les sables et gravillons naturels ont été partiellement remplacés (15, 30, 50, 50, 70 et 100 %) par des GBR. Les GBR ont été pré-saturés à la valeur de saturation + 1 %.

7.3.2.1. Influence du taux de substitution des granulats recyclés

Afin de limiter le nombre de mélanges et de pouvoir les comparer sur une base commune, un affaissement initial constant de 200 ± 20 mm a été fixé, en ajustant en conséquence la teneur en eau et la quantité d'adjuvant. L'évolution de la demande en adjuvant en fonction du taux de substitution (0, 15, 30, 50, 70 et 100 %) des sables et gravillons, pour atteindre l'affaissement visé, est résumée dans les Tableaux 7.3 et 7.4 respectivement.

Tableau 7.3

Dosage en adjuvant des bétons à base de sables de GBR [BSR] (%)

(%)	Adjuvant (%)				
	BSR-A	BSR-B	BSR-C	BSR-D	BSR-E
0	0,40	0,35	0,25	0,31	0,30
15	0,40	0,35	0,25	0,31	0,30
30	0,40	0,40	0,35	0,39	0,36
50	0,50	0,52	0,51	0,49	0,48
70	0,60	0,61	0,60	0,59	0,57
100	0,78	0,75	0,73	0,75	0,73

Tableau 7.4

Dosage en adjuvant des bétons à base de gravillons de GBR [BGR] (%)

(%)	Adjuvant (%)				
	BGR-A	BGR-B	BGR-C	BGR-D	BGR-E
0	0,40	0,35	0,25	0,31	0,30
15	0,40	0,35	0,30	0,35	0,32
30	0,45	0,42	0,39	0,40	0,36
50	0,48	0,46	0,45	0,48	0,44
70	0,52	0,51	0,50	0,54	0,49
100	0,55	0,54	0,52	0,55	0,51

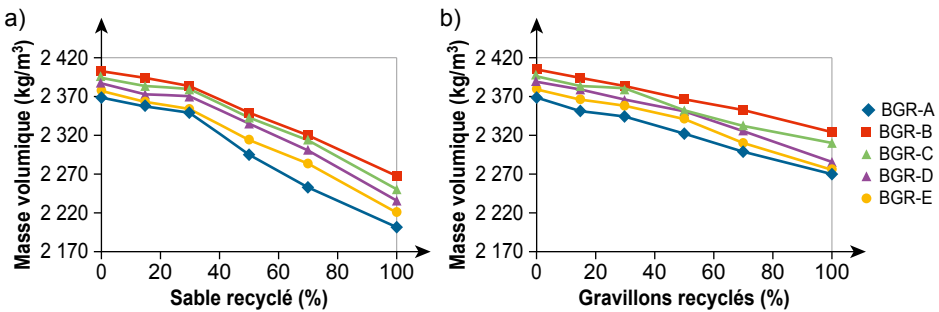
En raison de l'absorption variable des mélanges contenant les GBR poreux, les teneurs indiquées dans les Tableaux 7.3 et 7.4 ne correspondent pas nécessairement aux teneurs efficaces, en particulier pour les taux de substitution élevés.

7.3.2.1.1. Masse volumique à l'état frais

L'évolution de la masse volumique du béton frais en fonction du pourcentage de substitution en GBR est illustrée Figure 7.10. Elle diminue lorsque le taux de substitution du sable et des gravillons naturels par le sable et les gravillons de GBR augmente, en raison de la masse volumique plus faible des GBR. Le sable de GBR a une masse volumique plus faible que les gravillons de GBR : 2,18 kg/l pour le sable et 2,3 kg/l pour les gravillons (voir les annexes). La diminution de la masse volumique est donc plus importante lorsque le sable est substitué. Par conséquent, les GBR pourraient être utilisés là où des bétons plus légers sont nécessaires, i.e. où le « poids mort » du béton est un problème, comme pour les tabliers de ponts par exemple. Cependant, l'impact de cette substitution sur l'ensemble des propriétés à l'état durci doit aussi être pris en compte.

Figure 7.10

Évolution de la masse volumique des bétons avec le pourcentage de GBR : a) sable de GBR ; b) : gravillons de GBR



7.3.2.1.2. Comportement rhéologique

Le principe des mesures rhéologiques est de mettre en rotation, à différentes vitesses, un mobile de cisaillement, en forme de croix ici, dans un échantillon de béton frais et de mesurer à chaque vitesse le couple exercé pour maintenir la rotation.

Concrètement, les essais rhéologiques ont consisté à imposer une vitesse de rotation décroissante au mobile de cisaillement, en pratiquant des paliers de stabilisation pour effectuer la mesure du couple. Toutes les secondes, le logiciel de commande du mobile a enregistré le couple (M) et à la vitesse de rotation imposée (Ω).

Par ailleurs, il est nécessaire d'utiliser le même rhéomètre pour pouvoir comparer entre eux les paramètres rhéologiques des différents bétons testés (couple et vitesse de rotation à l'état stationnaire), car chaque rhéomètre donne des résultats qui diffèrent significativement selon sa configuration.

- Description du matériel

Le rhéomètre utilisé dans cette campagne d'essais comporte trois composants principaux (Figure 7.11) ; un agitateur avec un contrôleur électronique de vitesse, pour l'enregistrement du couple *via* un liaison RS232 ; un récipient ; un mobile en acier.

L'agitateur est l'élément clé de l'essai. Il est fixé à un bras, par l'intermédiaire d'une bride attachée à un trépied. L'agitateur est piloté par un ordinateur à l'aide d'un logiciel (Watch & Control) (Figure 7.11).

Le récipient est un bol cylindre de 30 cm de diamètre et de 25 cm de hauteur. Afin d'optimiser l'adhérence entre le béton et la paroi, et pour prévenir tout glissement le long de la paroi, des tiges en acier ont été soudées sur la paroi intérieure du récipient (Figure 7.11).

Figure 7.11

Le rhéomètre utilisé [Soualhi *et al.*, 2016]



Le mobile, maintenu par le mandrin de l'agitateur, est constitué ici de deux pales perpendiculaires en forme de U inversé. La lame a une hauteur de 15 cm et un diamètre de 10,5 cm (Figure 7.11).

- Procédure d'essai

Les mesures sont effectuées avec le protocole proposé par [Soualhi *et al.*, 2016].

- Étape 1 : mise en place du béton dans le récipient. Elle s'opère en trois couches, chacune recevant 25 coups de piquage avec une tige.
- Étape 2 : positionnement du mobile de cisaillement. Il est centré et enfoncé dans le béton jusqu'à la surface du béton, en laissant une épaisseur de béton de 10 cm sous la base du mobile ;

- étape 3 : mesure des couples (M). Ils correspondent aux différents couples imposés pour maintenir la vitesse lorsque le conteneur est rempli de béton ;
- étape 4 : récupération des mesures et calcul des paramètres rhéologiques.

Les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique)⁴ au temps initial (T0) sont présentés sur les Figures 7.12 et 7.13.

Figure 7.12

Évolution des paramètres rhéologiques du béton avec le pourcentage de sable de GBR à T0 : a) Seuil de cisaillement ; b) Viscosité plastique

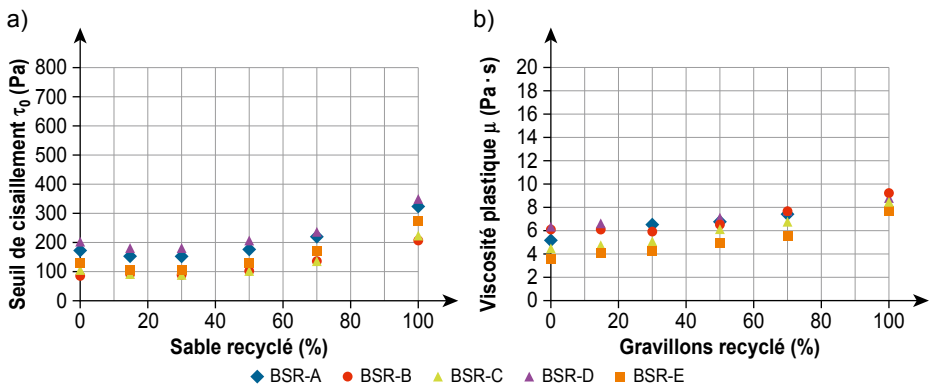
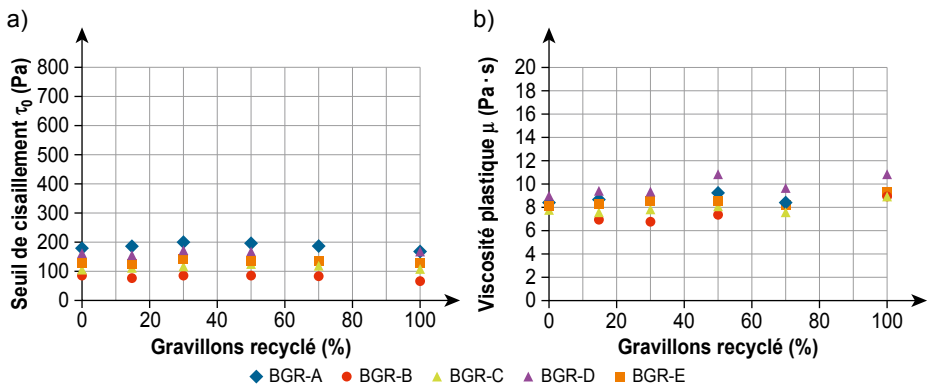


Figure 7.13

Évolution des paramètres rhéologiques du béton avec le pourcentage de gravillons de GBR à T0 : a) Seuil de cisaillement ; b) Viscosité plastique



4. Bien que ces paramètres soient exprimés en unités fondamentales, ils ne peuvent être considérés comme les paramètres physiques intrinsèques du matériau, mais plutôt comme une évaluation empirique de son comportement rhéologique à l'état frais.

Les Figures 7.12 et 7.13 montrent que :

- pour les bétons incorporant des gravillons de GBR, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique sont plutôt constants, quel que soit le taux de substitution. Ces résultats sont en accord avec l'objectif de maintenir l'affaissement initial à 200 mm environ, en ajustant les formules de façon appropriées. [Hu et Wang, 2011 ; Wallevik, 2006 ; Murata et Kukokawa, 1992] ont obtenu des résultats similaires ;
- pour les bétons incorporant le sable de GBR, les paramètres rhéologiques augmentent lorsque le taux de substitution dépasse 30 %. Pour ce taux de substitution, on observe une dégradation des propriétés rhéologiques, même si la quantité d'adjuvant est augmentée de façon substantielle (voir Tableau 7.3).

La substitution des granulats naturels par des GBR diminue généralement la compacité du mélange granulaire en raison de la forme plus anguleuse et de la compacité moindre des GBR [Chakradhara *et al.*, 2010 ; Lin *et al.*, 2004 ; Djerbi Tegger, 2012]. Pour compenser cette perte de compacité et maintenir les propriétés rhéologiques, il est nécessaire d'augmenter la fluidité de la pâte, voire le volume de pâte [de Larrard, 2000 ; Sedran et de Larrard, 1994 ; Soualhi *et al.*, 2015]. Une augmentation de la fluidité de la pâte de ciment fraîche, par augmentation de la teneur en adjuvant (voir Tableau 7.4), a permis de maintenir les propriétés rhéologiques des bétons à base de GBR. Mais cette solution n'est plus efficace pour le béton à base de sable de GBR lorsque le taux de substitution dépasse 50 % :

- la perte de compacité est trop élevée pour être compensée par une augmentation de la fluidité de la pâte ;
- certaines interactions physico-chimiques entre les impuretés ou les fines apportées par l'ancienne pâte de ciment du sable de GBR, et entre le couple ciment/adjuvant au sein de la pâte de ciment fraîche, peuvent se produire et provoquer un raidissement du béton.

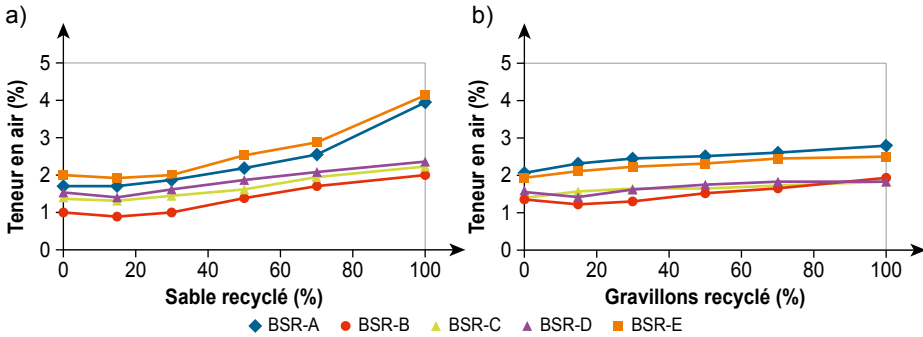
7.3.2.1.3. Teneur en air

Les évolutions de la teneur en air avec le pourcentage de substitution en GBR sont illustrées Figure 7.14. Elles sont en accord avec les comportements rhéologiques décrits au paragraphe précédent :

- comme pour les propriétés rhéologiques, la teneur en air est assez constante quel que soit le taux de substitution par les gravillons de GBR ;
- la teneur en air augmente lorsque le taux de substitution en sable de GBR dépasse 30 %. Cette augmentation est la conséquence directe de la perte des propriétés rhéologiques de ces bétons (Figure 7.12). En effet, le sable de GBR, de par sa porosité supérieure à celle du sable naturel, mais aussi de par la forme et la rugosité de ses grains, perturbe l'évacuation des bulles d'air du béton pendant la vibration [Topçu et Şengel, 2004 ; Raes *et al.*, 2015]. Il en résulte une augmentation de la teneur en air lorsque le pourcentage en sable de GBR devient élevé.

Figure 7.14

Évolution de la teneur en air dans le béton avec le pourcentage de GBR : a) sable de GBR ; b) gravillons de GBR

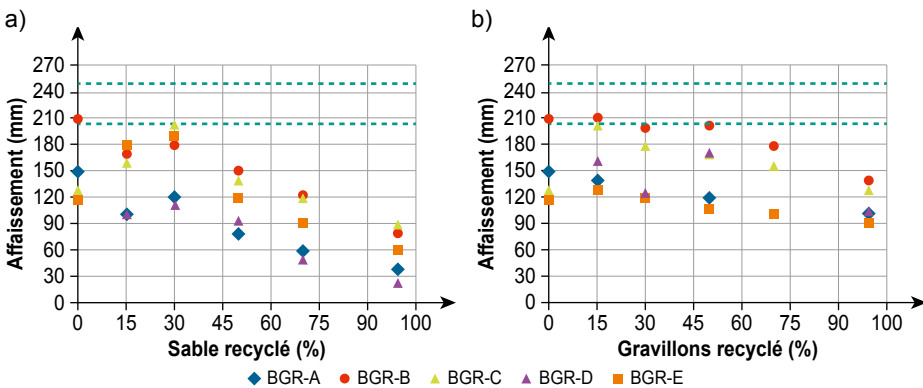


7.3.2.2. Relations entre le couple ciment/adjuvant et le taux de recyclage

L'affaissement mesuré 90 minutes après la fin du malaxage (T90) des différents bétons incorporant les GBR est présenté Figure 7.15.

Figure 7.15

Évolution de l'affaissement avec le pourcentage de substitution à T90 : a) sable de GBR ; b) gravillons de GBR



Ces résultats permettent de classer les couples ciment/adjuvant en deux groupes :

- les couples B et C utilisant les adjuvants haut-réducteurs d'eau (éther polycarboxylique A2 et A3), pour lesquels les affaissements les plus élevés sont observés pour une teneur donnée en sable et gravillons de GBR. Pour les bétons à base de gravillons de GBR, la classe initiale d'affaissement (S4) est maintenue à T90, jusqu'à 70 % de substitution. Pour 100 % de

substitution, la classe S3 (150 mm), proche de la classe S4, est toutefois maintenue. Pour les bétons à base de sable de GBR, la valeur seuil est proche de 30 % de substitution et les mesures rhéologiques donnent cette valeur seuil dès la fin du malaxage (T0). Les bétons de gravillons de GBR avec le couple ciment/adjuvant B donnent un meilleur affaissement que les bétons formulés avec le couple A. Ce comportement peut être relié à la plus faible teneur en C₃A du ciment B, qui retarde l'hydratation du ciment et altère moins la maniabilité du mélange. Ce résultat est similaire à celui obtenu par [Kadri *et al.*, 2009] ;

- les couples A et D à base des adjuvants réducteurs d'eau (polycarboxylate A1 et A4). Les valeurs seuils en fonction du taux de la substitution en GBR sont similaires à celles du groupe précédent, proches de 30 % pour les sables et de 100 % pour les gravillons. Cette fois, une classe d'ouvrabilité est perdue (S4 à S3) pour les taux de substitution en dessous des valeurs seuils, y compris pour les bétons à base de granulats naturels. Ces couples sont donc moins efficaces que les couples B et C pour maintenir la valeur initiale de l'affaissement ;
- le couple E (basé sur le ciment E et l'adjuvant A4) est plus difficile à classer. Pour les bétons à base de gravillons de GBR, ce couple a un comportement proche des couples A et D, c'est-à-dire « peu efficace ». Pour les bétons à base de sable de GBR, son comportement est intermédiaire à celui des couples peu efficaces (couples A et D) et plus efficaces (couples B et C).

Cependant, il est possible, grâce à une adjuvantation idoine combinant un couple ciment/adjuvant approprié (un adjuvant haut-réducteur d'eau ou un superplastifiant sont recommandés) et à une teneur en adjuvant appropriée, de fabriquer un béton de GBR stable et de bonne maniabilité (classe S4), avec un taux substitution pouvant atteindre 100 % de gravillons de GBR ou 30 % de sable de GBR. L'utilisation d'un retardateur peut également s'avérer utile (*cf.* chapitre 22).

7.4. Besoins en recherche

Les effets potentiels du raidissement prématuré induit par les fines ou les impuretés apportées par le sable devraient faire l'objet d'une étude plus approfondie. La porosité des sables et des gravillons de GBR, qui peuvent adsorber une partie de l'adjuvant (qui n'est alors plus disponible pour fluidifier la pâte de ciment), doit aussi être considérée. Enfin, l'effet non monotone du taux de présaturation, en particulier pour les sables de GBR, sur le comportement rhéologique devrait être mieux compris.

7.5 Conclusion

Il n'y a pas d'effet négatif significatif du taux de pré-humidification des GBR sur les propriétés rhéologiques du béton frais en fin du malaxage. Le temps de malaxage semble suffisant pour que les GBR sous-saturés absorbent une grande partie de l'eau nécessaire à leur saturation. Si un procédé de pré-saturation est intégré à la chaîne de fabrication du béton, alors la teneur en eau ciblée pour les GBR doit se situer entre $0,8Ab_{24}$ et Ab_{24} , afin que les propriétés d'écoulement du béton soient préservées au mieux avant le coulage sur chantier.

Des valeurs seuils pour le recyclage des GBR, permettant d'obtenir un béton frais stable, ont été identifiées : 30 % de substitution pour les sables de GBR, 100 % de substitution pour les gravillons de GBR. Pour des taux de sable plus élevé, il existe encore la possibilité d'utiliser des retardateurs de prise.

Chapitre 8.

Béton recycle au jeune âge

*E. Rozière¹, A. Z. Bendimerad¹, J-C. Souche², P. Devillers³,
M. Salgues², A. Loukili¹, E. Garcia-Diaz²*

Résumé – Ce chapitre présente la méthodologie et les résultats d'une étude expérimentale portant sur le comportement au jeune âge de bétons incorporant des granulats de béton recyclé (GBR). Il s'intéresse plus particulièrement à la mesure du coefficient et de la cinétique d'absorption d'eau des gravillons de GBR, au comportement du béton frais en condition de séchage normal et sévère, et à l'évaluation des propriétés du béton en cours de durcissement.

Les gravillons de GBR utilisés dans cette étude, fournis par le Projet National RECYBETON, présentent une absorption d'eau élevée. Leur taux de saturation atteint 90 % dans les deux premières heures, et plus rapidement encore si les gravillons sont immergés dans la pâte de ciment fraîche. Le suivi de leur absorption d'eau au sein de la pâte fraîche a également montré qu'une partie de l'eau absorbée pouvait se libérer en cas d'exposition à un séchage sévère. Le passage d'un régime de séchage normal à un régime de séchage sévère accroît le taux d'évaporation, mais n'augmente pas le ratio « retrait/perte de masse ». Toutefois, de plus grandes amplitudes de retrait sont observées en raison d'un retrait plastique accéléré qui, dans ce cas, se développe avant la prise.

Le concept de pression d'entrée air a été utilisé pour analyser la sensibilité à la fissuration du béton frais. La valeur de cette pression a été estimée pour divers bétons, avec ou sans gravillons de GBR. Une bonne corrélation entre la pression d'entrée d'air et la dépression capillaire au moment de la fissuration a été trouvée. Le rapport eau efficace sur liant (E_{eff}/L) influence directement la pression d'entrée d'air. Ce rapport (E_{eff}/L) prend en compte l'état initial de saturation des gravillons de GBR.

Entre la prise et 24 heures, l'évolution du retrait plastique, du module d'élasticité et de la résistance à la traction a été suivie en continu. La saturation initiale en eau des gravillons de GBR a une influence limitée sur ces propriétés. Des essais de retrait empêché seraient nécessaires pour analyser l'influence du taux de GBR sur la sensibilité à la fissuration, et pour estimer la relaxation.

1. Centrale Nantes, GeM, Nantes.

2. IMT Mines Alès, C2MA, Alès.

3. ENSAM, École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, Montpellier.

8.1. Introduction

La fissuration provoquée par le retrait altère la durabilité des bétons et des ouvrages en béton, en favorisant la pénétration des agents chimiques agressifs et, incidemment, la corrosion des aciers. Plusieurs phénomènes sont susceptibles d'engendrer la fissuration du béton au jeune âge. Le premier résulte de la dépression capillaire qui apparaît dans la pâte de ciment fraîche [Radocea, 1994 ; Slowik *et al.*, 2008]. Elle est causée par l'évaporation, lorsque le béton n'est plus recouvert par l'eau du ressuage ou par de l'eau de cure. Dès que la pression de l'air devient suffisante pour pouvoir pénétrer dans la structure poreuse, des fissures apparaissent. Si la vitesse d'évaporation dépasse la vitesse de ressuage, le retrait plastique se développe alors [Wittmann, 1976]. Le séchage accéléré du béton frais est donc un facteur propice à l'amplification du retrait plastique [Turcry et Loukili, 2006 ; Mbemba, 2010]. Le second phénomène est le retrait empêché au contact d'un béton durci. Le retrait plastique ne peut se développer librement dans la plupart des ouvrages en béton. Par ailleurs, le module d'élasticité du béton se développe et croît dès le très jeune âge, alors que la résistance à la traction est encore relativement faible, contraste qui induit vraisemblablement des contraintes importantes. Par conséquent, la période qui sépare le coulage du béton et le début du durcissement doit être considérée comme une phase critique vis-à-vis de la fissuration [Hammer *et al.*, 2007 ; Roziere *et al.*, 2015]. Les granulats de béton recyclé (GBR) sont réputés favoriser le retrait et le fluage du béton, et réduire sa résistance et son module d'élasticité, pour une teneur en liant donnée. C'est pourquoi les bétons ont été formulés ici soit à résistance constante, soit à affaissement constant. Par ailleurs, les études traitant du comportement au jeune âge sont plutôt rares. Enfin, les GBR sont des granulats poreux, ayant des cinétiques et des valeurs d'absorption d'eau variables. Leur taux initial de saturation risque donc d'avoir une influence significative sur l'eau efficace de la pâte de ciment et, donc aussi, sur toutes les propriétés du béton.

L'étude présentée ici s'intéresse à la caractérisation des gravillons de GBR et de bétons de GBR à l'état frais et durci, entre le malaxage et 24 heures. Deux laboratoires ont participé à ces travaux : le Centre des Matériaux des Mines d'Alès (C2MA), IMT Mines Alès, et l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), Centrale Nantes. Les bétons ont été testés en condition de séchage normal et sévère, respectivement. Le séchage sévère, qui accentue la fissuration du béton frais, est manifestement prépondérant. Deux paramètres principaux ont été étudiés : le taux de gravillons de GBR et leur saturation initiale en eau.

Ce chapitre donne tout d'abord un « état de l'art » où sont décrits les phénomènes qui provoquent la fissuration du béton au jeune âge, en rappelant les principaux résultats recensés. Le programme expérimental réalisé, qui comporte deux parties, est ensuite présenté. Les résultats et discussions s'intéressent au taux d'évaporation, à l'amplitude du retrait plastique et à la sensibilité à la fissuration. Ils concernent tout d'abord le comportement du béton frais, puis celui du béton en cours de durcissement.

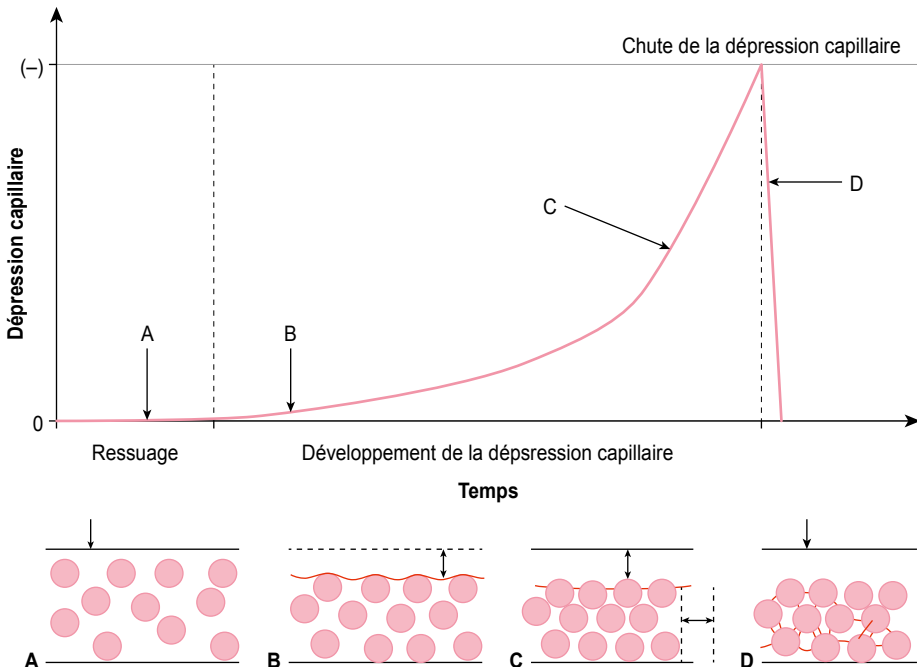
8.2. État de l'art

L'étude présentée dans ce chapitre traite principalement du retrait plastique et de la fissuration au jeune âge des bétons de GBR. Les résultats disponibles dans la littérature sont plutôt rares, mais ils ont toutefois permis d'orienter cette étude. Deux périodes sont critiques pour la fissuration des bétons frais et durcis : la première va de la mise en place du béton jusqu'à une et quatre heures ; la seconde couvre le temps de prise et le début du durcissement.

Les phénomènes qui apparaissent durant la première période critique ne sont pas spécifiques aux bétons. Ils concernent également la dessiccation des sols et autres suspensions concentrées [Radocea, 1994 ; Slowik *et al.*, 2008]. La couche d'eau superficielle disparaît progressivement avec l'évaporation (Figure 8.1). À la surface de l'échantillon, des ménisques apparaissent entre les particules et provoquent une augmentation de la pression capillaire. Lorsque la courbure des ménisques devient forte, le système des forces de traction entre les particules devient instable et l'air commence à pénétrer dans les pores. Il se produit alors un « percement » local de la pression capillaire. Le concept d'entrée d'air est utilisé pour décrire ce phénomène [Slowik *et al.*, 2008]. La pression d'entrée d'air est la pression

Figure 8.1

Montée de la pression capillaire dans une suspension en cours de séchage, d'après [Slowik *et al.*, 2008]



capillaire pour laquelle l'air est susceptible de pénétrer dans le système. Lorsque la pression capillaire atteint une valeur limite, appelée valeur d'entrée d'air, l'air commence à remplir les pores les plus gros. La tension capillaire provoque alors une compression dans les plus petits pores, ce qui conduit à un réarrangement des grains [Slowik et Ju, 2011]. Cependant, la diminution de volume n'est pas égale à l'eau perdue, et des tensions horizontales commencent à se développer. Une fissuration apparaît alors aux endroits où la pression d'entrée d'air est atteinte ; l'entrée d'air peut donc être corrélée à la fissuration [Souche *et al.*, 2016].

L'entrée d'air dépend de la composition et de la distribution granulaire du matériau. En mécanique des sols, le point d'entrée d'air est généralement déterminé à partir des courbes de teneur volumétrique en eau en fonction de la contrainte de succion. D'autres méthodes de détermination de l'entrée d'air ont été développées pour les matériaux cimentaires [Slowik *et al.*, 2008 ; Souche *et al.*, 2016].

Les GBR sont connus pour influencer le ressuage. Une quantité d'eau importante est effectivement absorbée par ces granulats durant le malaxage. D'après l'étude de [Poon *et al.*, 2004], l'utilisation des GBR à l'état saturé surface sèche (SSS) conduit à un ressuage durant la mise en œuvre, pour un rapport eau efficace sur ciment (E_{eff}/C) constant de 0,57.

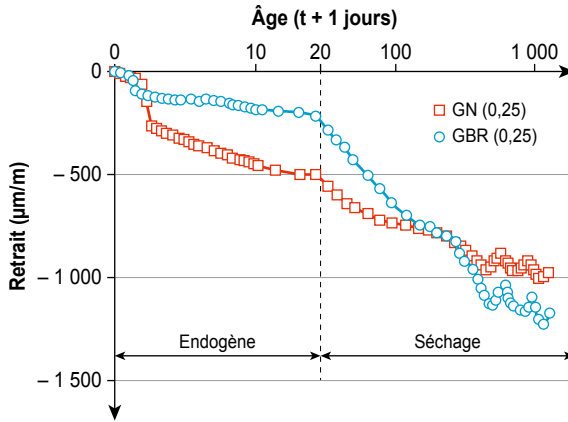
La deuxième période critique couvre le temps de prise et le début du durcissement. Lorsque le retrait plastique est empêché, des contraintes de traction se développent. La fissuration se produit lorsque les contraintes de traction dépassent la résistance à la traction [Ravina et Shalon, 1968 ; Hammer *et al.*, 2007]. En outre, la capacité de déformation en traction est minimale à cette période. En effet, durant cette phase, le module d'élasticité se développe plus précocement et plus rapidement que la résistance à la traction, ce qui réduit la capacité de déformation. Ensuite, elle augmente concomitamment à la résistance à la traction [Roziere *et al.*, 2015].

Les GBR ont une influence sur tous les paramètres impliqués dans la fissuration par retrait empêché. D'une part, l'augmentation du taux de GBR conduit à un retrait de séchage supérieur (Figure 8.2), et parfois à une résistance inférieure. Une résistance équivalente ou supérieure peut être obtenue par le biais de la formulation. D'autre part, le module d'élasticité est réduit et le fluage est augmenté. Il n'est donc pas facile de prévoir le rôle des GBR vis-à-vis de la sensibilité à la fissuration.

Par ailleurs, la saturation en eau initiale des granulats poreux est susceptible d'influencer le retrait plastique et les autres propriétés du béton [Cortas *et al.*, 2014]. Comme indiqué Figure 8.2, le retrait est plus faible en condition scellée [Maruyama et Sato, 2005]. Les GBR saturés peuvent donc atténuer le retrait endogène par un mécanisme de désorption de leur eau absorbée, dans un processus de « cure interne ». L'eau absorbée durant la prise est influencée par la cinétique d'absorption des granulats. Si les granulats sont initialement secs ou partiellement saturés, l'eau restant dans la pâte de ciment au moment de la prise est alors supérieure à l'eau efficace théorique.

Figure 8.2

Déformation de bétons à haute performance avec un granulat naturel (GN) et avec un granulat de béton recyclé (GBR), E/C = 0,25, d'après [Maruyama et Sato, 2005]



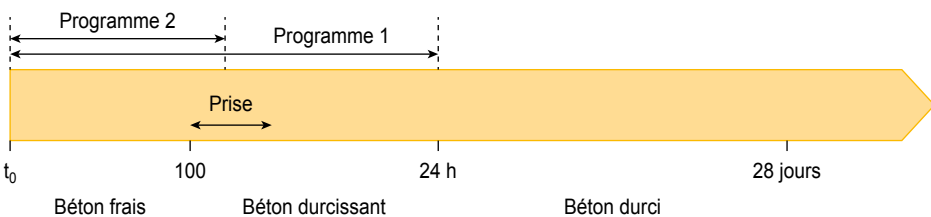
Par exemple, [Alhozaimy, 2009] a montré que des granulats calcaires secs n'absorbent pas toute l'eau supplémentaire ajoutée pour compenser leur absorption, ce qui conduit à augmenter le rapport E/C réel, et donc aussi l'affaissement initial, mais à diminuer la résistance à la compression.

8.3. Résultats RECYBETON

L'eau absorbée ou libérée par les granulats poreux est susceptible d'influencer le comportement au jeune âge du béton, notamment vis-à-vis de la fissuration induite par le retrait. Deux programmes expérimentaux ont alors été conçus pour étudier les effets sur le retrait plastique de la proportion de GBR et de leur taux de saturation en eau initial (Figure 8.3). Dans le programme 1, l'effet d'une sollicitation extérieure sur le béton durcissant a été étudié en condition de « séchage normal », caractérisée par un vent faible [Bendimerad, 2016]. Le programme 2 concerne principalement le comportement du béton frais [Souche,

Figure 8.3

Programmes expérimentaux et stades de développement des propriétés du béton (t_0 est le premier contact entre le ciment et l'eau)



2015]. Afin d'exacerber l'effet de l'augmentation de la pression capillaire et de la fissuration avant la prise, la vitesse du vent a été augmentée. Il s'agit de la condition de « séchage sévère » décrite dans les paragraphes suivants.

8.3.1. Programme expérimental

8.3.1.1. Programme d'essais

Deux séries de bétons ont été étudiées [PN-RECYBETON, 2011] : l'une pour des applications en bâtiment, référencée B, l'autre des applications en génie civil, référencée GC. Elles ont été conçues avec différents rapports eau totale/liant (E_{tot}/L) en visant les classes de résistance C 25/30 et C 35/45 respectivement.

L'absorption d'eau des granulats est un paramètre clé dans la formulation des bétons. De plus, les granulats peuvent être partiellement ou totalement saturés au moment de leur introduction dans le malaxeur. La saturation initiale en eau des granulats influence le comportement au jeune âge, mais aussi le comportement à long terme du béton, même si l'eau totale est maintenue constante [Cortas *et al.*, 2014]. L'utilisation de granulats recyclés modifie donc significativement l'eau disponible aux différents stades. Pour clarifier les échanges d'eau dans le béton frais, certaines notions doivent être précisées.

L'eau de pré-saturation (E_{ps}) correspond à la quantité d'eau présente dans les granulats avant malaxage. L'eau ajoutée (E_{aj}) est l'eau complémentaire introduite dans le malaxeur. L'eau absorbée (E_{abs}) correspond à l'absorption d'eau nominale des granulats, état saturé surface sèche (SSS). L'eau qui reste dans la pâte de ciment est appelée eau efficace (E_{eff}). L'eau totale (E_{tot}) introduit dans le mélange est donnée par la relation (8.1).

$$E_{tot} = E_{abs}(A) + E_{eff} = E_{ps} + E_{aj} \quad (8.1)$$

Dans l'étude présentée ici, « A » désigne la saturation initiale en eau des GBR, qui correspond au coefficient d'absorption d'eau Ab_{24} mesuré à 24 heures (état SSS) selon la norme [EN1097-6, 2001]. Pour les bétons à 1,2A, la teneur en eau des GBR est égale à 120 % de celle de l'état SSS, soit un degré de pré-saturation correspondant à l'absorption nominale, plus environ 1 % de la masse sèche des granulats.

Tableau 8.1

Conditions d'exposition

	Programme 1 Eau libre constante Condition de séchage normal		Programme 2 Eau ajoutée constante Condition de séchage sévère	
Famille de béton	B	GC	B	GC
HR (%)	50	50	45	45
Vent (m/s)	< 0,3	< 0,3	8	8

Deux programmes expérimentaux ont été réalisés. Les échantillons ont été testés sous deux régimes de vent différents, correspondant à la condition de séchage normal, – programme 1 –, ou à la condition de séchage sévère, – programme 2 – (Tableau 8.1). Dans le programme 1, la teneur en eau libre a été gardée constante. Dans le programme 2, l'eau ajoutée a été maintenue constante. À titre d'exemple, un béton de bâtiment (B) soumis au programme 1, contenant un sable naturel et des gravillons de GBR saturés à 1,2A, est désigné par : 1-B0S100G-1,2A. Tous les bétons étudiés sont détaillés dans le Tableau 8.2.

Tableau 8.2

Programme d'essais

		Taux de substitution			
		0S0G	0S30G	30S0G	0S100G
Saturation initiale en eau des GBR	0,3A	–	–	–	1-B0S100G-0,3A
	0,5A	–	–	–	2-B0S100G-0,5A 2-GC0S100G-0,5A
	0,7A	–	–	–	1-B0S100G-0,7A
	1A	1-B0S0G-1A 1-GC0S0G-1A	1-B0S30G-1A	1-B30S0G-1A	1-B0S100G-1A 1-GC0S100G-1A
	1,2A	2-B0S0G-1,2A 2-GC0S0G-1,2A	–	–	1-B0S100G-1,2A 2-B0S100G-1,2A 2-GC0S100G-1,2A

8.3.1.2. Matériaux et formules des bétons

Les GBR utilisés dans cette étude avaient un coefficient d'absorption d'eau élevé, soit 8,9 % pour le sable et 5,6 à 5,8 % pour les gravillons 4/10 et 10/20 respectivement [Sedran, 2013].

Les bétons de bâtiment (B) ont été formulés pour atteindre la classe de résistance C 25/30, ceux du génie civil (GC) la classe C 35/45. Pour chacun, différentes proportions de sable et de gravillons de GBR ont été utilisées. Ils ont été réalisés avec le même lot de ciment Portland CEM II/A-L 42,5 N provenant de la même cimenterie. Le ciment a une composition de Bogue déclarée de 61 % C₃S, 0 % C₂S, 7,9 % C₃A, 12 % C₄AF, un Na₂O_{eq} de 0,59 %, une finesse Blaine de 370 m²/kg, et une masse volumique de 3,09 kg/dm³.

Les fillers calcaires ont été pris en compte dans la teneur en liant (L), définie comme la somme des masses de ciment et de calcaire (en kg/m³).

Les formules de béton testées sont conformes à celles du Projet National RECYBETON [Sedran, 2013] (Tableaux 8.3 et 8.4).

Tableau 8.3

Formules des bétons testés dans le programme d'essais n° 1

	1-B 0S0G	1-B 30S0G	1-B 0S30G	1-B 0S100G	1-GC 0S0G	1-GC 0S100G
GN 6,3/20 (kg/m ³)	820	829	462		810	
GR 10/20 (kg/m ³)			296	701		682
GN 4/10 (kg/m ³)	267	190	228		264	
GR 4/10 (kg/m ³)				163		158
SN 0/4 (kg/m ³)	780	549	813	806	771	782
SR 0/4 (kg/m ³)		235				
Ciment, C (kg/m ³)	270	276	276	282	299	336
Filler calcaire, F (kg/m ³)	45	31	31	31	58	53
Superplastifiant SP (kg/m ³)	0,747	0,798	0,861	0,798	1,26	1,31
E_{eff} (kg/m ³)	180	185	185	189	175	185
E_{tot} (kg/m ³)	194.6	221.4	212.3	241	188.7	235.1
E_{eff}/L (kg/m ³)	0,57	0,60	0,60	0,60	0,49	0,48
Volume de pâte (l/m ³)	285	287	287	293	302	321
Compacité g*	0,785	0,79	0,781	0,777	0,784	0,772
EMP (mm)	0,80	0,86	0,82	0,89	0,90	1,05

Tableau 8.4

Formules des bétons testés dans le programme d'essais n° 2

	2-B 0S0G	2-B 0S100G- 1,2A	2-B 0S100G- 0,5A	2-GC 0S0G	2-GC 0S100G- 1,2A	2-GC 0S100G- 0,5A
GN 6,3/20 (kg/m ³)	820			810		
GR 10/20 (kg/m ³)		701	701		682	682
GN 4/10 (kg/m ³)	266			264		
GR 4/10 (kg/m ³)		163	163		158	158
SN 0/4 (kg/m ³)	780	806	806	771	782	782
SR 0/4 (kg/m ³)						
Ciment, C (kg/m ³)	270	282	282	299	336	336
Filler calcaire, F (kg/m ³)	45	31	31	58	53	53
Superplastifiant SP (kg/m ³)	1,35	1,40	1,40	2,10	2,18	2,18
E_{eff} (kg/m ³)	166	174	149.1	151	157	133
E_{tot} (kg/m ³)	180	232	207	165	213	189
E_{eff}/L (kg/m ³)	0,53	0,56	0,48	0,42	0,40	0,34
Volume de pâte (l/m ³)	289	292	282	292	304	293
Compacité g*	0,785	0,777	0,777	0,784	0,772	0,772

8.3.1.3. Protocoles d'essais

Les protocoles d'essais utilisés dans les programmes 1 et 2 sont décrits en détail dans les travaux cités [Turcry, 2004 ; Mbemba, 2010 ; Bendimerad,

2016 ; Souche, 2015]. Les mesures ont démarré 20 minutes après le premier contact entre l'eau et le ciment. Pour toutes les courbes, l'origine du temps est le début du séchage.

8.3.2. Comportement du béton frais avant la prise

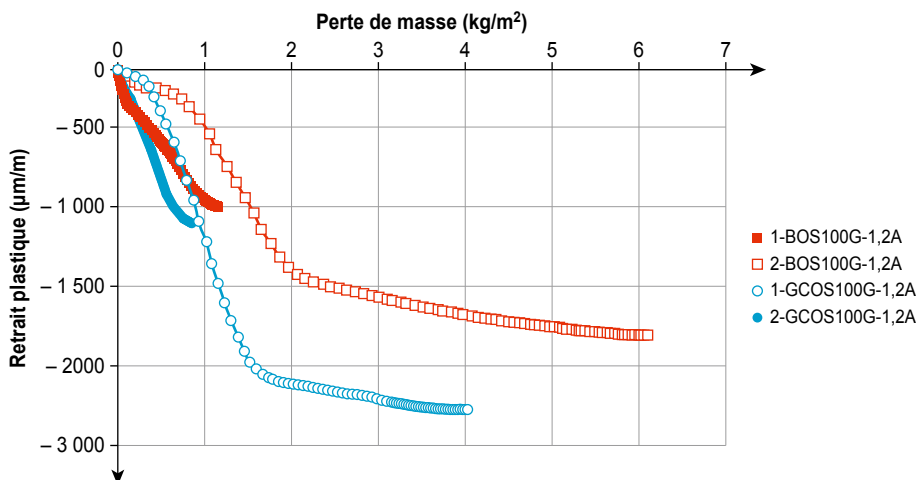
8.3.2.1. Effet des conditions environnementales sur le comportement du béton recyclé

Pour les deux conditions de séchage, l'évolution du retrait plastique en fonction de la perte de masse (Figure 8.4) montre la même tendance au départ. Le développement du retrait plastique est légèrement retardé pour les bétons du programme 2. En fait, ces bétons ont montré un ressuage plus élevé que les bétons du programme 1 (indépendamment de la condition de séchage). Ensuite, la deuxième phase se caractérise par un taux de retrait constant.

Pour une formule de béton donnée, la partie linéaire de la courbe (deuxième phase) présente une pente identique dans les deux programmes. Ensuite (troisième phase), la vitesse du retrait diminue progressivement et la perte de masse se traduit par un accroissement de la teneur en air dans le système poreux. Pour le programme 1, le début de la troisième phase apparaît pour une perte de masse plus faible que pour le programme 2. En condition normale de séchage, la vitesse du retrait plastique diminue réellement entre le début et la fin de la prise, lorsque le module de cisaillement devient significatif [Bendimerad *et al.*, 2016]. En condition sévère de séchage, le retrait plastique se développe principalement avant deux heures. Durant cette période, la rigidité du béton est encore négligeable. Le développement du retrait plastique n'est alors pas

Figure 8.4

Retrait plastique en fonction de la perte de masse



contraint, et il atteint des valeurs plus élevées. L'augmentation de l'intensité de séchage a une influence plus forte sur le retrait plastique des bétons de génie civil, caractérisée par un plus faible rapport eau/liant.




8.3.2.2. Effet du taux de substitution et de la saturation initiale en eau des GBR

La teneur en eau des GBR a été mesurée à différents moments, en conservant le béton soit en condition de séchage, soit protégé de la dessiccation (condition endogène). L'objectif de ces essais était d'évaluer les transferts hydriques entre les GBR et la pâte de ciment au cours du temps, avec et sans séchage [Salgues *et al.*, 2016]. Le protocole expérimental est inspiré des travaux de Bello sur les granulats légers [Bello, 2014], rappelé Figure 8.5.

Après malaxage, le béton a été conservé en condition endogène ou de dessiccation. Toutes les dix minutes environ, un échantillon de béton frais a été tamisé à 5 mm afin de séparer la pâte de ciment des gravillons de GBR. Les gravillons humides ont été pesés puis séchés dans une étuve pendant deux heures. Une fois secs, ils ont été pesés à nouveau [Salgues *et al.*, 2016].

Figure 8.5

Protocole pour mesurer la teneur en eau des gravillons de GBR au cours du temps [Salgues *et al.*, 2016]

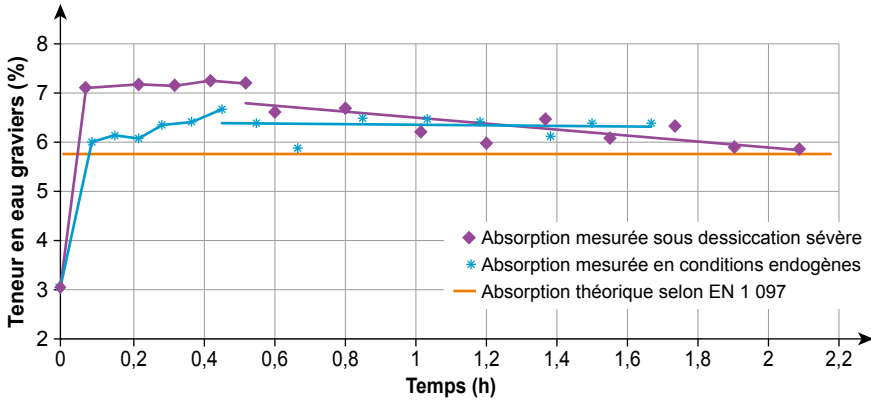
1. Tamisage ($\phi = 5 \text{ mm}$)	2. Pesée 1	3. Étuve à 105 °C	4. Pesée 2
		Séchage des granulats	

Les résultats de la Figure 8.6 sont donnés à titre d'exemple, pour le béton 2-B0S100G-0,5A. Le comportement des gravillons de GBR dépend de leur état de saturation initial. S'ils sont partiellement saturés, ils absorbent rapidement de l'eau lorsqu'ils sont dans le béton, jusqu'à satisfaire presque entièrement leur absorption maximale, selon la Figure 8.6.

Une légère sur-absorption d'eau peut même se produire jusqu'à 30 minutes après le coulage du béton. Par conséquent, l'absorption d'eau des GBR dans la pâte de ciment est très rapide. Ce résultat corrobore les mesures d'absorption d'eau des GBR réalisées dans l'eau [de Brito *et al.*, 2011 ; Bendimerad *et al.*, 2015]. Néanmoins, dans la condition de vent sévère, après cette première phase d'absorption, les gravillons du béton 2-B0S100G-0,5A relarguent de l'eau, à cause du déficit en eau dans le béton et dans la pâte. Pour le béton B0S100G-0,5A en condition endogène, ce transfert d'eau n'est pas réellement constaté (Figure 8.6).

Figure 8.6

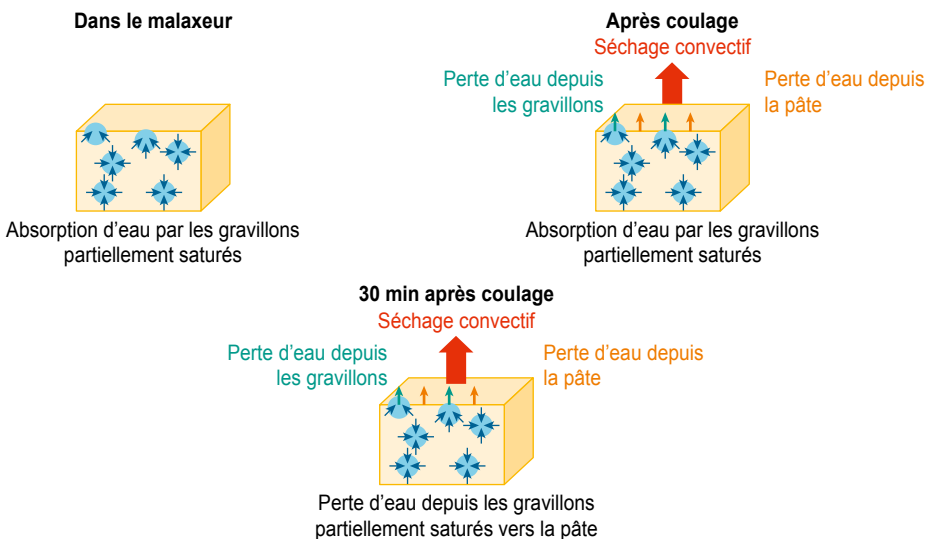
Teneur en eau des gravillons de GBR (g d'eau/g de granulats secs) du béton 2-BOS100G-0,5A conservé en condition de séchage ou en condition endogène [Salgues *et al.*, 2016]



D'après ces premiers résultats, il est intéressant d'illustrer la variation du volume d'eau dans les gravillons de GBR, la pâte de ciment et le béton. Les différentes étapes sont indiquées Figure 8.7. Dans le malaxeur, les GBR non saturés complètent leur absorption d'eau jusqu'à 90 % de la valeur nominale. Puis, après coulage, l'absorption peut se poursuivre pendant une demi-heure encore. Enfin, dès que la dessiccation commence, le béton perd de l'eau de façon homogène. Cette eau est fournie par la pâte de ciment et/ou les GBR.

Figure 8.7

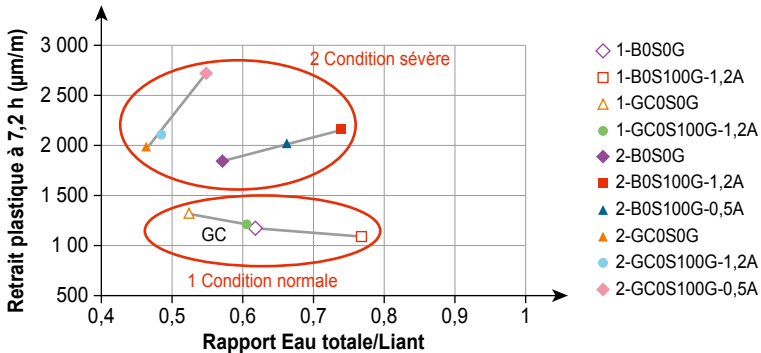
Transferts hydriques dans le béton, la pâte de ciment et les GBR au cours du temps, pour le béton BOS100G-0,5A [Salgues *et al.*, 2016]



La Figure 8.8 présente le retrait plastique à 7,2 heures en fonction du rapport E_{tot}/L . En condition normale, le retrait plastique diminue avec l'augmentation du rapport E_{tot}/L , alors qu'il augmente en condition sévère.

Figure 8.8

Retrait plastique à 7,2 h en fonction du rapport E_{tot}/L (Eau totale/liant)



En général, l'augmentation du rapport E_{tot}/L favorise le ressuage, qui retarde et atténue alors le développement du retrait plastique. La condition sévère n'entraîne pas un rapport « retrait plastique/perte de masse » supérieur, mais elle influence significativement l'amplitude du retrait plastique. Avec un taux d'évaporation élevé, le développement du retrait plastique est plus précoce et il peut se produire avant la prise, ce qui n'est pas le cas en condition normale de séchage (Figure 8.4).

Pour les bétons de bâtiment placés en condition de séchage sévère, l'évolution du retrait en fonction du rapport E_{tot}/L peut être décrit par une relation linéaire (Figure 8.8). Pour les bétons de génie civil, une autre relation linéaire est trouvée, mais avec une pente plus forte. Ces comportements peuvent s'expliquer par l'influence de la formulation et le rôle des GBR. Le béton de GBR a effectivement une plus forte proportion de pâte (Tableau 8.4), et le retrait augmente linéairement avec le volume de pâte [Hansen et Almudaiheem, 1987]. De plus, le séchage sévère est susceptible de provoquer la dessiccation des GBR [Maruyama et Sato, 2005, Wyrzykowski *et al.*, 2015] alors qu'ils peuvent fournir une cure interne en condition scellée ou en condition normale de séchage. Enfin, l'augmentation de la proportion de GBR entraîne une augmentation du retrait de séchage, en raison de la présence de l'ancienne pâte et d'un plus faible module d'élasticité des GBR.

En résumé, l'influence des GBR sur le retrait plastique dépend des conditions de séchage. En condition sévère, ils provoquent une augmentation du retrait alors qu'en condition normale, ils atténuent le développement du retrait.

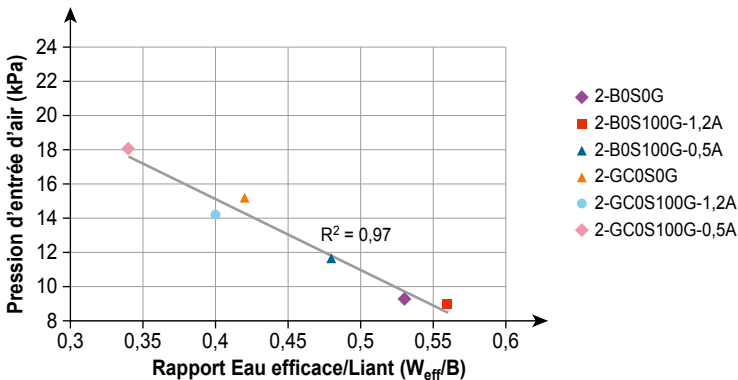
8.3.2.3. Sensibilité à la fissuration en condition de séchage sévère

Dans cette partie, un modèle de sol fin drainé a été utilisé pour déterminer la pression d'entrée d'air. Tout d'abord, il est nécessaire de construire les courbes caractéristiques du béton frais. Ces courbes sont obtenues en traçant la relation entre la teneur en eau (%) et la pression capillaire (hPa) dans un repère semi-logarithmique. Conformément à la méthode développée pour les sols fins, la valeur de la pression d'entrée d'air est approximée par l'intersection des deux droites correspondant au régime constant et au régime transitoire [Souche, 2015 ; Souche *et al.*, 2016].

La Figure 8.9 indique que la valeur d'entrée d'air est fortement tributaire du rapport eau efficace/liant (E_{eff}/L). La teneur en liant comprend le ciment et les fillers calcaires. Les GBR ne semblent pas avoir d'influence sur la valeur de la pression d'entrée d'air, puisque c'est une caractéristique physique de la pâte. Ensuite, avec la poursuite du séchage, le champ de dépression capillaire est perturbé par l'entrée d'air, et la détermination du coefficient de perméabilité à partir de la pente de la dépression capillaire n'est alors pas possible. Après l'entrée d'air, le béton frais se comporte comme un milieu poreux non saturé.

Figure 8.9

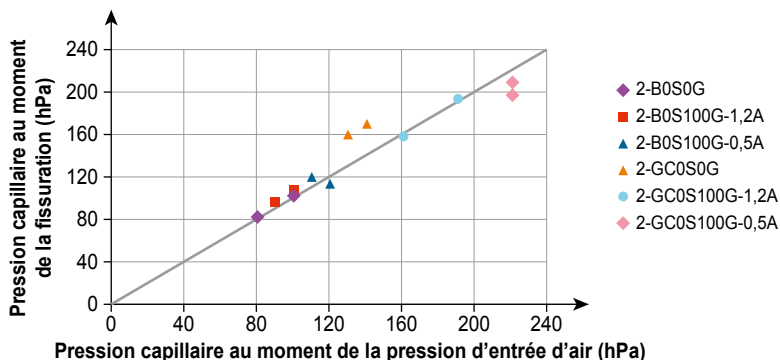
Influence du rapport E_{eff}/L sur la pression d'entrée d'air [Souche *et al.*, 2016]



Pour chaque béton, la pression capillaire au moment de la fissuration a été comparée à la pression d'entrée d'air. La Figure 8.10 présente, pour tous les bétons, la valeur mesurée de la pression capillaire au moment de la fissuration en fonction de la valeur d'entrée d'air calculée. Pour les bétons de granulats naturels (0S0G) et pour les bétons de GBR (0S100G), la figure révèle une forte corrélation linéaire entre la valeur d'entrée d'air et la pression de fissuration.

Figure 8.10

Pression capillaire au moment de la fissuration en fonction des pressions d'entrée d'air [Souche, 2015]



La fissuration apparaît donc au moment où se produit l'entrée d'air. Pour les bétons de granulats naturels, cela confirme les résultats d'études antérieures [Slowik *et al.*, 2008 ; Slowik et Ju, 2011] : l'entrée d'air est un moment critique pour la fissuration du béton frais. Pour les bétons de GBR, on observe le même comportement que pour les bétons de granulats naturels. L'accroissement des contraintes locales provoque la fissuration. Selon leur degré initial de saturation, soit les GBR complètent leur absorption en réduisant l'eau efficace de la pâte (GBR non saturés), soit ils alimentent une éventuelle cure interne de la pâte soumise à la dessiccation (GBR sursaturés). Donc, selon [Salgues *et al.*, 2016], l'eau contenue dans les GBR a un impact direct sur la fissuration du béton au jeune âge.

8.3.3. Comportement du béton durci

8.3.3.1 Effet du taux de substitution

La Figure 8.11 montre l'influence du pourcentage de substitution des granulats naturels par les sables et gravillons de GBR sur l'amplitude du retrait plastique à 24 heures [Turcry et Loukili, 2006].

Ici, toutes les courbes ont été initialisées à l'âge de la « déformation initiale » définie dans [Bendimerad *et al.*, 2016] et donné par le moment où la température du béton frais atteint pour la première fois la température du moule (environ 1 heure). Les bétons B0S30G et B0S100G atteignent un retrait plastique comparable, soit environ 100 $\mu\text{m}/\text{m}$. Quand ils sont comparés au béton de granulats naturels, la différence est significative, mais toutefois inférieure à 10 %. Cela peut s'expliquer par la notion d'épaisseur maximale de pâte (EMP) [de Larrard et Sedran, 1994, de Larrard et Belloc, 1997]. Considérant que le squelette granulaire est rempli par la pâte de ciment, l'EMP représente la pâte qui se trouve en configuration de retrait libre. Les valeurs de l'EMP des trois

bétons sont très proches (Figure 8.12). Le retrait plastique le plus important concerne le béton avec le sable de GBR. Cela s'explique par la surface spécifique élevée du sable de GBR, qui limite le ressuage, comparativement au béton témoin ; le risque de retrait plastique associé provient alors d'une cure insuffisante.

Cette étude vise à fournir des données pour expliquer la sensibilité à la fissuration de retrait au jeune âge de différents bétons de granulats naturels et de GBR. La résistance à la traction du béton a été mesurée 24 heures après le coulage, par traction directe. Le pourcentage de substitution de gravillons ou de sable recyclés a significativement affecté les propriétés mécaniques, tels que le module d'élasticité et la résistance à la traction (Figure 8.13).

Figure 8.11

Effet du taux de substitution sur le retrait plastique

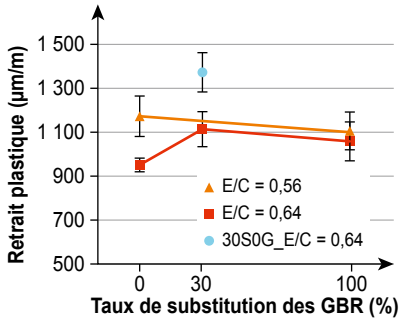


Figure 8.12

Effet du taux de substitution sur l'Épaisseur Maximale de Pâte (EMP)

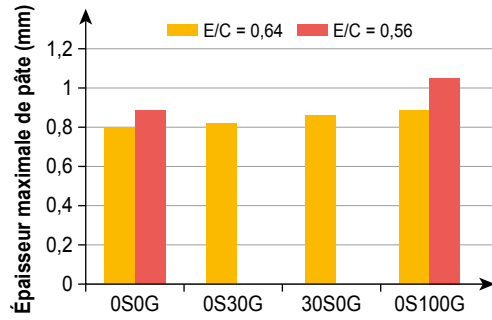
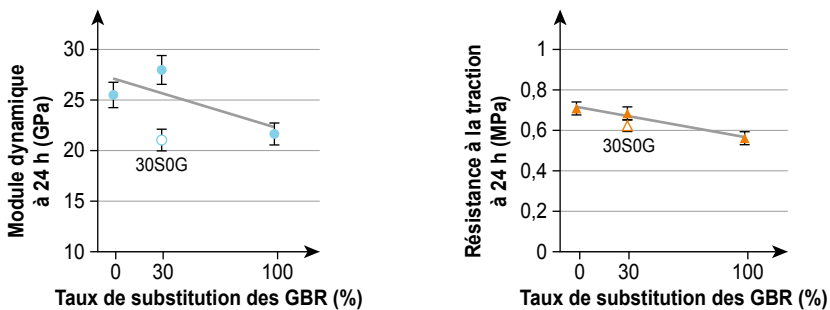


Figure 8.13

Influence du taux de substitution en GBR sur les propriétés au jeune âge



8.3.3.2. Effet de la saturation initiale en eau

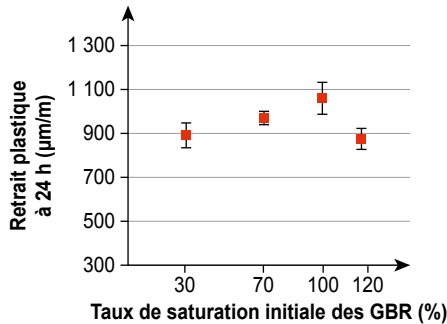
Les mesures de retrait plastique sur le béton B0S100G avec différents taux de saturation en eau des gravillons de GBR ont montré des disparités mineures.

L'amplitude après 24 h est comprise entre 870 et 1 055 $\mu\text{m/m}$ (Figure 8.14a). Les temps de début et de fin de prise sont d'environ 6 heures et 11 heures, respectivement. À 24 heures, le retrait n'a pas significativement augmenté.

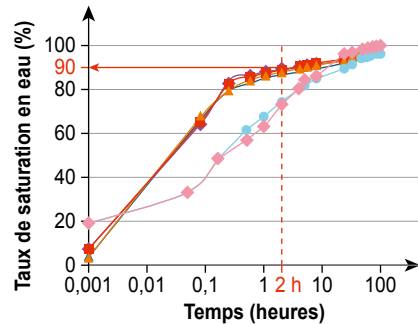
Figure 8.14

Corrélation entre retrait plastique et taux d'absorption d'eau des granulats

a) Effet de la saturation en eau des GBR sur le retrait plastique



b) Influence du type de granulats sur le taux d'absorption d'eau [Bendimerad *et al.*, 2015]



◆ GBR 4-10_hydro ■ GBR 4-10_pycno ▲ GBR 10-20_hydro
▲ GBR 10-20_pycno ● GBR 6,3-20_hydro ◆ GBR 6,3-20_pycno

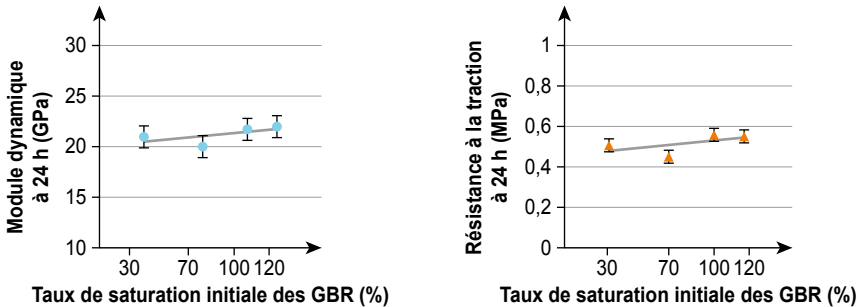
Les bétons 1B0S100G-0,3A et 1B0S100G-1,2A montrent les valeurs les plus faibles. Le béton avec les gravillons de GBR saturés initialement à 0,3A contient plus d'eau ajoutée ($A_{\text{add}} = 218,4 \text{ kg/m}^3$, $E_{\text{gr}} = 22,6 \text{ kg/m}^3$), ce qui provoque un ressuage plus élevé [Almusallam *et al.*, 1998]. Cette eau de ressuage supplémentaire a atténué le retrait plastique de ce béton. Le béton avec le gravillon de GBR sursaturé à 1,2A a aussi un retrait relativement faible. Ce mélange est caractérisé par la même eau totale que le béton de 0,3A ($E_{\text{add}} = 179,8 \text{ kg/m}^3$, $E_{\text{gr}} = 61,2 \text{ kg/m}^3$). Le gravillon sursaturé libère en fait de l'eau dans la pâte de ciment et fournit une cure interne au béton [Zhutovsky *et al.*, 2002]. Cette cure interne a été également observée dans le cas d'autres bétons recyclés [Salgues *et al.*, 2016].

Les mesures d'absorption d'eau sur les différents granulats ont montré, pour les GBR, un taux de saturation en eau relativement élevé au cours de la première heure [Bendimerad *et al.*, 2014]. Après deux heures, la saturation en eau atteint 90 % (Figure 8.14b). Donc, lorsque commence la déformation plastique, la majeure partie de la saturation a déjà été opérée, ce qui explique l'effet limité de la saturation initiale en eau.

Les propriétés mécaniques (module d'élasticité et résistance à la traction) à 24 heures montrent que l'effet de la saturation initiale en eau des gravillons de GBR est négligeable (Figure 8.15).

Figure 8.15

Influence de la saturation initiale en eau des gravillons de GBR sur les propriétés au jeune âge du béton 1-B0S100G [Bendimerad *et al.*, 2016]



8.4. Besoins de recherche

Peu d'études traitent de l'influence des granulats de béton recyclé (GBR) sur le comportement au jeune âge du béton. Une étude approfondie impliquant deux laboratoires a été réalisée pour comprendre l'influence de la saturation initiale en eau et de la proportion de GBR sur les mouvements d'eau dans le béton frais et sur les propriétés du béton au cours de son durcissement. L'étude présentée dans ce chapitre traite principalement des gravillons de GBR. Ce matériau est caractérisé par une propreté relativement bonne, une faible teneur en ancienne pâte et une forte absorption d'eau. Les résultats obtenus avec le sable de GBR sont différents, ce qui souligne la nécessité de bien considérer les propriétés du GBR. De nouvelles recherches expérimentales devraient s'intéresser à l'influence de la propreté et de la proportion de sables de GBR. Même si leur proportion est faible, les fines (produites par le concassage du béton d'origine) ont une influence significative sur le retrait plastique, en raison de leur forte absorption d'eau.

En termes d'essais et d'analyses, l'étude sur la sensibilité à la fissuration n'a pas pris en compte le fluage de traction, ni la relaxation au jeune âge. Ces propriétés ne sont pas facilement mesurables par essais directs. Cependant, des essais de retrait empêché permettraient de fournir une estimation indirecte de ces paramètres. Par exemple, le système TSTM (*Température-Stress Testing Machine*) fournit l'évolution de la déformation libre et empêchée, desquelles le fluage et la relaxation peuvent être déduits (thèse Bendimerad, 2016).

Les GBR influencent à différents niveaux le comportement du béton au jeune âge, et les effets sont souvent couplés. Les études expérimentales ne permettent alors pas toujours de séparer les effets induits par les propriétés intrinsèques des GBR de ceux associés à leur comportement dans la pâte de ciment. Une modélisation multi-échelle constituerait alors une approche intéressante pour comprendre ces phénomènes complexes.

8.5. Conclusions

Deux programmes expérimentaux ont été réalisés en concertation afin de fournir des données sur l'influence de la proportion de granulats de béton recyclé (GBR) et de leur saturation initiale en eau sur le retrait plastique, le risque de fissuration et les propriétés du béton au jeune âge. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette étude approfondie :

- en raison de leur porosité relativement élevée, les GBR absorbent de l'eau qui peut être libérée dans la pâte de ciment. En condition endogène ou sous séchage modéré, cette eau fournit une cure interne qui atténue le retrait plastique. Cependant, en condition de séchage sévère, le taux d'évaporation élevé peut amorcer le séchage des GBR, et donc augmenter l'ampleur du retrait,
- le concept de pression d'entrée d'air peut être utilisé pour étudier l'influence des GBR sur le risque de fissuration du béton frais. Le moment où la fissuration apparaît a été évalué par le biais d'essais spécifiques (ASTM C1579) et les résultats expérimentaux des bétons étudiés ont montré une corrélation effective avec la pression d'entrée d'air, déterminée à partir de la courbe de teneur en eau en fonction de la pression capillaire,
- le gravillon de GBR utilisé dans cette étude avait une cinétique d'absorption rapide, de sorte que la quantité d'eau restant dans la pâte de ciment était proche de la teneur théorique en eau efficace. Une faible influence du taux de saturation initial a été observée lorsque l'eau totale est maintenue constante. À quantité variable d'eau totale, la pression d'entrée d'air diminue linéairement avec le rapport eau efficace/liant (E_{eff}/L), quel que soit le type de granulat,
- la proportion de GBR a une influence notable sur les propriétés du béton, à savoir le retrait plastique, le module d'élasticité et la résistance à la traction. Cependant, il est difficile de statuer sur la sensibilité à la fissuration d'après ces résultats, car l'influence des GBR sur la relaxation n'a pas été évaluée dans cette étude.

À partir de ces résultats expérimentaux, il peut être recommandé d'appliquer une cure adaptée aux bétons de GBR. Les travaux montrent qu'il existe effectivement un couplage fort entre la saturation initiale en eau, les propriétés du béton frais et l'exposition au séchage, vis-à-vis du retrait plastique et du risque de fissuration associé. Les proportions de GBR et leur saturation initiale n'induisent pas, en eux-mêmes, une plus grande sensibilité à la fissuration, mais ils sont susceptibles de favoriser l'apparition des fissures dans des conditions de séchage sévère (GBR secs au départ et taux d'évaporation élevé).

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur reconnaissance, pour leur soutien avéré, à l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), dans le cadre du projet ECOREB, et au Projet National RECYBETON.

Partie IV.

Propriétés du béton recyclé durci

*Patrick Rougeau*¹

Les chapitres précédents ont présenté les particularités des bétons de granulats de béton recyclé (GBR), en particulier celles qui concernent leur microstructure et leur porosité. Leurs caractéristiques intrinsèques sont contrôlées par la nature du granulats naturel d'origine et par la quantité et qualité de l'ancienne pâte de ciment. Les bétons de GBR présentent alors des propriétés spécifiques à l'état durci, selon la nature des GBR et le taux de substitution pratiqué.

Les questions abordées dans cette partie pour chaque propriété à l'état durci sont les suivantes :

- les GBR jouent-ils un rôle spécifique ?
- quels sont les mécanismes impliqués ?
- les méthodologies et les essais habituels, utilisés pour les bétons de granulats naturels, sont-ils adaptés au béton de GBR ?
- quelles sont les conditions requises pour produire des bétons de GBR ayant des propriétés similaires à celles des bétons de granulats naturels ?

Cette partie « Propriétés du béton recyclé durci » est subdivisée en cinq chapitres :

- le premier (chapitre 9) concerne la microstructure du béton de GBR, en s'intéressant plus particulièrement à l'auréole de transition entre l'ancienne et la nouvelle pâte de ciment d'une part, et au transport de l'eau vers la pâte de ciment lorsque les GBR sont sursaturés d'autre part ;
- le deuxième (chapitre 10) décrit l'influence de l'introduction des GBR sur les propriétés instantanées du béton. Les relations entre la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité, en fonction du taux de substitution en GBR, sont étudiées ;

1. CERIB, Département Matériaux et Procédés, Epernon.

- le troisième (chapitre 11) concerne les déformations différées et les propriétés de fatigue, en particulier les déformations de retrait et de fluage ;
- le quatrième (chapitre 12) traite des propriétés liées à la durabilité : risques de corrosion des armatures (carbonatation, migration des ions chlorures, perméabilité aux gaz, porosité), résistance aux cycles de gel/dégel, risques liés aux réactions alcalis-silice et à la présence de sulfates (formation d'ettringite/thaumasite) ;
- enfin, le cinquième (chapitre 13) traite du comportement au feu. L'écaillage du béton de GBR et la résistance au feu de deux poutres sont étudiés.

Chapitre 9.

Microstructure du béton recyclé

E. Garcia-Diaz¹, A. Djerbi², G. Le Saout¹

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

1. IMT Mines d'Alès, C2MA, Alès.

2. IFSTTAR, Paris.

9.1. Introduction

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

9.2. État de l'art

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

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

9.3. Résultats recybeton

9.3.1. Microstructure du mortier

9.3.1.1. Matériaux et méthodes

9.3.1.1.1. Mortiers

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

9.3.1.1.2. Caractérisations microstructurales

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

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

9.3.1.1.3. Tests de nano-indentation

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

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

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

9.3.1.2. Résultats

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

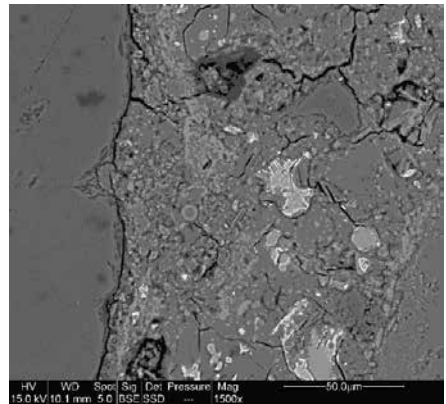
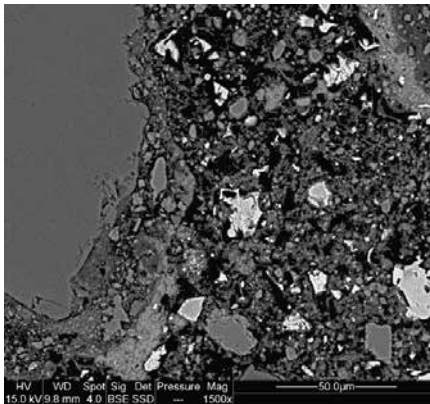
La distribution des phases anhydres après 2 jours de durcissement est donnée Figure 9.3. Les mortiers incorporant le sable naturel sec et le sable de GBR sec ont la même distribution. Dans les deux cas, la pâte entourant les grains est impactée par le même effet de paroi et la répartition du rapport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

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

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

Figure 9.1

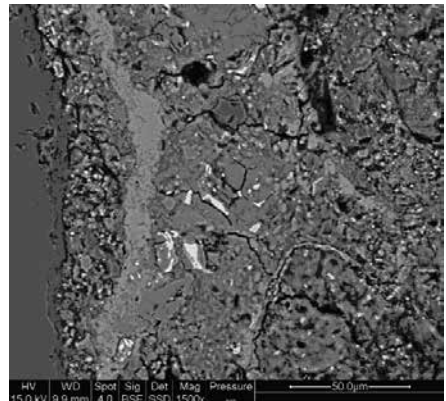
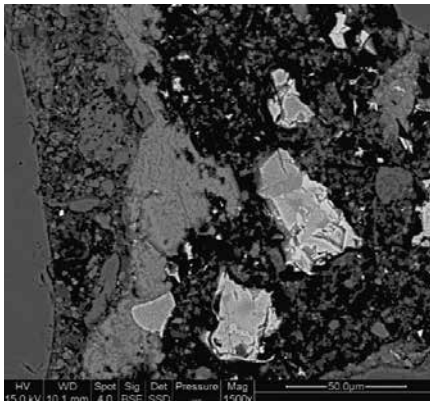
Mortiers à base d'un sable de GBR sec (gauche : à 2 jours ; droite : à 28 jours)



Crédit photo : G. Le-Saout, C2MA.

Figure 9.2

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



Crédit photo : G. Le-Saout, C2MA.

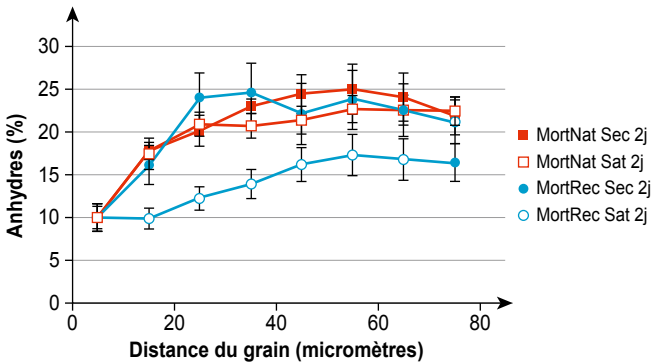
Tableau 9.1

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

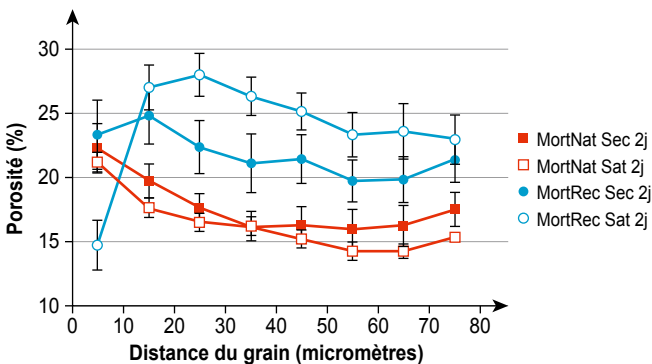
Mortiers	Phases analysées	H_M (MPa)	
		Moyenne	Écart Type
GBR secs à 28 jours	Ancienne pâte de ciment	0,67	0,13
	Nouvelle pâte de ciment	0,41	0,18
	Granulat naturel	2,51	1,13
GBR saturés à 28 jours	Ancienne pâte de ciment	0,64	0,30
	Nouvelle pâte de ciment	0,43	0,15
	Granulat naturel	1,82	0,53

Figure 9.3

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

**Figure 9.4**

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



9.3.2. Microstructure du béton

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

9.3.2.1. Matériaux et méthodes

9.3.2.1.1. Composition des mélanges

Neuf mélanges ont été étudiés au total :

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

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

9.3.2.1.2. Coulage et conservation des éprouvettes

Pour chaque composition, des éprouvettes cylindriques 11 × 22 cm ont été coulées dans des moules en acier et compactées à l'aide d'une table vibrante. Elles ont été démoulées à 24 heures et immergées dans l'eau. Après 1 an de cure, de petits échantillons de taille 35 × 35 × 10 mm³ ont été prélevés dans ces éprouvettes. Ces échantillons ont été séchés à 45 °C sous vide, en présence de gel de silice, pendant 14 jours pour éliminer l'eau libre. Le séchage à cette température ne provoque *a priori* pas de fissuration [Baroghel-Bouny *et al.*, 2002]. Les échantillons secs ont été imprégnés de résine époxyde, polis en différentes étapes pour obtenir une surface lisse et plane pour l'imagerie MEB. Comme les échantillons ne sont pas conducteurs, ils ont été recouverts d'une très fine couche métallique.

9.3.2.1.3. Observations MEB de la microstructure des bétons

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

9.3.2.2. Résultats

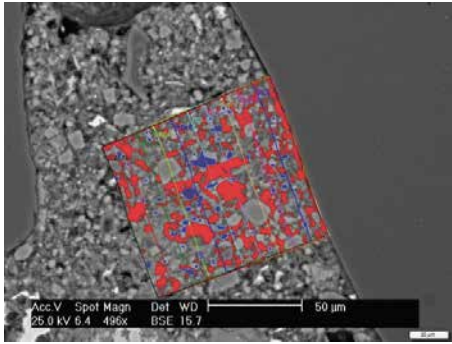
9.3.2.2.1. Auréole de transition des bétons de référence 0S0G

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

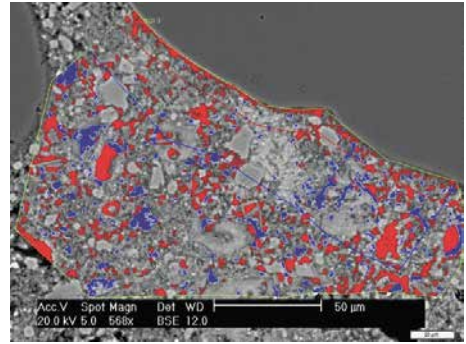
Ce résultat s'explique par l'effet de paroi [Scrivener, 1999 ; Bentur *et al.*, 2000] qui engendre un volume de vide plus grand à l'interface avec le granulat, et donc aussi une augmentation locale du rapport e/c . Le rapport entre la porosité à l'interface et la porosité dans la pâte massive de ciment,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

Figure 9.5

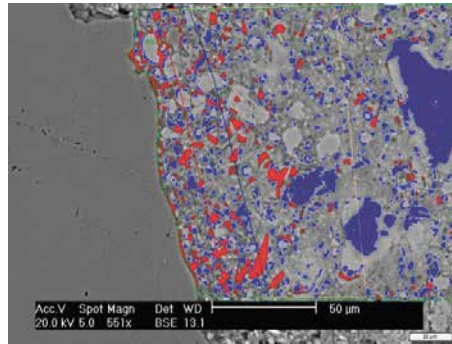
Analyse d'image des bétons de référence 0S0G



C25 - 0S0G



C35 - 0S0G

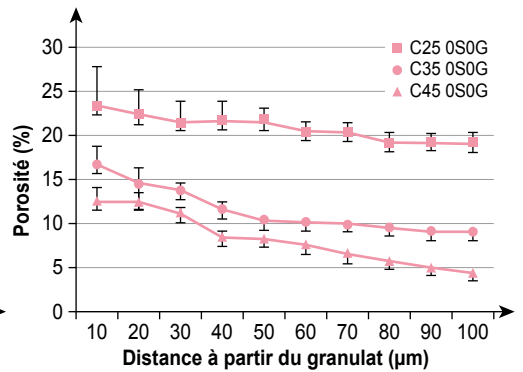
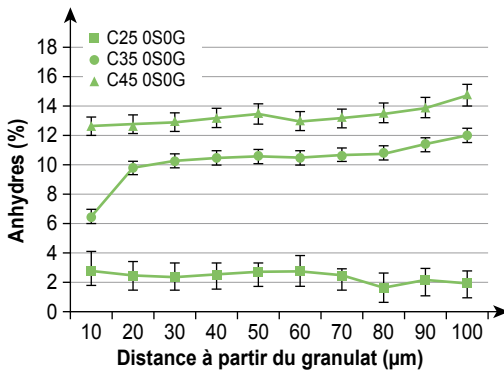


C45 - 0S0G

Crédit photo : A. Bjerbi, IFSTTAR.

Figure 9.6

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



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

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

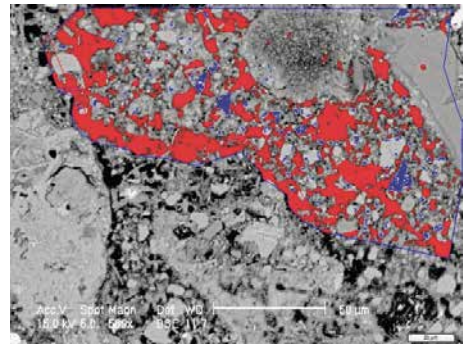
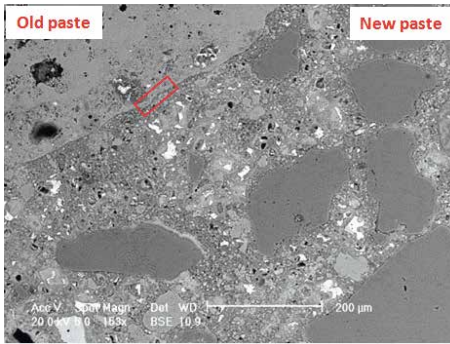
Les profils présentés Figure 9.8 sont issus de l'analyse d'images des photos de la Figure 9.8. Les bétons ont ici différents rapports e/c : 0,67 pour C25 0S0G, 0,63 pour C25 30S30G et 0,66 pour C25 0S100G. Les GBR avaient été pré-saturées avant leur incorporation. Malgré la diminution du rapport e/c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

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

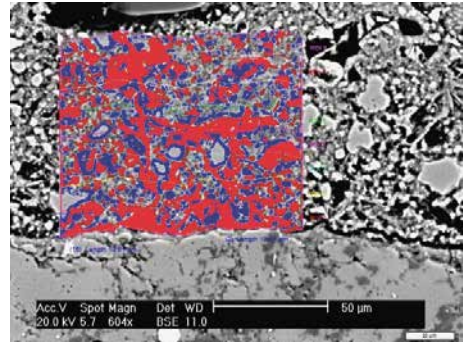
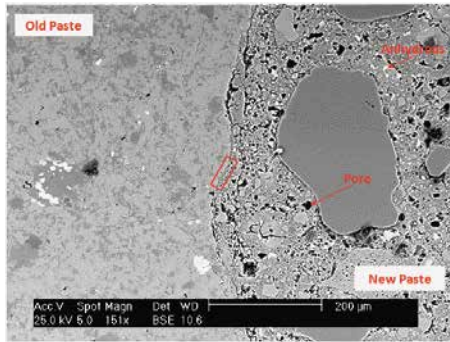
On observe que les bétons C25 30S30G et C25 0S100G ont une porosité qui évolue de façon comparable jusqu'à une distance de 35 μm de l'interface. La porosité se stabilise à une distance de 35 μm pour le béton C25 30S30G, alors qu'elle évolue encore jusqu'à 60 μm pour le béton C25 0S100G, ces distances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

Figure 9.7

Analyse d'image des bétons de GBR C25



C25 30S30G

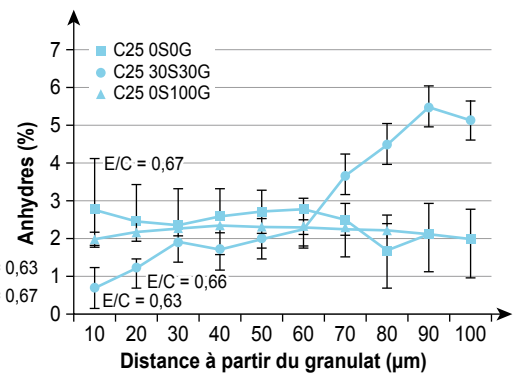
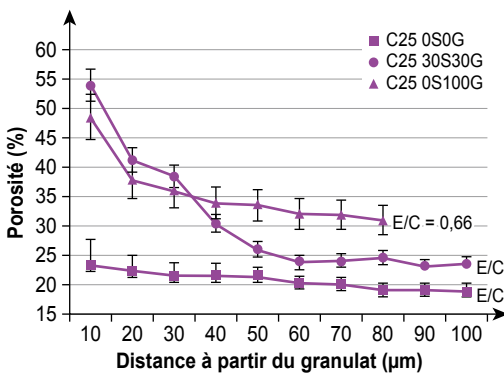


C25 0S100G

Crédit photo : A. Bjerbi, IFSTTAR.

Figure 9.8

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



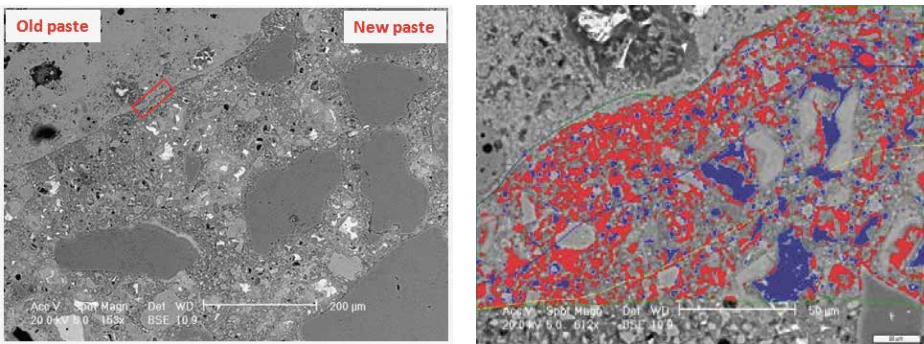
9.3.2.2.3. Auréole de transition des bétons de GBR C35

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

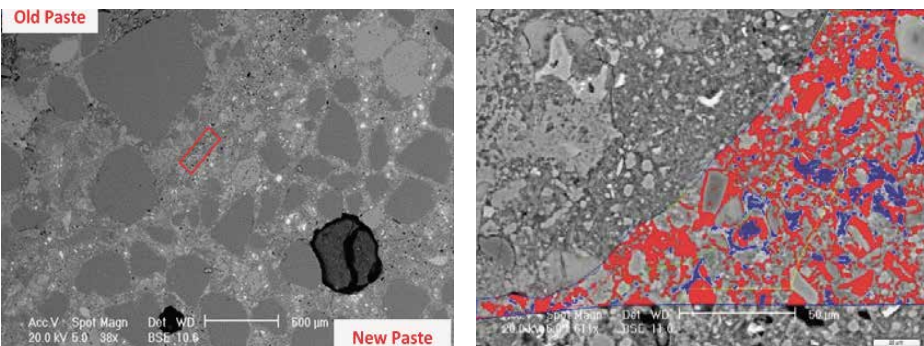
La comparaison entre les bétons montre que la porosité et la teneur en phases anhydres dépendent du rapport e/c. La porosité du béton C35 0S100G est plus élevée que celle du béton C35 30S30G, et la teneur en phases anhydres du béton C35 0S100G est inférieure à celle du béton C35 30S30G. La porosité du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

Figure 9.9

Analyse d'image des bétons de GBR C35



C35 30S30G

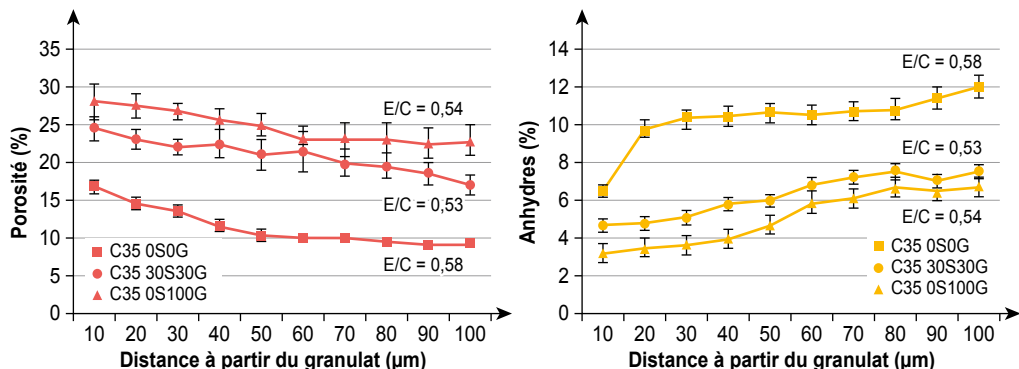


C35 0S100G

Crédit photo : A. Bjerbi, IFSTTAR.

Figure 9.10

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



9.3.2.2.4. Auréole de transition des bétons de GBR C45

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

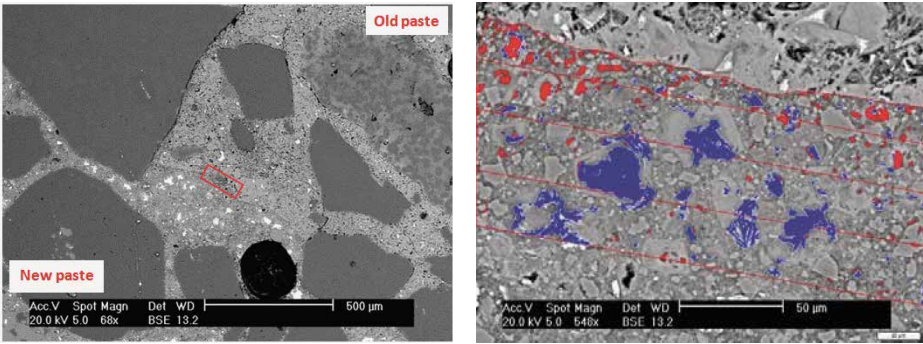
Dans le diagramme (Figure 9.12), le profil de porosité du béton C45 0S100G est plus élevé que celui du béton de référence, mais ce béton présente une plus faible teneur en phases anhydres. Le profil de porosité du béton C45 30S30G est plus faible que celui du béton de référence et du béton C45 0S100G.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

9.3.2.2.5. Analyse comparative des bétons de GBR

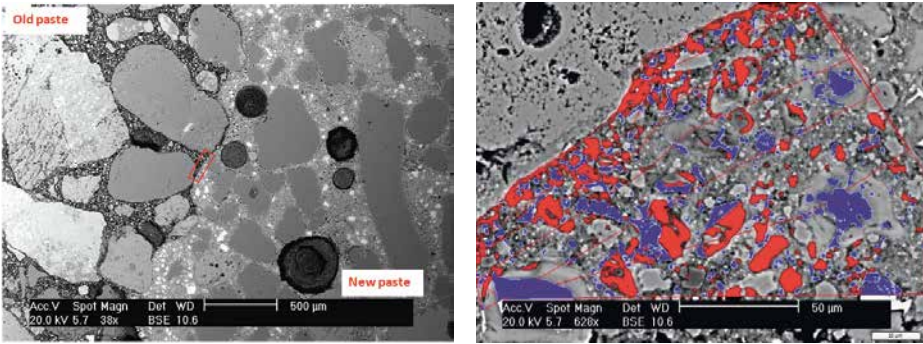
L'effet du rapport e/c sur les profils de porosité et de phases anhydres des bétons de GBR est présenté Figure 9.13. La réduction du rapport e/c améliore le profil de porosité ; le contraste de porosité entre l'interface à la pâte massive est plus élevé pour les rapports e/c 0,43 et 0,41, avec une valeur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

Figure 9.11

Analyse d'image des bétons de GBR C45



C45 30S30S



C45 0S100G

Crédit photo : A. Bjerbi, IFSTTAR.

Figure 9.12

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

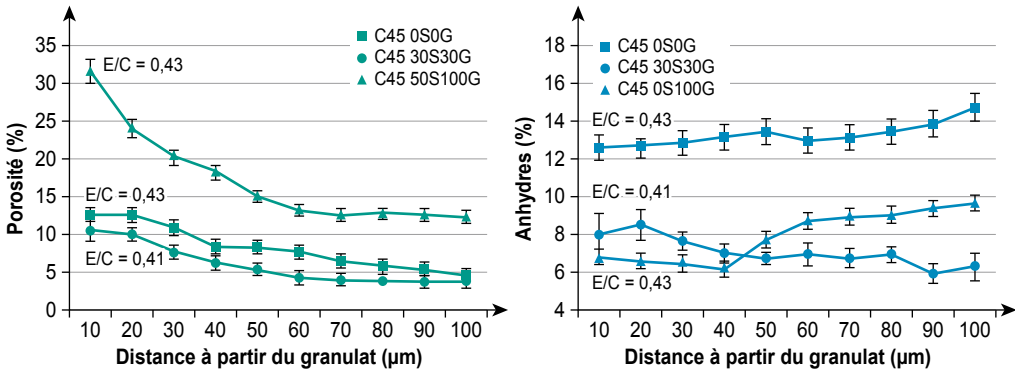
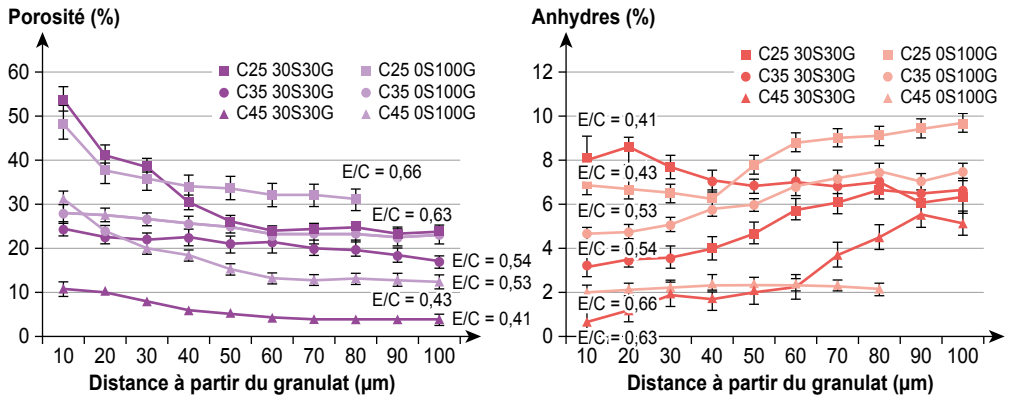
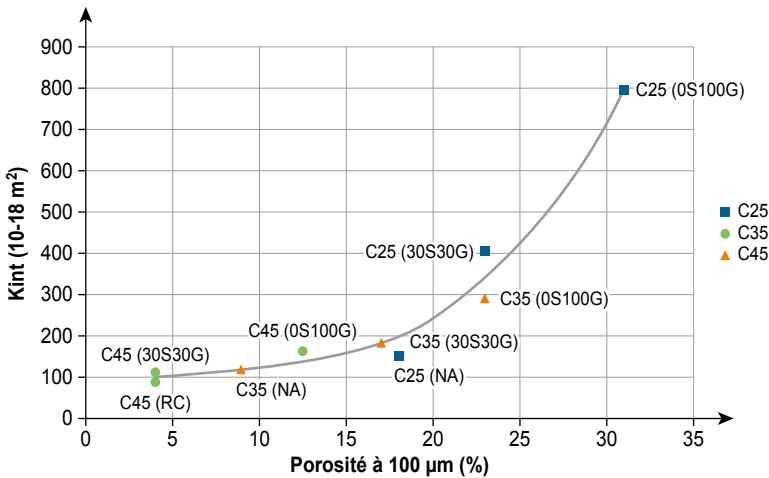


Figure 9.13

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



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

Figure 9.14Perméabilité au gaz *versus* la porosité à 100 µm des gros gravillons

9.4. Besoins de recherche

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

9.5. Conclusion

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

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

Chapitre 10.

Propriétés mécaniques instantanées

E. Ghorbel¹, T. Sedran², G. Wardeh¹

Résumé – Ce chapitre décrit l'influence de l'incorporation des granulats de béton recyclé (GBR) sur les propriétés mécaniques instantanées des bétons.

Dans la première partie, les modèles existants pour les bétons de granulats naturels, reliant la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité à la composition du béton sont adaptés et validés pour les bétons de GBR. Ces modèles permettent de prendre en compte, de façon satisfaisante et au cas par cas, la qualité propre des granulats naturels et des GBR dans le processus de formulation des bétons de GBR.

Dans la deuxième partie, des modèles plus généraux, fondés sur des bases statistiques, décrivent l'effet de l'incorporation des GBR sur la résistance à la compression et à la traction, sur le module d'élasticité et sur la déformation maximale (pic) et ultime des bétons de GBR. Cette partie fournit aussi des éléments de réflexion pour une extension des codes de calcul au cas des bétons de GBR. Ainsi, il est montré que les relations proposées par les codes de calcul dédiées à l'évaluation des propriétés mécaniques et à la modélisation de la courbe contrainte-déformation des bétons de granulats naturels ne sont plus satisfaisantes pour bien prédire le comportement des bétons de GBR. Il est alors proposé que le module d'élasticité E_{cm} , la résistance à la traction par fendage $f_{ctm,sp}$, la déformation maximale ϵ_{c1} et la déformation ultime ϵ_{cu1} , reliés à la résistance moyenne à la compression f_{cm} , prennent en compte un paramètre décrivant l'effet du taux de substitution des GBR. En outre, une expression analytique de la courbe contrainte-déformation est proposée pour les bétons incorporant des GBR.

1. L2MGC, Université de Cergy-Pontoise.

2. IFSTTAR, Nantes.

10.1. Notation

Pour l'analyse des résultats, les rapports suivants doivent être préalablement définis :

$$FV_i = \frac{V_i}{\sum_j V_j} \quad (10.1)$$

où FV_i est la fraction volumique du granulat i , et V_j la teneur volumique des différentes fractions respectives de granulats dans le béton. Généralement, les granulats sont séparés en sable petits et gros gravillons, naturels ou de GBR.

$$\Gamma_v = \frac{\sum V_{\text{GBR}}}{\sum V_{(\text{GN}+\text{GBR})}} \quad (10.2)$$

où Γ_v est un coefficient de recyclage volumique, égal au rapport entre le volume de GBR (sables et gravillons) et le volume total de granulats dans le béton.

$$\Gamma_m = \frac{\sum M_{\text{GBR}}}{\sum M_{(\text{GN}+\text{GBR})}} \quad (10.3)$$

où Γ_m est un coefficient de recyclage massique, égal au rapport entre la masse de GBR (sables et gravillons) et la masse totale de granulats dans le béton.

10.2. Relations propriétés mécaniques – composition

En raison de leur nature composite (voir chapitre 3), les granulats de béton recyclé (GBR) présentent des propriétés mécaniques différentes, souvent, mais pas toujours, inférieures à celles des granulats naturels (GN). Les propriétés mécaniques des bétons sont alors influencées lorsque les granulats naturels sont substitués par des GBR. Ce paragraphe propose des modèles destinés à prédire les propriétés mécaniques des bétons à partir de leur composition. Cette approche permet de tenir compte quantitativement de la qualité et du dosage respectif des granulats naturels et des GBR, grâce à une caractérisation fine des GBR.

10.2.1. Résistance à la compression

10.2.1.1. État de l'art

De nombreux articles décrivant l'influence de l'incorporation des granulats de béton recyclé (GBR) sur la résistance à la compression des bétons sont

disponibles dans la littérature. Pourtant, il est difficile d'en tirer des conclusions univoques, pour différentes raisons :

- les bétons de GBR sont toujours comparés à des bétons de référence à base de granulats naturels, mais le choix du granulat naturel peut relativiser l'influence du GBR. En d'autres termes, le même GBR aura un impact différent si le granulat naturel qu'il remplace possède d'excellentes ou de moyennes qualités mécaniques ;
- différentes stratégies sont adoptées pour comparer le béton avec différents taux de recyclage : elles considèrent soit le même rapport eau totale/ciment (E_{tot}/C), soit le même rapport eau efficace/ciment (E_{eff}/C), soit encore la même maniabilité ce qui mène à différents rapports E_{eff}/C ;
- enfin, l'influence du GBR, de même que celle du granulat naturel, dépend de sa forme, de sa taille, de ses propriétés mécaniques, etc.

Une importante compilation de 236 articles a récemment été publiée [Silva *et al.*, 2014b]. Elle s'intéresse aux facteurs affectant les différentes propriétés des GBR issus des Déchets de Construction et de Démolition (DCD) destinés à la production de bétons. Parmi ces articles, 119 dédiés plus spécifiquement à la résistance à la compression ont été analysés de façon plus approfondie [Silva *et al.*, 2014a]. Sur la base d'une démarche statistique, les auteurs ont d'abord développé une classification des GBR basée sur l'absorption d'eau et la masse volumique après séchage à l'étuve (Figure 10.1). Les gravillons de GBR sont principalement classés dans les zones A et B du diagramme, tandis que les sables de GBR sont plutôt classés dans les zones B et C du diagramme [Silva *et al.*, 2014b], en raison de leur teneur en pâte de ciment plus élevée (voir

Figure 10.1

Classification mécanique des granulats issus de Déchets de Construction et de Démolition (béton, maçonnerie ou mixte), [adapté de Silva *et al.* 2014b].

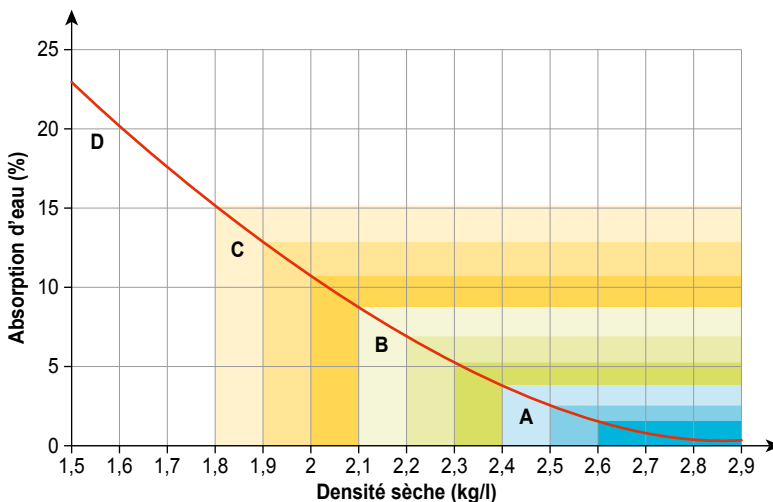
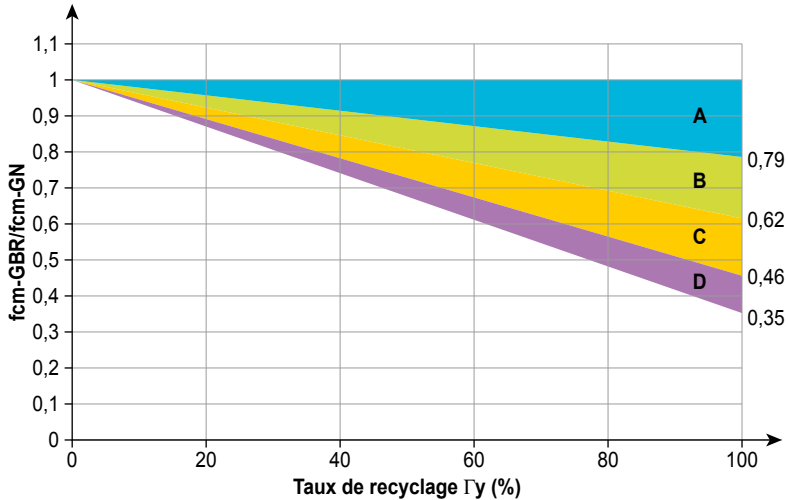


Figure 10.2

Influence statistique du taux de substitution des GBR sur la résistance à la compression moyenne du béton, à même rapport E_{eff}/C (limite inférieure de l'intervalle de confiance à 95 %). $f_{\text{cm-GN}}$ est la résistance à la compression moyenne du béton de référence ne contenant que des granulats naturels ; $f_{\text{cm-GBR}}$ est la résistance à la compression moyenne des bétons de GBR incorporant différents taux de GBR [adapté de Silva *et al.*, 2014a].



chapitre 3). Par ailleurs, ils ont établi une monographie décrivant l'influence statistique des GBR sur la résistance à la compression, pour différents taux de recyclage et en fonction des indices de qualité des granulats précédemment définis (Figure 10.2).

Ces graphiques sont intéressants à deux titres. Tout d'abord, ils permettent d'appréhender l'effet attendu d'un GBR sur la résistance à la compression du béton, en gardant constant le rapport E_{eff}/C . Ensuite, ils illustrent certaines tendances générales bien connues :

- l'augmentation du taux de GBR conduit généralement à une diminution de la résistance à la compression, à même E_{eff}/C . La diminution peut être amplifiée si l'on garde le même dosage en ciment et la même maniabilité, car l'introduction de GBR peut également entraîner une augmentation de la demande en eau ;
- la moindre qualité mécanique des GBR, par rapport aux granulats naturels, explique l'essentiel de la diminution des performances. Effectivement, les granulats naturels sont produits à partir de roches dont la résistance à la compression dépasse généralement 50 MPa, alors que les GBR sont généralement obtenus par concassage de bétons dont la résistance est inférieure à cette valeur. Pour un taux de recyclage donné, la diminution de la résistance à la compression est toutefois moindre si les GBR proviennent

d'un béton parent ayant une résistance à la compression importante. Par exemple, les GBR provenant de bétons à ultra hautes performances (BUHP) peuvent être recyclés dans des BUHP, sans différences significatives par rapport à des granulats naturels [Sedran *et al.*, 2010] ;

- les sables de GBR sont généralement de moins bonne qualité mécanique que les gravillons de GBR, comme expliqué ci-dessus. On s'attend donc à ce qu'ils réduisent davantage la résistance à la compression pour un même volume de substitution.

Même si cette approche constitue une étape importante pour illustrer l'influence globale des GBR sur la résistance à la compression, elle présente deux inconvénients majeurs. Elle ne donne qu'une évaluation statistique approximative de la résistance à la compression, car les bétons utilisés pour réaliser la Figure 10.2 sont constitués de différents granulats naturels et de différents GBR. Par ailleurs, ce n'est pas un outil pratique/scientifique pour concevoir un béton ayant une résistance à la compression donnée.

10.2.1.2. Résultats RECYBETON

[Dao, 2012] a étudié l'influence de différents GBR sur la résistance à la compression de bétons de GBR. Les GBR utilisés provenaient de bétons de différentes résistances, à base de différents granulats naturels (siliceux arrondi, calcaire concassé et mélange des deux). Les GBR obtenus ont été qualifiés de deuxième génération (G2) lorsque les bétons parents étaient composés à 100 % de granulats naturels, et de troisième génération (G3) lorsque le béton parent comportait 100 % de G2 [Dao, 2012 ; Dao *et al.* 2014]. L'auteur a utilisé une version modifiée du modèle de Féret proposé dans [de Larrard, 1999] pour analyser ses résultats (équations (10.4) et (10.5)).

$$f_{cm} = k_g \cdot Rc_{28}^{ce} \cdot \left(\frac{v_c}{v_c + v_e + 0,5v_a} \right)^2 \cdot EMP^{-0,13} \quad (10.4)$$

avec

$$EMP = D_{\max} \sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \quad (10.5)$$

où

- k_g est un paramètre mécanique qui tient compte de l'influence du granulat, selon sa propre résistance et la qualité de sa liaison avec la pâte de ciment ;
- Rc_{28}^{ce} est la classe de résistance à la compression du ciment à 28 jours selon la norme NF EN 197-1 ;
- v_c , v_e , v_a sont respectivement les volumes de ciment, d'eau et d'air présents dans le mélange ;
- EMP est l'épaisseur maximale de pâte [de Larrard, 1999] ;
- D_{\max} est le diamètre correspondant à 90 % du passant du squelette granulaire ;

- $g = \sum_j V_j$ est la fraction volumique du squelette granulaire dans le mélange ;
- g^* est la compacité du squelette granulaire. Elle peut être calculée à l'aide du Modèle d'Empilement Compressible [de Larrard, 1999].

Pour les besoins de l'analyse, on suppose que le facteur k_g du squelette entier est calculé selon l'équation suivante, où $k_{g,j}$ est le paramètre mécanique de la fraction granulaire j :

$$k_g = \sum_j V_j k_{g,j} \quad (10.6)$$

Dans le cadre de l'étude de Dao, environ 100 mortiers et bétons différents ont été produits avec 100 % de GBR. Leur résistance à la compression a été mesurée sur cylindres $\emptyset 16 \times 32$ cm. Connaissant la composition des mélanges et à partir des résultats des mesures, Dao a calculé les paramètres $k_{g,s}$ et $k_{g,g}$ correspondant respectivement aux sables et gravillons des différents GBR, selon les équations précédentes. Il en a conclu que le paramètre $k_{g,s}$ des sables de GBR pouvait être approximé par une valeur constante de 4,42, et que le paramètre $k_{g,g}$ des gravillons de GBR pouvait être relié à leur coefficient d'attrition MDE (norme NF EN 1097-1) selon l'équation (10.7) :

$$k_{gg} = -0,0952 \text{ MDE} + 8,3927 \quad (10.7)$$

Avec ce modèle, il a pu prédire les valeurs expérimentales de résistance à la compression avec une erreur moyenne de 5 MPa pour les bétons de GBR composés à 100 % de GBR G2 ou de 100 % de GBR multi recyclés G3.

La même approche a été utilisée dans le cadre du Projet National RECYBETON, pour analyser différents bétons incorporant à divers taux des sables et des gravillons de GBR (voir Tableau 10.1). Les constituants utilisés sont ceux décrits en annexe de cet ouvrage. Les équations (10.4), (10.5) et (10.6) ont été utilisées pour calibrer les paramètres $k_{g,j}$ (voir Tableau 10.2), en cherchant le meilleur ajustement entre la résistance à la compression prévue et la résistance à la compression mesurée expérimentalement, comme confirmé Figure 10.3. Il convient de noter que l'équation (10.7) surestime le paramètre $k_{g,j}$ des gravillons puisqu'elle conduit à un paramètre $k_{g,j} = 6,2$ pour un MDE mesuré de 23.

Tableau 10.1

Composition des bétons RECYBETON [Sedran, 2013]

Mélange (kg/m ³)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Eau ajoutée	190	186	185	313	305	297	245	236	236	227	220
Eau efficace	180	176,2	175,6	206	199,9	194,1	189,2	181,9	183,3	183	178
CEMII/A-L 42,5 N	270	309	351	307	352	403	285	310	353	270	363
Fillers calcaires	45	53	61	47	51	54	32	54	53	45	38
Sable naturel 0/4	780	768	751	–	–	–	803	794	778	531	515
Gravillon naturel 4/10	266	262	257	–	–	–	–	–	–	171	165
Gravillon naturel 6/20	820	807	789	–	–	–	–	–	–	518	502
Sable de GBR 0/4	–	–	–	823	810	798	–	–	–	228	221
Gravillon de GBR 4/10	–	–	–	151	149	146	163	161	157	144	140
Gravillon de GBR 10/20	–	–	–	447	440	433	700	692	678	151	146
Retardateur	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Superplastifiant	1,35	2	2,3	1	1,23	2,1	1,5	2	2,29	1	1,6
Sable naturel (%)*	43	43	43	0	0	0	45	45	45	29,5	29,5
Gravillons naturels (%)*	57	57	57	0	0	0	0	0	0	36,3	36,3
Sable de GBR (%)*	0	0	0	60	60	60	0	0	0	15,7	15,7
Gravillons de GBR* (%)	0	0	0	40	40	40	55	55	55	18,5	18,5
Γ_m (%)	0	0	0	100	100	100	51,8	51,8	51,8	30	30
Γ_v (%)	0	0	0	100	100	100	55	55	55	33,2	33,2
F_{cm} (sur cylindre $\emptyset 16 \times 32$) à 28 jours	33,9	42	49,9	25,8	31,5	38,3	28,5	37,7	43	27,7	45,2
$F_{ctm,sp}$ (sur cylindre $\emptyset 16 \times 32$) à 28 jours	3,3	3,8	4,2	2,2	2,2	3,0	2,8	3,2	3,6	2,7	4,0

* Fraction volumique de l'ensemble du squelette granulaire, VFi voir équation 10.1.

Tableau 10.2Valeurs ajustées de $k_{g,j}$, en considérant que les granulats naturels ont la même valeur $k_{g,j}$ quelle que soit la coupure considérée

Granulat	$k_{g,j}$
Naturels (sable, gravillons 4/10 et 6/20)	5,767
GBR (sable)	4,42
GBR (4/10 et 10/20)	5,173

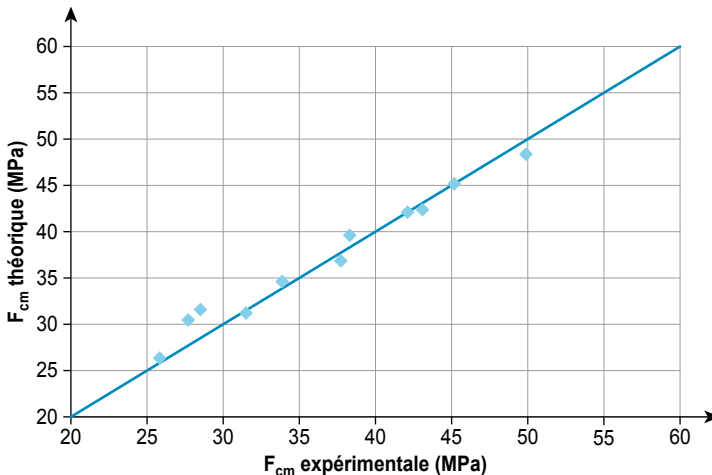
Ce modèle est intéressant car il sépare l'influence des granulats des autres paramètres (classe du ciment, rapport E_{eff}/C). De plus, en ajustant individuellement les paramètres $k_{g,j}$ des différentes coupures de granulats naturels et de GBR, il permet une caractérisation intrinsèque des GBR qui ne dépend pas du béton de référence auquel les bétons de GBR sont comparés. Dans le cas présent, la qualité des gravillons de GBR est inférieure à celle des gravillons naturels, puisque leur $k_{g,j}$ est inférieur. De même, le Tableau 10.2 confirme une tendance générale : pour un même volume de substitution, l'effet négatif des sables des GBR sur la résistance à la compression est plus important que celui des gravillons de GBR.

En supposant sur la Figure 10.2, que le béton de référence (qui n'incorpore que des granulats naturels), et que le béton à 100 % de GBR aient (presque) la même EMP, il est alors possible de définir des plages statistiques du rapport k_{g-GBR}/k_{g-GN} , où le premier terme représente un squelette entièrement recyclé et le second terme un squelette entièrement naturel. Les plages suivantes sont alors obtenues [0,46 ; 0,62], [0,62 ; 0,79] et [0,79 ; 1], pour les GBR de classe C, B et A respectivement.

À noter que, dans les cas où le granulat naturel serait de mauvaise qualité et que le GBR serait de bonne qualité, le GBR peut alors avoir une influence positive sur la résistance à la compression pour un même E_{eff}/C , comme indiqué dans ([Dao, 2012 ; Dao *et al.*, 2014]).

Figure 10.3

Comparaison entre les valeurs expérimentales et théoriques de la résistance à la compression pour les bétons du Tableau 10.1, avec les valeurs $k_{g,j}$ données dans le Tableau 10.2. Erreur moyenne = 1,07 MPa



10.2.2. Résistance à la traction par fendage

Dans la littérature, la résistance à la traction par fendage $f_{ctm,sp}$ du béton à base de granulats naturels est souvent déduite de f_{cm} via une loi de puissance (voir § 10.3.3). Par exemple, l'équation (10.8) a été proposée par [de Larrard, 1999]. Le paramètre k_t décrit le rôle du squelette granulaire global et dépend de la nature de ce squelette. Pour les besoins de l'analyse, on suppose que ce facteur k_t est calculé selon l'équation (10.9), où $k_{t,j}$ est le paramètre mécanique de la fraction granulaire j .

$$f_{ctm,sp} = k_t \cdot f_{cm}^{0,57} \quad (10.8)$$

avec

$$k_t = \sum_j V F_j k_{t,j} \quad (10.9)$$

Ce modèle a été testé sur les mélanges présentés dans le Tableau 10.1, où divers taux de recyclage des sables et gravillons ont été réalisés. Les équations (10.8) et (10.9) ont été utilisées pour étalonner les termes $k_{t,j}$ de granulats naturels et des GBR (voir Tableau 10.3), en ajustant le modèle aux résistances à la traction expérimentales mesurées. La très bonne qualité de la prédiction est illustrée Figure 10.4. Une autre validation a été faite sur la base des travaux de [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007] (voir Tableau 10.5 et Figure 10.5).

Concernant la résistance à la compression, l'ajustement des termes $k_{t,j}$ pour les granulats naturels et les GBR pris individuellement permet une caractérisation intrinsèque des GBR, qui ne dépend pas du béton de référence auquel le béton de GBR est comparé. Dans le cas présent, les gravillons de GBR sont de qualité inférieure au gravillons naturels car leur $k_{t,j}$ est inférieur.

Tableau 10.3

Valeurs ajustées de $k_{t,j}$ en supposant que tous les granulats naturels et que tous les GBR aient chacun la même valeur constante

Granulat	$k_{t,j}$
Granulats naturels (sable, 4/10 et 6/10)	0,453
GBR (4/10, 10/20)	0,364

Figure 10.4

Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de la résistance à la traction par fendage pour les mélanges du Tableau 10.1, avec les valeurs $k_{t,j}$ du Tableau 10.3. Erreur moyenne = 0,12 MPa

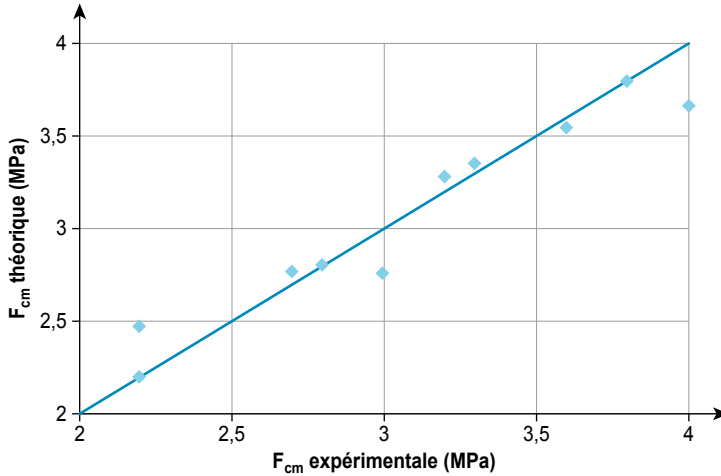
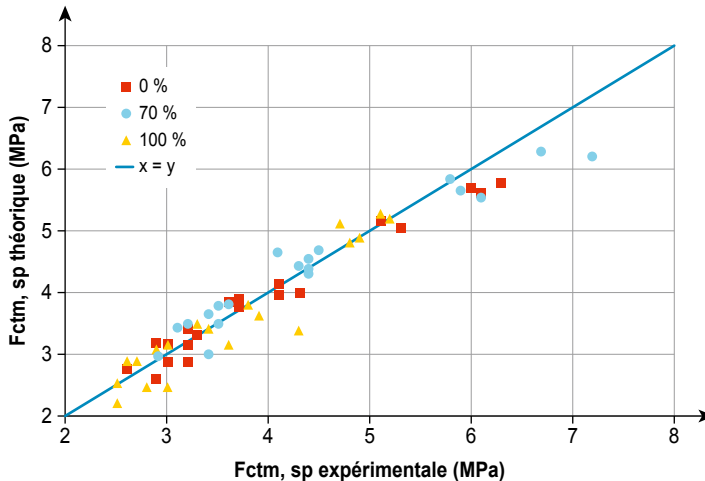


Figure 10.5

Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de la résistance à la traction par fendage tirée de [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007]. Erreur moyenne = 0,23 MPa. Dans la légende : Γ_v

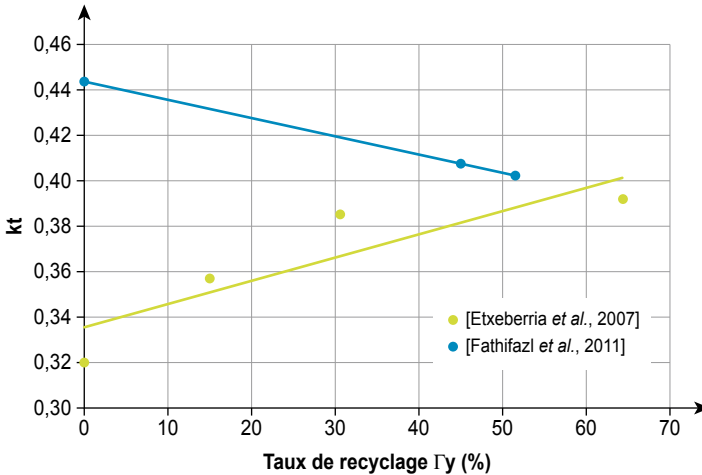


Dans [Silva *et al.*, 2015], les auteurs analysent 600 mélanges issus de plusieurs articles et ils concluent que le taux de recyclage n'a aucun effet sur la relation entre $f_{ctm,sp}$ et f_{cm} . [Khoshkenari *et al.*, 2014] arrivent à la même conclusion en étudiant 7 bétons à 3 âges différents, bétons contenant 100 % de gravillons de

GBR et jusqu'à 100 % de sable de GBR. La même conclusion est obtenue par [Sanchez de Juan et Aleajos, 2004] sur 24 bétons avec 0, 20, 50 ou 100 % de gravillons de GBR. Comme le montre la figure 10.6, d'autres études mettent en relief une influence positive ou négative significative sur la résistance à la traction (c'est-à-dire sur k_t). En fait, l'influence des GBR dépend de la qualité relative des granulats naturels auxquels ils sont comparés.

Figure 10.6

Valeurs de k_t global pour des bétons ayant différents taux de recyclage (seuls les gravillons sont des GBR), selon [Etxeberria *et al.*, 2007b] et [Fathifazl *et al.*, 2011].



Très généralement, les GBR sont utilisés localement pour éviter les coûts de transport, de sorte qu'ils résultent de bétons contenant des granulats naturels locaux. Ainsi, dans [Dao, 2012] et [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007], les auteurs comparent l'influence de la résistance à la traction des GBR avec celle des granulats naturels dont ils sont faits. Les valeurs de k_t calculées à partir de ces études sont résumées dans les Tableaux 10.4 et 10.5. Les résultats montrent que, contrairement aux attentes, les GBR n'héritent pas directement de la valeurs k_t des granulats naturels correspondant : leurs paramètre k_t sont inférieurs de 7 % et 13 % respectivement à ceux des granulats naturels parents, sans réelle corrélation. La même conclusion peut être observée Figure 10.6, avec les données de [Fathifazl *et al.*, 2011b], où les GBR proviennent également des granulats naturels avec lesquels ils sont comparés. De plus, Dao n'a pas pu mettre en relation les valeurs k_t qu'il a obtenues pour les GBR avec d'autres propriétés classiques des granulats naturels (LA, MDE, etc.). L'influence de la résistance à la compression du béton d'où proviennent les GBR n'est pas claire non plus (négative dans [Dao, 2012], positive dans [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007], pour une nature donnée de granulats naturels).

Il est difficile de conclure sur l'effet réel du taux de recyclage dans la relation entre f_{cm} et $f_{ctm,sp}$. Les valeurs k_t des GBR et des granulats naturels doivent donc être ajustées au cas par cas sur des données expérimentales si une optimisation précise de la formulation du béton est nécessaire. Pourtant, on peut noter que les GBR présentent généralement une valeur k_t inférieure (jusqu'à 13 %) à celle des granulats naturels dont ils sont faits. Enfin, un examen complet de tous les résultats disponibles montre le plus souvent un effet négatif du recyclage sur la relation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression (voir § 10.3.3).

Tableau 10.4

Coefficients de traction de [Dao, 2012], obtenus avec des GBR1 provenant d'un béton de résistance à la compression d'environ 45 MPa et des GBR2 provenant d'un béton de résistance à la compression d'environ 75 MPa

Nature du granulat naturel	$k_{t,GN}$	$k_{t,GBR1}$	$k_{t,GBR2}$	Moyenne $k_{t,GBR}/k_{t,GN}$
Sable et gravillons siliceux	0,435	0,44	0,417	0,985
Sable et gravillons calcaires	0,431	0,376	0,377	0,874
Sable siliceux et gravillons calcaires	0,471	0,446	0,433	0,933
			Moyenne	0,931

Tableau 10.5

Coefficients de traction selon [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007]

Nature du granulat naturel	kt			Moyenne $k_{t,GBR}/k_{t,GN}$	f_{cm} du béton source (MPa)	
	GN	GBR1	GBR2		GBR1	GBR2
Quartzite roulée	0,373	0,312	0,365	0,908	30	45
Granite concassé	0,423	0,371	0,389	0,898	60,5	73,1
Basalte concassé	0,445	0,345	0,382	0,817	72,4	110,1
			Moyenne	0,874		

10.2.3. Module d'élasticité

10.2.3.1. État de l'art

Les GBR contiennent des reliquats de pâte cimentaire, ce qui leur confère généralement un module d'élasticité inférieur à celui des granulats naturels. Par conséquent, les bétons de GBR ont eux aussi généralement un module

d'élasticité inférieur à celui des bétons de granulats naturels, tel que présenté au § 10.3.2.

Le modèle trisphère cité dans [de Larrard, 1999] s'est avéré efficace pour le calcul du module d'élasticité des bétons à base de granulats naturels, selon l'équation suivante :

$$E_{cm} = \left(1 + 2g \frac{E_g^2 - E_m^2}{(g - g^*)E_g^2 + 2(2 - g^*)E_g E_m + (g + g^*)E_m^2} \right) E_m \quad (10.10)$$

où

- $g = \sum_j V_j$ est le volume du squelette granulaire dans le béton ;
- g^* est la compacité du squelette granulaire. Elle peut être calculée avec le Modèle d'Empilement Compressible [de Larrard, 1999] ;
- E_m est le module d'élasticité de la pâte de ciment. Il peut être estimé à partir de la résistance à la compression du béton : $E_m = 226 \cdot R_c$;
- E_g est le module d'élasticité des granulats du squelette. Lorsque différentes sources de granulats sont utilisées dans le béton, le module général est calculé selon l'équation 10.11 où $E_{g,j}$ est le module d'élasticité de chaque différentes fractions j :

$$E_g = \sum_j V_j E_{g,j} \quad (10.11)$$

10.2.3.2. Résultats RECYBETON

Dans l'étude décrite au § 10.2.1. 2, [Dao, 2012] a utilisé ce modèle pour calibrer le module d'élasticité des sables et gravillons de GBR à partir de mortiers et de béton fabriqués uniquement avec des GBR. Les GBR ont été obtenus par concassage de béton de résistances à la compression variable et fabriqués avec différents granulats [Dao, 2012 ; Dao *et al.*, 2014]. L'auteur a constaté que les modules d'élasticité des sables et gravillons de GBR étaient assez proches (moins de 7 % de différence) et que la valeur moyenne E_{gGBR} peut être calculée à partir du module d'élasticité du béton source E_s et de celui du granulat source E_{gs} , selon l'équation (10.12) :

$$E_{gGBR} = 0,65E_s + 0,35E_{gs} \quad (10.12)$$

Les modules d'élasticité E_s et les E_{gs} ne sont généralement pas connus avec précision ; néanmoins, les granulats naturels locaux sont souvent identifiés, de même que le type de béton utilisé pour produire les GBR. Dans ce cas, l'équation (10.12) peut donner une estimation approximative du module d'élasticité E_{gGBR} . Les valeurs typiques de E_{gGBR} se situent entre 35 et 60 GPa, c'est-à-dire des valeurs inférieures à celles de la plupart des granulats naturels. Ce constat explique pourquoi le module d'élasticité des bétons de GBR diminue lorsque le taux de substitution augmente. L'autre raison est que l'introduction

de GBR peut aussi nécessiter d'augmenter le volume de pâte afin de maintenir l'ouvrabilité.

Une validation supplémentaire de ce modèle a été obtenue dans le cadre du Projet National RECYBETON, sur deux familles de béton ayant une résistance à la compression cible de 30 MPa et 40 MPa (Figure 10.9). Pour chaque famille, quatre taux de recyclage ont été sélectionnés. Les compositions des mélanges sont résumées dans l'annexe de cet ouvrage, et les résultats expérimentaux sont portés dans le Tableau 10.6. La Figure 10.7 confirme que les équations (10.10) et (10.11) peuvent prédire l'évolution du module d'élasticité avec le taux de recyclage, avec une erreur moyenne de 1,4 GPa, lorsque les modules d'élasticité des granulats naturels et des GBR sont calibrés.

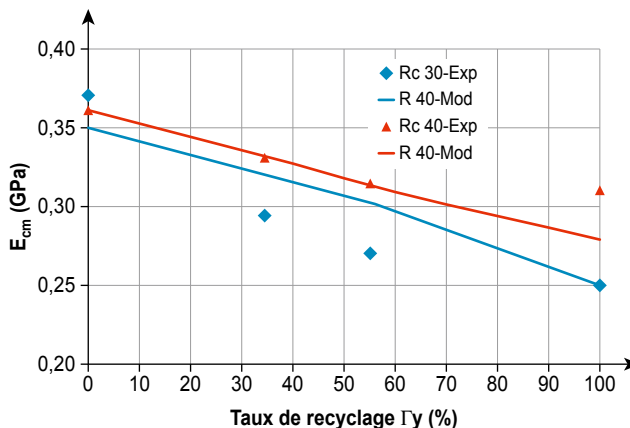
Tableau 10.6

Module d'élasticité des bétons de référence du Projet National RECYBETON. Les compositions sont données en annexe

Béton	C25/30 0S0G	C25/30 30S30G	C25/30 0S100G	C25/30 100S100G	C35/45 0S0G	C35/45 30S30G	C35/45 0S100G	C35/45 100S100G
E_{cm} (GPa)	37	29,5	27	25	36	33	31,5	31
Γ_v (%)	0	34,4	55	100	0	34,4	55	100
Γ_m (%)	0	30	52	100	0	30	52	100

Figure 10.7

Comparaison entre les valeurs expérimentales du module d'élasticité (voir Tableau 10.6) et valeurs calculées selon les équations (10.10) et (10.11). Les modules d'élasticité de granulats naturels et des GBR sont ajustés pour minimiser l'erreur. L'optimisation donne : $E_g = 49,5$ GPa pour les GBR, $E_g = 66,2$ GPa pour les granulats naturels, erreur moyenne = 1,4 GPa.



10.3. Propriétés mécaniques vs code de dimensionnement³

L'analyse des structures en béton armé nécessite le recours à des modèles réalistes de contrainte-déformation des matériaux pour pouvoir reproduire le comportement réel de la structure. Il est communément admis que le comportement monotone du béton soumis à une compression axiale peut être approximé par une courbe contrainte-déformation, telle que celle donnée dans l'Eurocode2 (EC2) [NF EN 1992-1-1, 2005] (voir Figure 10.8). De plus, l'évolution des propriétés mécaniques, f_{cm} et f_{ctm} , dépend de l'âge, t , du béton selon l'équation (10.13) :

$$\frac{P(t)}{P_{(28 \text{ jours})}} = \beta_{cc}(t); \beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (10.13)$$

$\frac{P(t)}{P_{(28 \text{ jours})}}$ est la propriété considérée normalisée, t l'âge exprimé en jours, et s un coefficient qui dépend du type de ciment. Pour un CEM II, $s = 0,2$. Pour le module sécant E_{cm} , l'EC2 recommande la relation $\frac{E_{cm}(t)}{E_{cm}} = \beta_{cc}^{0,3}(t)$.

La « validité » de l'EC2 [NF EN 1992-1-1, 2005, partie 3.1.5] a été vérifiée lorsque des GBR sont incorporés dans les bétons, afin de proposer, si nécessaire, des modifications sur la base des résultats expérimentaux spécifiques tirés de la présente étude et de ceux de la littérature. L'adéquation de chaque modèle est estimée par calcul de :

- la somme du carré des erreurs $SCE = \sum_{i=1}^n (\hat{P}_i - P_i)^2$, qui caractérise les écarts des valeurs expérimentales P_i par rapport aux valeurs prévues \hat{P}_i . Plus SCE est petite, plus les prédictions du modèle sont fiables ;
- la somme du carré des écarts des points expérimentaux par rapport à leur moyenne ($\bar{P} = P_{\text{moyen}}$) nommée $SCM = \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2$. Ce paramètre quantifie dans quelle mesure les points de données P_i varient autour de leur valeur moyenne \bar{P} . Ce terme est calculé pour normaliser SCE afin d'obtenir le coefficient $\rho = \frac{SCE}{SCM}$. Plus ce coefficient est proche de 0, plus les points expérimentaux s'approchent du modèle. Au contraire, plus le coefficient est

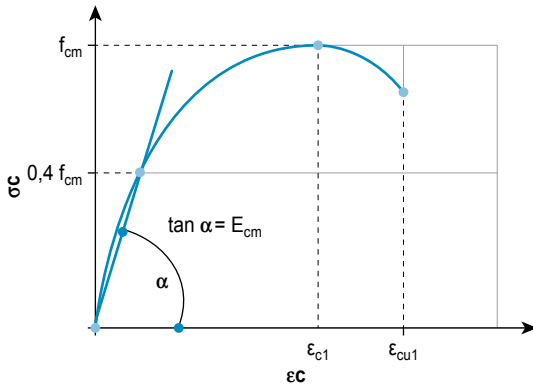
3. Les modèles proposés dans cette partie n'engagent pas le Projet National RECYBETON, ni les représentants français de la commission Eurocode, ni l'IFSTTAR dans les positions qu'ils pourront prendre vis-à-vis de la révision de l'Eurocode 2, pour la prise en compte de l'utilisation des granulats de béton recyclé.

élevé, plus les points expérimentaux autour de la courbe décrivant le modèle sont dispersés ;

- Le rapport $\xi = \frac{\bar{P}}{\bar{P}}$ est un autre paramètre utilisé pour estimer la différence entre la valeur moyenne expérimentale \bar{P} et la moyenne prédictive \bar{P} . Lorsque les paramètres du modèle sont obtenus en ajustant les valeurs expérimentales, SCE tend vers 0 et donc vers $\xi = 1$.

Figure 10.8

Courbe contrainte-déformation selon l'EC2



avec

$$E_{cm} = 22\,000 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,30}$$

$$\varepsilon_{c1} = 0,7(f_{cm})^{0,31}$$

$$\varepsilon_{cu1} = 3,5\% \text{ pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

dans le cas contraire

$$\varepsilon_{cu1} \% = 238 + 27 \left[\frac{(98 - f_{cm})}{100} \right]^4$$

et

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} k = 1,05 \frac{E_{cm}\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} \\ \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \end{cases}$$

10.3.1. Développement de la résistance à la compression en fonction du temps

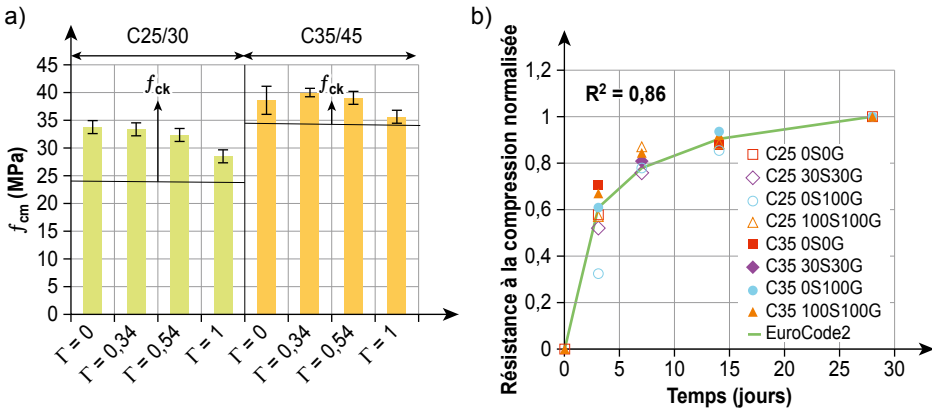
Dans une étude récente [Omary *et al.*, 2016], deux séries de bétons ont été étudiées (avec soit des granulats naturels seulement, soit des GBR à différents taux de substitution). L'évolution de la résistance moyenne à la compression avec l'âge est présentée Figure 10.9b, avec les prévisions de l'EC2 correspondantes proposées initialement pour le béton de granulats naturels et exprimée par l'équation (10.13), avec $\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}(28 \text{ jours})} = \beta_{cc}(t)$ et

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\}.$$

Les résultats obtenus révèlent que le développement de la résistance à la compression est indépendant du taux de substitution en GBR.

Figure 10.9

- a) Évolution de la résistance à la compression pour différents taux de substitution Γ_m ;
 b) Évolution de la résistance à la compression avec l'âge



10.3.2. Module d'élasticité

L'évaluation des modules d'élasticité dynamique et statique moyens, appelés E_d et E_{cm} respectivement, a été réalisée à des âges différents. On peut observer (Figure 10.10b) que l'équation (10.13), avec $\frac{P(t)}{P(28 \text{ jours})} = \frac{E_{cm}(t)}{E_{cm}(28 \text{ jours})}$, décrit

bien cette évolution, quelle que soit la classe de résistance à la compression, avec un facteur de détermination $R^2 = 0,97$. La variation du module d'élasticité est présentée Figure 10.10a où l'on voit qu'il diminue avec l'augmentation du taux de substitution pour la même classe de résistance à la compression. Des observations similaires sont rapportées dans la littérature et la réduction du module d'élasticité peut être attribuée au volume total de pâte de ciment, plus élevé dans les bétons de GBR [Xiao *et al.*, 2006a ; Omary *et al.*, 2016].

Plusieurs relations empiriques ont été développées dans la littérature afin de prédire le module d'élasticité à partir de la résistance moyenne à la compression [Ravindrarajah et Tam., 1985 ; NF EN 1992-1-1, 2005 ; Aslani et Nejadi, 2012 ; Wardeh *et al.*, 2015a]. La plupart d'entre elles concernent les bétons à base de granulats naturels, et elles s'expriment comme suit :

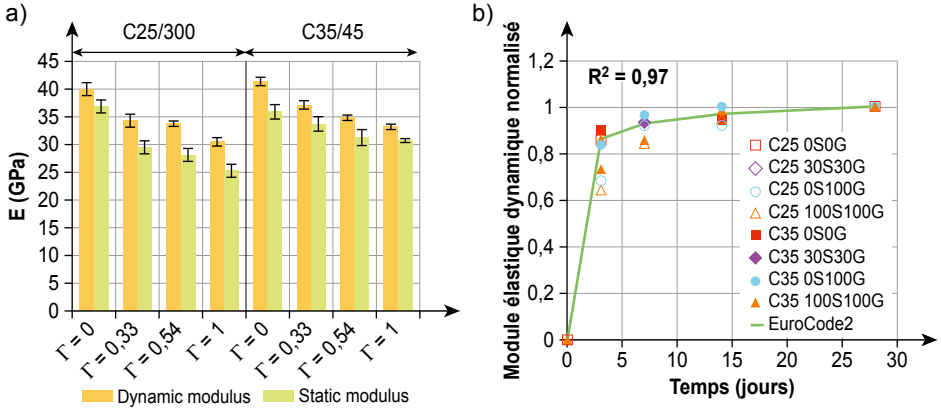
- dans l'EC2-1-1 (section 3.1.5) [NF EN 1992-1-1, 2005], le module sécant

E_{cm} est exprimé par la relation : $E_{cm}(\text{MPa}) = 22\,000 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$. Cependant, il

est recommandé de réduire la valeur obtenue de 10 % et 30 % pour les granulats calcaires et les granulats de grès respectivement, et d'augmenter la valeur de 20 % pour les granulats de basalte ;

Figure 10.10

a) Évolution du module d'élasticité, par classe de résistance à la compression, pour différents taux de substitution ; b) Évolution du module d'élasticité avec l'âge.



• le Code-Modèle CEB/FIB [CEB-FIP, 2010] fournit l'expression du module

tangent initial E_{ci} selon la relation : $E_{ci} \text{ (MPa)} = 21\,500\alpha_E \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{\frac{1}{3}}$ où α_E est un coefficient dépendant du type de granulats ($\alpha_E = 0,7$ pour le grès et $\alpha_E = 1,2$ pour le basalte). Le module tangent initial est égal approximativement au module dynamique, et il est conventionnellement applicable à des niveaux de contrainte très faibles.

Dans le dimensionnement des structures, le module le plus généralement utilisé est le module sécant E_{cm} , ou le module tangent E_c , avec $E_c = 1,05E_{cm}$ et

$$E_c = 0,85E_{ci} \text{ conduisant aux expressions suivantes } E_c \text{ (MPa)} = 18275\alpha_E \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ (CEB/FIB) ou } E_c \text{ (MPa)} = 23\,100\alpha_E \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \text{ (EC2).}$$

Dans la littérature, la nature des granulats n'est pas nécessairement mentionnée. Par conséquent, une valeur moyenne du paramètre α_E est adoptée pour le modèle CEB/FIB, à partir de la base de données disponible. La valeur ($\alpha_E)_{GN} = 1,126$ est retenue, indépendamment de l'origine des granulats naturels.

Tous les modèles empiriques établis pour estimer le module d'élasticité à partir de la résistance à la compression des bétons se présentent sous la forme $E_c = \xi f_{cm}^\beta$. Pour tous ces modèles, l'effet de la teneur en GBR n'a pas été pris en compte explicitement. Les équations les plus appropriées proposées dans la littérature sont résumées dans le Tableau 10.7. Leur validité a été vérifiée pour les bétons, en spécifiant le type de granulats incorporés (naturels ou GBR, avec différents taux de recyclage $0 \leq \Gamma_v \leq 1$) en utilisant une base de données

de 360 valeurs issue du présent travail et de 81 valeurs tirées de la littérature incluant des bétons de GBR [Cedolin *et al.*, 1983 ; Baalbaki *et al.*, 1991 ; Bairagi *et al.*, 1993 ; Shen *et al.*, 1995 ; de-Oliveira *et al.*, 1996 ; Kim et Kim, 1996 ; Wee *et al.*, 1996 ; Shannag, 2000 ; Dong et Keru, 2001 ; Wu *et al.*, 2001 ; Gomez-Soberon, 2002a ; Assié, 2004 ; Karihaloo *et al.*, 2006 ; Etxeberria *et al.*, 2007a ; Evangelista et Brito, 2007b ; Gesoğlu et Ozbay, 2007 ; Casuccio *et al.*, 2008 ; Zhao *et al.*, 2008 ; Domingo-Cabo *et al.*, 2009 ; Fares, 2009 ; Fathifazl *et al.*, 2009b ; Shen *et al.*, 2009 ; Cabral *et al.*, 2010 ; Malesev *et al.*, 2010 ; Belén *et al.*, 2011 ; Kumar *et al.*, 2011 ; Mohamed, 2011 ; Martínez-Lage *et al.*, 2012 ; Ignjatovic *et al.*, 2013 ; Manzi *et al.*, 2013 ; Wardeh et Ghorbel, 2015 ; Folino et Wargay, 2014 ; Kang *et al.*, 2014 ; Wardeh *et al.*, 2015a].

Tableau 10.7

Modèles de module d'élasticité pour le béton

Équation n°	Équations	Tout type de granulats $0 \leq \Gamma_v \leq 1$	Granulats naturels	GBR $0 \leq \Gamma_v \leq 1$
(10.14) [NF EN 1992-1-1, 2005]	$E_c = 23\,100 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$	$\rho = 0,41$ $\xi = 1,1$	$\rho = 0,41$ $\xi = 1,1$	$\rho = 1,48$ $\xi = 1,2$
(10.15) [CEB-FIB, 2010]	$E_c = 20\,578 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{\frac{1}{3}}$	$\rho = 0,29$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,32$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,75$ $\xi = 1,2$
(10.16) [Wardeh <i>et al.</i> , 2015]	$E_c = 17\,553 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,42}$	$\rho = 0,23$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,26$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,43$ $\xi = 1,2$

Il apparaît que :

- pour tous les modèles, la capacité de prédire le module d'élasticité à l'aide de la résistance à la compression diminue lorsque des GBR sont incorporés au béton ;
- le modèle de l'EC2 (équation (10.14)) est le moins prédictif parmi les trois modèles, surtout lorsque des GBR sont incorporés ($0 \leq \Gamma_v \leq 1$) ;
- le modèle proposé par [Wardeh *et al.*, 2015], équation (10.16), apparaît être le plus approprié, quel que soit le type de granulats.

Dans le modèle du CEB/FIB [CEB-FIP, 1990] exprimé par

$$E_c (\text{MPa}) = 18\,275 \alpha_E \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{\frac{1}{3}},$$

une valeur moyenne du paramètre α_E est calculée,

en utilisant la base de données disponible, pour $\Gamma_v = 1$. Il apparaît que α_E diminue quand le béton est élaboré avec des GBR : sa valeur est $(\alpha_E)_{GN} = 1,126$ quand seuls des granulats naturels sont utilisés, et $(\alpha_E)_{GBR} = 0,998$ quand 100 % de GBR sont incorporés au béton, quelle que soit l'origine des GBR.

Pour améliorer la prévision du module d'élasticité des bétons incorporant des GBR, on propose alors de modifier les expressions comme suit :

$$E_c = \xi(1 - \alpha_{Ec} \Gamma_m) \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^\beta$$

La valeur de α_{Ec} est obtenue en minimisant les résidus

entre le module d'élasticité expérimental et le module d'élasticité prédit des bétons, quelle que soit l'origine des granulats. Le Tableau 10.8 résume les résultats obtenus. On peut observer que :

- la modification du modèle de l'EC2 (équation (10.17)) améliore la prévision du module d'élasticité des bétons incorporant des GBR ;
- l'équation (10.18) décrit le modèle modifié du CEB/FIB. On remarquera que la modification améliore bien les prédictions ;
- l'équation (10.19) proposée dans [Omary *et al.*, 2016] fournit la meilleure prédiction du module d'élasticité du béton de GBR.

Tableau 10.8

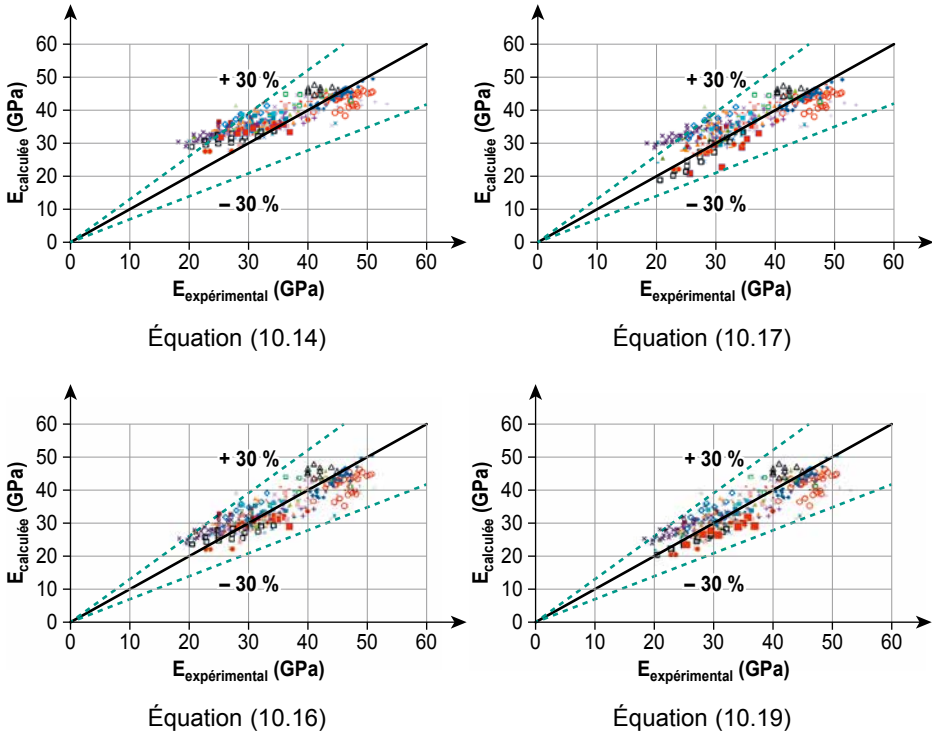
Modèles du module d'élasticité modifié pour le béton

Équation n°	Équations modifiées	α_{Ec}	Granulats naturels	GBR $0 \leq \Gamma_v \leq 1$
(10.17)	$E_c = 23\,100(1 - \alpha_{Ec} \Gamma_m) \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,30}$	0,328	$\rho = 0,34$ $\xi = 1,1$	$\rho = 0,55$ $\xi = 1,0$
(10.18)	$E_c = 20\,578(1 - \alpha_{Ec} \Gamma_m) \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{\frac{1}{3}}$	0,179	$\rho = 0,26$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,42$ $\xi = 1,0$
(10.19)	$E_c = 17\,553(1 - \alpha_{Ec} \Gamma_m) \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,42}$	0,131	$\rho = 0,23$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,37$ $\xi = 1,2$

Le modèle de l'EC2 et le modèle de [Wardeh *et al.*, 2015], donnés dans les Tableaux 10.7 et 10.8 sont illustrés par les Figures 10.11 pour les bétons élaborés, tous types de granulats confondus. On en déduit que l'équation (10.19) est la plus appropriée pour prédire le module d'élasticité.

Figure 10.11

Comparaison des résultats expérimentaux versus les valeurs calculées pour le module d'élasticité



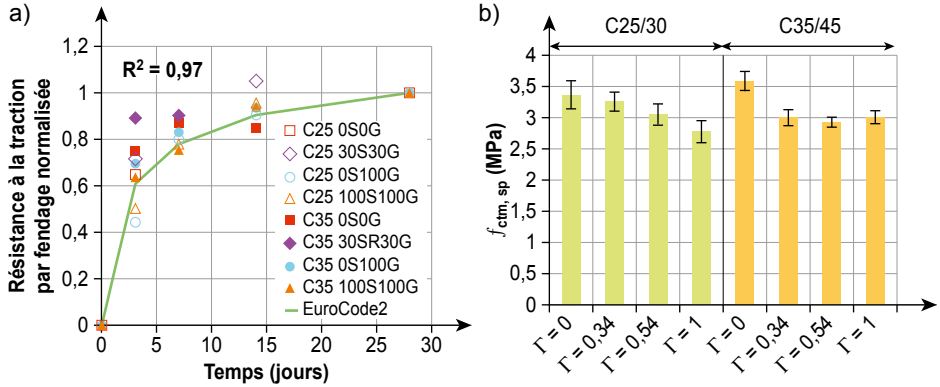
10.3.3. Prédiction de la résistance à la traction par fendage

L'effet du recyclage sur la résistance à la traction par fendage a été discuté ci-dessus (voir § 10.2.2). Examinons le développement de la résistance à la traction caractérisé dans une étude particulière [Omary *et al.*, 2016]. La résistance à la traction moyenne, $f_{\text{ctm,sp}}$, pour chaque béton étudié, a été mesurée sur cinq éprouvettes $\varnothing 11 \times 22$ cm jusqu'à 28 jours d'âge. L'évolution de la résistance à la traction avec l'âge est bien décrite par l'EC2 (section 1.3.1).

En effet, la figure 10.12a montre que l'équation (10.13), avec $\frac{P_{(t)}}{P(28 \text{ jours})} = \frac{f_{\text{ctm,sp}}(t)}{f_{\text{ctm,sp}}(28 \text{ jours})}$, suit bien les résultats expérimentaux, avec une corrélation acceptable.

Figure 10.12

a) Évolution de la résistance à la traction par fendage avec l'âge ; b) Évolution de la résistance à la traction par fendage selon la classe de résistance à la compression, pour différents taux de substitution (données issue de [Omary *et al.*, 2016]).



Plusieurs auteurs ont cherché à corréliser la résistance à la traction par fendage à la résistance à la compression [NF EN 1992-1-1, 2005 ; Aslani et Nejadi, 2012 ; Kou *et al.*, 2013 ; de Larrard, 1999, Omary *et al.*, 2016]. Tous les modèles proposés peuvent être écrits sous la forme $f_{ctm,sp} = \eta_1(f_{cm})^{\eta_2}$, à l'exception de celui de l'EC2 (équation (10.20)) qui prend en compte la résistance à la compression caractéristique f_{ck} et non la résistance à la compression moyenne, f_{cm} . L'applicabilité des relations récapitulées dans le Tableau 10.9 pour tous les types de béton a été évaluée en utilisant les mélanges du présent travail, plus 167 valeurs expérimentales de la littérature réparties en 67 bétons de granulats naturels et 100 bétons de GBR [Casuccia *et al.*, 2008 ; Evangelista *et al.*, 2007 ; Belén *et al.*, 2011 ; Gomez-Soberon, 2002 ; Malesev *et al.*, 2010 ; Kou et Poon, 2013 ; Etxeberia *et al.*, 2007b ; Bairagi *et al.*, 1993 ; Kameche *et al.*, 2012 ; Kim et Kim, 1996 ; Breccolotti *et al.*, 2015 ; Butler *et al.*, 2011].

Les résultats le montrent que :

- aucun des modèles empiriques proposés ne permet de prédire de façon adéquate la résistance à la traction par fendage des bétons contenant des GBR ;
- l'équation (10.22) permet la mieux de prévoir la résistance à la traction par fendage, quels que soient le type et la nature des granulats.

Pour tenir compte des effets de l'incorporation des GBR, ces expressions ont été modifiées par l'introduction d'un coefficient $(1 - \alpha_{fctm} \Gamma_m)$. Le paramètre α_{fctm} est obtenu en minimisant les résidus entre les résistances à la traction expérimentales et les résistances à la traction prévues pour les bétons, quels que soient le type et l'origine des granulats, tout en conservant pour les

paramètres η_1 et η_2 les valeurs calculées précédemment. Les paramètres ρ et ξ sont donnés dans le Tableau 10.10. On peut constater que :

- cette modification améliore les valeurs de résistance à la traction prévues ;
- l'incorporation de GBR entraîne une diminution de la résistance à la traction par fendage, même si la résistance moyenne à la compression est constante. De plus, cette diminution est significative pour les taux de remplacement, Γ_v , supérieurs à 33 % ;
- l'équation (10.25), déduite de l'équation (10.22) établie par [Omary *et al.*, 2016] est la plus adaptée à la prédiction de la résistance à la traction des bétons incorporant des GBR. La comparaison entre les données expérimentales et les modèles de l'EC2 et de [Omary *et al.*, 2016], résumés dans les Tableaux 10.9 et 10.10, est illustrée Figure 10.13.

Tableau 10.9

Modèles de résistance à la traction par fendage pour les bétons

Équation n°	Équations	Béton à base de		
		Granulats naturels $0 \leq \Gamma_v \leq 1$	GBR $0 \leq \Gamma_v \leq 1$	Granulats naturels + GBR $0 \leq \Gamma_v \leq 1$
(10.20) [NF EN 1992-1-1, 2005]	$f_{ctm,sp} = 0,33(f_{ck})^{\frac{2}{3}}$ $f_{ck} \text{ (MPa)} = f_{cm} - 8$	$\rho = 0,37$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,31$ $\xi = 1,1$	$\rho = 0,60$ $\xi = 1,1$
(10.21) [de Larrard, 1999]	$f_{ctm,sp} = 0,453(f_m)^{0,57}$	$\rho = 0,41$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,26$ $\xi = 1,2$	$\rho = 0,76$ $\xi = 1,2$
(10.22) [Omary <i>et al.</i> , 2016]	$f_{ctm,sp} = 0,364(f_m)^{0,608}$	$\rho = 0,26$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,20$ $\xi = 1,1$	$\rho = 0,43$ $\xi = 1,1$

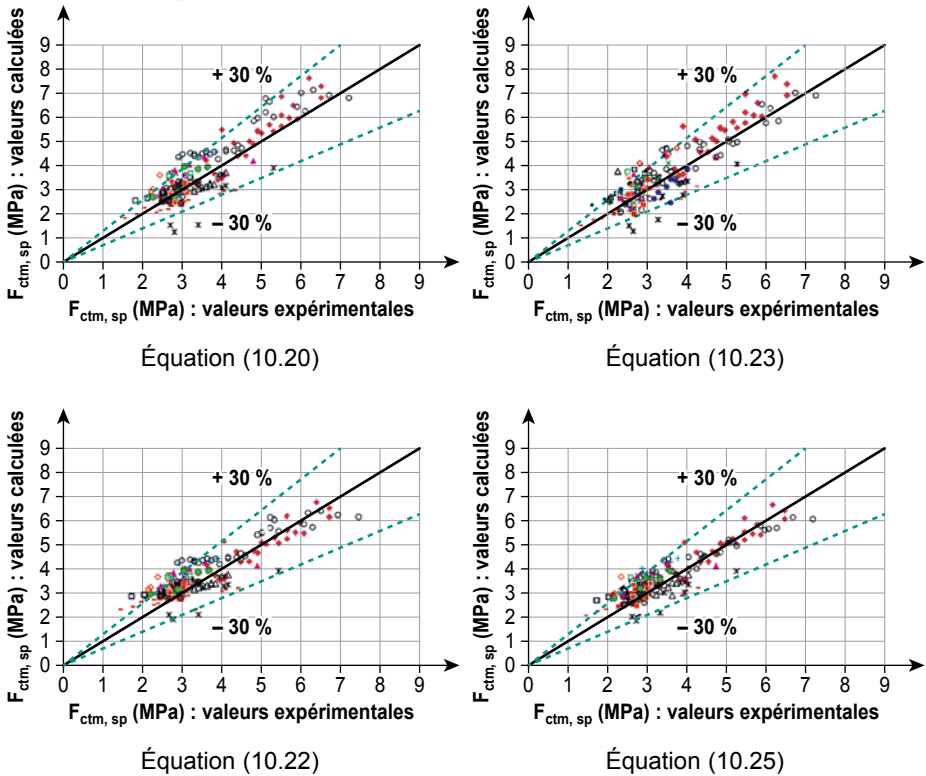
Tableau 10.10

Modèles de résistance à la traction pour les bétons de GBR

Équation n°	Équations modifiées	α_{fctm}	GBR	Tous types de granulats
			$0 \leq \Gamma_v \leq 1$	$0 \leq \Gamma_v \leq 1$
(10.23)	$f_{ctm,sp} = 0,33(1 - \alpha_{fctm} \Gamma_m)(f_{cm} - 8)^{2/3}$	0,282	$\rho = 0,32$ $\xi = 0,9$	$\rho = 0,47$ $\xi = 1,0$
(10.24)	$f_{ctm,sp} = 0,453(1 - \alpha_{fctm} \Gamma_m)(f_{cm})^{0,57}$	0,221	$\rho = 0,24$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,31$ $\xi = 1,1$
(10.25)	$f_{ctm,sp} = 0,364(1 - \alpha_{fctm} \Gamma_m)(f_{cm})^{0,608}$	0,142	$\rho = 0,20$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,28$ $\xi = 1,0$

Figure 10.13

Résistance à la traction expérimentale et prévue des bétons, quel que soit le type de granulats



10.3.4. Prédiction des déformations au pic et ultime

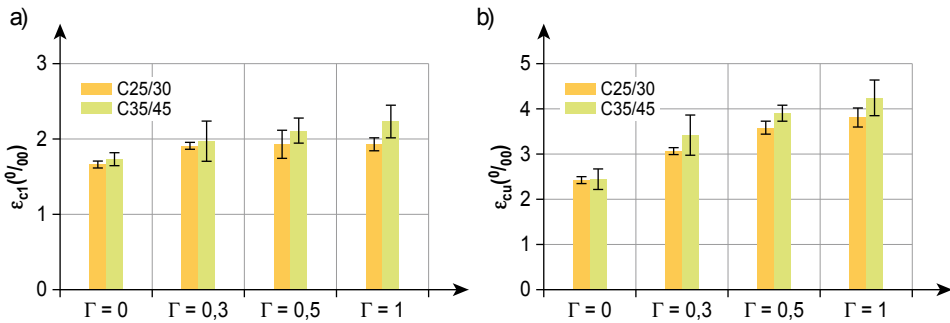
La déformation au pic, ϵ_{c1} , est la déformation qui correspond à la résistance maximale à la compression. Les résultats obtenus pour deux séries de bétons, illustrés Figure 10.14a, montrent que lorsque la teneur en GBR augmente, la déformation au pic augmente également. Ces résultats sont conformes à ceux que l'on trouve dans la littérature [Wardeh *et al.*, 2015a ; Xiao *et al.*, 2006a ; Belén *et al.*, 2011 ; Breccolotti *et al.*, 2015 ; Martínez-Lage *et al.*, 2012 ; Folino et Xargay, 2014 ; Wee *et al.*, 1996 ; Kumar *et al.*, 2011 ; Carreira et Chu, 1985 ; Anis *et al.*, 1990 ; Dhonde *et al.*, 2007]. L'augmentation de la déformation au pic avec le taux de substitution est due à l'incorporation des GBR, indépendamment du volume de la pâte, qui augmente dans cette étude au fur et à mesure que le taux de substitution augmente pour une même classe de résistance. En outre, plus la classe de résistance est élevée, plus ϵ_{c1} est élevé. Ces résultats sont également conformes à ceux de la littérature. En effet, [Wee

et al., 1996] ont montré que la déformation au pic augmente lorsque la classe de résistance à la compression augmente, mais diminue lorsque le volume de pâte augmente, pour la même classe de résistance à la compression. De plus, les recherches où les GBR ont été introduits en maintenant le volume de pâte constant font état d'une augmentation de ε_{c1} [Belén *et al.*, 2011 ; Breccolotti *et al.*, 2015].

La déformation ultime, ε_{cu} , est déterminée dans la branche descendante et correspond à la déformation obtenue pour une contrainte égale à $0,6 \times f_{cm}$. Les résultats sont présentés Figure 10.14b où l'on peut voir que la valeur de cette déformation augmente lorsque le taux de substitution augmente.

Figure 10.14

a) Déformation maximale pour différents taux de substitution (G_m) ; b) Déformation ultime pour différents taux de substitution (G_m). Données tirées de [Omary *et al.*, 2016]



Pour la prédiction de la déformation au pic, les relations initialement proposées pour les bétons à base de granulats naturels [NF EN 1992-1-1, 2005 ; Wardeh *et al.*, 2015 ; Fouré, 1996] ont été utilisées et leur fiabilité pour estimer les valeurs expérimentales a été évaluée (Tableau 10.11).

L'expression proposée par l'EC2 est celle de l'équation (10.26) tandis que celle établie par [Wardeh *et al.*, 2015a] est donnée par l'équation (10.27).

L'expression donnée par [Fouré, 1996] dépend de la résistance moyenne à la compression f_{cm} et du module E_{ci} (voir chapitre 19). Dans ce chapitre, il est précisé que toutes les caractéristiques mécaniques sont reliées à f_{cm} . Les effets

de E_{ci} sont alors introduits au moyen du paramètre $k_0 = \frac{E_{ci}}{f_{cm}^{1/3}}$ calculé à l'aide de l'équation (10.15). Ici, une valeur moyenne de $k_0 = 11\,237$ est adoptée, et le modèle proposé est donné par l'équation (10.28).

Les résultats, présentés Tableau 10.11 et Figure 10.15, montrent que :

- la relation de l'EC2 (équation (10.26)) ne permet pas prédire de façon adéquate la déformation maximale des bétons indépendamment du type de granulats ;

- l'incorporation de GBR augmente la dispersion entre les valeurs estimées et les valeurs expérimentales, quel que soit le modèle utilisé ;
- l'introduction d'un coefficient de la forme $(1 - \alpha_m \Gamma_m)$ n'a pas permis d'améliorer la prévision de la déformation au pic pour tous les modèles étudiés ;
- le modèle le plus pertinent pour estimer la déformation au pic est donné par la relation (10.27) (voir Figure 10.15).

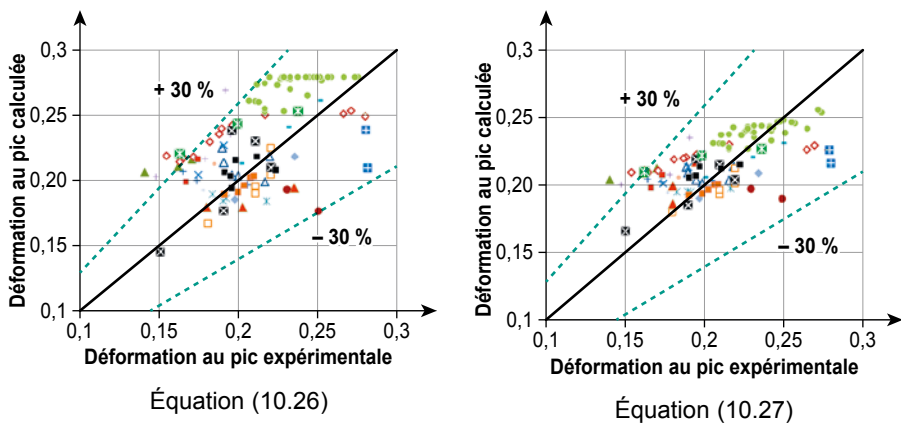
Tableau 10.11

Relations pour la déformation au pic des bétons

Équation n°	Équations	Tout type de granulats $0 \leq \Gamma_v \leq 1$	Granulats naturels	GBR $0 \leq \Gamma_v \leq 1$
(10.26) [NF EN 1992-1-1, 2005]	$\varepsilon_{c1} = 0,7(f_{cm})^{0,31} \leq 2,8$	$\rho = 1,26$ $\xi = 1,1$	$\rho = 1,48$ $\xi = 1,1$	$\rho = 1,11$ $\xi = 1,1$
(10.27) [Wardah <i>et al</i> , 2015]	$\varepsilon_{c1} = 1,1(f_{cm})^{0,175}$	$\rho = 0,64$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,45$ $\xi = 1,0$	$\rho = 0,94$ $\xi = 1,0$
(10.28) [Fouré, 1996]	$\varepsilon_{c1} = \left(\frac{k}{k_0}\right) f_{cm}^{2/3}$ où $k_0 = 11237$ et $k_1 = 1 + \frac{0,16k_0}{f_{cm}^2 + 800}$	$\rho = 0,99$ $\xi = 0,9$	$\rho = 0,81$ $\xi = 0,9$	$\rho = 1,26$ $\xi = 0,9$

Figure 10.15

Déformation au pic pour différents taux de substitution, valeurs calculées pour les bétons, comparées aux valeurs expérimentales, quel que soit le type de granulat



Il a été établi que la déformation ultime, ε_{cu} , déterminée sur la branche descendante comme étant la déformation obtenue pour une contrainte égale à $0,6f_{cm}$, augmente lorsque le taux de substitution augmente. Une expression empirique est proposée pour calculer la déformation ultime, qui reproduit bien les résultats expérimentaux :

$$\varepsilon_{cu} = \left(0,00298 - 0,0625 \left\langle \frac{50 - f_{cm}}{100} \right\rangle^4 \right) (1 + 0,2\Gamma_m) \text{ pour } f_{ck} \leq 0,50 \text{ (MPa)} \quad (10.29)$$

D'autres données seraient nécessaires pour confirmer la validité de cette relation.

10.3.5. Relations contrainte-déformation sous compression uniaxiale

De nombreux auteurs et les normes de dimensionnement ont proposé une forme analytique simple pour décrire l'intégralité de la courbe contrainte-déformation des bétons de granulats naturels.

Dans la présente étude, les expressions analytiques initialement proposées par l'EC2 [NF EN 1992-1-1, 2005], par [Carreira et Shu, 1985], et par Popovics dans [Fouré, 1996] pour les bétons de granulats naturels ont été modifiées et étendues aux bétons de GBR. Les expressions sont données dans le Tableau 10.12.

Tableau 10.12

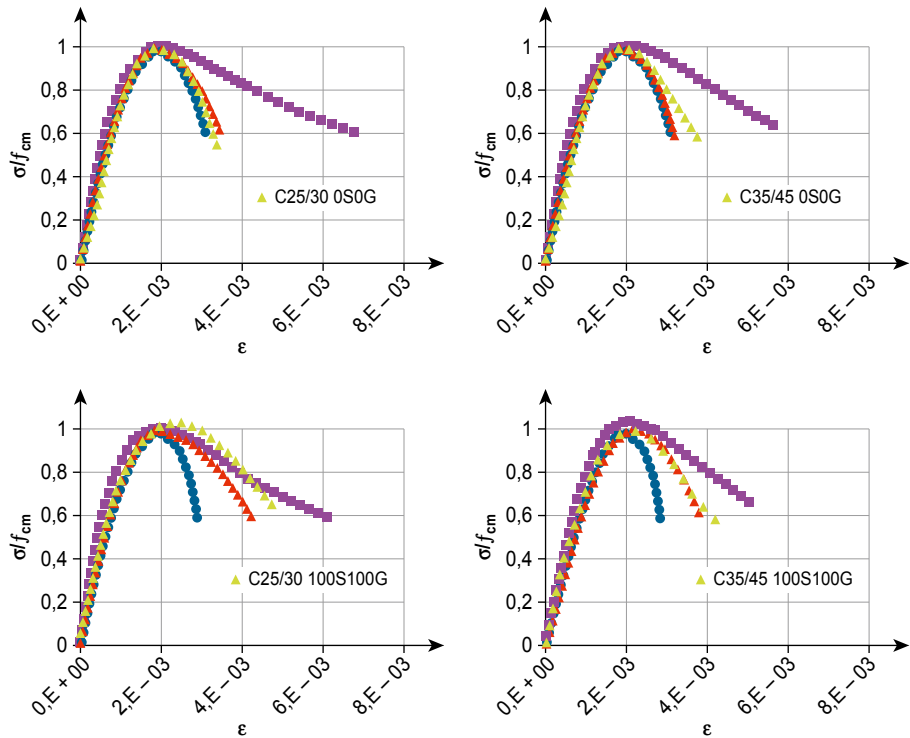
Modèles contrainte-déformation

Origine du modèle	Modèle modifié	Paramètres	Équation
EC2 [NF EN 1992-1-1, 2005]	$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}$	$k = \frac{E_c \varepsilon_{c1}}{f_{cm}}, \eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}$ avec E_c éq (10.19) et ε_{c1} éq (10.27)	(10.30)
[Carreira et Shu, 1985]	$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \frac{\beta \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right)^\beta}$	$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_{cm}}{E_{ci} \varepsilon_{c1}}}$ avec $E_{ci} = \frac{E_c}{0,85}$ et E_c éq (10.19) et ε_{c1} éq (10.27)	(10.31)
Popovics [Fouré, 1996]	$y = \frac{kx + (k' - 1)x^2}{1 + (k - 2)x + k'x^2}$ où $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \text{ et } y = \frac{\sigma}{f_{cm}}$	$k' = 3,33 - 2,33 \frac{2X - 1}{X^2} - \frac{k}{X}$ où $X = 1 + \frac{20}{f_{cm}}$ $\varepsilon_{c1} = \left(\frac{k}{k_0} \right) f_{cm}^{2/3}$	(10.32)

Sur la Figure 10.16, une comparaison entre les courbes « contrainte-déformation » expérimentales et prédites à l'aide des trois modèles est présentée pour tous les bétons étudiés par [Omary *et al.*, 2016]. Il apparaît clairement que les équations (10.30), (10.31) et (10.32) prédisent plutôt fidèlement le comportement en compression des bétons jusqu'au pic, quel que soit le type de granulats. De plus, il apparaît que le modèle de l'équation (10.31) surestime les déformations dans la branche descendante, et conduit à une ductilité élevée, alors que l'équation (10.30) les sous-estime plutôt. L'équation (10.32) est la plus appropriée pour prédire le comportement complet en compression, jusqu'à la rupture, pour tous les types de bétons en fonction de la classe de résistance et du type de granulat. Cependant, ce résultat est logique puisque cette équation a été ajustée sur les données sources. Davantage de données seraient donc nécessaires pour établir une équation générale qui pourrait être utilisée pour le dimensionnement de n'importe quel béton de GBR.

Figure 10.16

Comparaison des modèles contrainte-déformation (équation (10.30), équation (10.31), équation (10.32)) et résultats expérimentaux ()



10.4. Conclusions et besoins de recherche

Dans le présent chapitre, les propriétés mécaniques expérimentales des bétons de GBR sont présentées et discutées. Par ailleurs, une vaste base de données regroupant de nombreux résultats expérimentaux de la littérature et les résultats de la présente recherche a été constituée.

À partir de ces données, la première partie du chapitre propose trois jeux d'équations pour prédire les propriétés mécaniques des bétons de GBR à partir de la composition du béton. Il s'agit des équations :

- (10.4), (10.5) et (10.6), pour la résistance à la compression ;
- (10.8) et (10.9), pour la résistance à la traction ;
- (10.10) et (10.11), pour le module d'élasticité.

Pour pouvoir utiliser ces équations, trois paramètres, $k_{g,j}$, $k_{t,j}$ et $E_{g,j}$ doivent être calibrés pour les sables et gravillons, en mesurant respectivement la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage et le module d'élasticité, sur mortiers et bétons, y compris à base de GBR.

L'intérêt principal de cette approche est que la détermination de ces paramètres $k_{g,j}$, $k_{t,j}$ et $E_{g,j}$ donne une caractérisation intrinsèque des GBR, indépendamment du béton de référence à base des granulats naturels auxquels ils sont comparés, et aussi d'autres paramètres de la formulation tel le rapport eau/ciment. Il est alors possible d'évaluer précisément l'influence des GBR sur les propriétés mécaniques, quel que soit le rapport eau/ciment, la nature du granulat naturel et le taux de recyclage des sables et gravillons.

Pourtant, même si cette approche est séduisante, elle peut être lourde à mettre en œuvre. Il serait donc intéressant de trouver une évaluation directe de ces paramètres. Par exemple, il pourrait être intéressant de confirmer plus largement la pertinence de l'équation (10.7), proposée dans [Dao *et al.*, 2014], pour prédire $k_{g,j}$ à partir de la résistance à l'attrition (MDE) du GBR. Malheureusement, il n'a pas été possible de trouver dans la littérature technique toutes les données nécessaires pour tester et amender le cas échéant ce modèle.

Comme dit précédemment, en plus des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude, des données tirées de la littérature ont été utilisées. Cet ensemble de données a permis d'élaborer des équations qui pourront être utilisées au stade de la conception. Les résultats les plus importants sont :

- pour la même classe de résistance à la compression, l'introduction de GBR induit une diminution du module d'élasticité. Ce fait est dû à deux phénomènes qui agissent simultanément : le module élastique des GBR, qui est plus faible que celui des granulats naturels, et le plus grand volume de pâte des bétons de GBR, nécessaire pour maintenir le même affaissement et la même classe de résistance que le béton de référence ;
- pour la même classe de résistance à la compression, l'introduction des GBR induit le plus souvent une diminution de la résistance à la traction.

L'ampleur de cette diminution dépend de la qualité des GBR et elle peut être la même que celle observée pour des bétons élaborés avec des granulats naturels de mauvaise qualité ;

- les déformations maximale (au pic) et ultime des bétons de GBR sont plus importantes que celles des bétons de granulats naturels. Elles augmentent avec l'augmentation de la teneur en GBR ;
- la pente de la branche post-pic augmente pour les deux séries de bétons C25/30 et C35/45 lorsque le taux de substitution augmente ;
- les relations des codes de calcul dédiées à l'évaluation des propriétés mécaniques des bétons de granulats naturels ne sont pas satisfaisantes pour prédire le comportement des bétons de GBR. Tous les modèles proposés pour prédire la résistance moyenne à la traction par fendage $f_{ctm,sp}$, le module d'élasticité moyen E_{cm} , et la déformation ultime e_{cu1} sont phénoménologiques et dépendent de la résistance moyenne à la compression, f_{cm} , ainsi que d'un terme $(1 - \alpha \Gamma_m)$, où Γ_m est le taux massique de GBR (voir les équations (10.25), (10.19), et (10.29), respectivement). De plus, l'évolution de ces caractéristiques mécaniques dépend de l'âge, t , du béton, selon le modèle de l'EC2 ;
- la comparaison entre les courbes expérimentales contrainte-déformation obtenues dans le cadre de ce travail et certains modèles modifiés montre que les équations (10.31) et (10.32) décrivent de manière satisfaisante la branche descendante jusqu'à la ruine. Cependant, il faut noter que le modèle donné par l'équation (10.31) surestime les déformations, tandis que celui décrit par l'équation (10.32) sous-estime le comportement post-pic.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le projet ANR ECOREB pour son soutien pour les travaux exposés dans le paragraphe 10.3.

Chapitre 11.

Propriétés mécaniques différées

F. Grondin¹, C. de Sa², T. Sedran³, F. Cassagnabère⁴,
F. Benboudjema², A. Z. Bendimerad¹, M. Guo¹, A. Loukili¹,
P. Nicot⁴, E. Rozière¹, B. Fouré⁵

Résumé – Les déformations différées du béton sont réputées induire un risque important de fissuration et de déformation des ouvrages. Les déformations différées sont principalement le retrait et le fluage. Dans le cadre du Projet National RECYBETON, des essais dédiés ont été effectués sur béton pour deux taux de substitution des granulats naturels par des granulats de béton recyclé (GBR) (30 % et 100 %). Les résultats obtenus, complétés par ceux de la littérature, montrent que le retrait et le fluage sont généralement plus importants lorsque des GBR sont incorporés au béton, en raison de la présence d'un plus grand volume de pâte de ciment. Des différences dans la microfissuration de peau ont été observées très localement, mais les essais de fluage en flexion trois points montrent que les comportements sont similaires entre les différents bétons. Il est donc difficile de distinguer le béton naturel du béton de GBR à l'échelle macroscopique. Deux types de modélisation ont été développés pour décrire les mécanismes associés au retrait et au fluage. Pour le retrait, la modélisation a été menée à l'échelle macroscopique sur matériau homogène ; elle montre que les dommages les plus sévères apparaissent au niveau de la peau des bétons soumis à la dessiccation. Pour le fluage, les simulations ont été réalisées à l'échelle mésoscopique en prenant en compte la présence de l'ancien mortier adhérent ; elles ont permis de mieux comprendre l'influence des GBR sur la localisation des microfissures. Des essais de fatigue ont également été réalisés. Ils montrent que l'endurance du béton diminue légèrement lorsque des GBR y sont introduits.

-
1. GeM, Centrale Nantes, Université de Nantes.
 2. LMT, ENS Cachan.
 3. IFSTTAR, Nantes.
 4. LMDC, Université de Toulouse.
 5. Consultant, Bougival.

11.1. Introduction

Durant leur exploitation, les ouvrages en béton sont soumis à des charges mécaniques qui génèrent des déformations différées. Ces déformations sont principalement le retrait et le fluage. Ces phénomènes sont réputés résulter de mécanismes internes à la microstructure du béton : pression dans les pores, interaction entre la matrice cimentaire et les granulats, viscoélasticité de la pâte de ciment, etc. Plusieurs études ont montré le rôle des granulats naturels sur ces déformations différées [Cortas *et al.*, 2014 ; Cortas, 2012], selon leur nature minéralogique et leur teneur en eau. De même, leur capacité à se déformer (déformabilité) joue un rôle significatif vis-à-vis des déformations différées des bétons. Peu d'études ont été réalisées sur l'effet des sables et des gravillons de granulats de béton recyclé (GBR) sur le retrait et le fluage des bétons. Comme leur nature est différente de celle des granulats naturels et que leur microstructure poreuse engendre une absorption d'eau importante, il est nécessaire de mieux comprendre leur influence sur les déformations différées des bétons. Un état de l'art a permis de dresser une synthèse des résultats obtenus par les chercheurs du monde entier. Par ailleurs, dans le cadre du Projet National RECYBETON, des laboratoires et des industriels se sont regroupés pour mener une campagne d'essais, dans l'objectif d'expliquer les comportements et de formuler des recommandations à l'attention des différents acteurs de la construction. Ce chapitre présente les résultats obtenus dans le cadre de ces travaux, tant sur le retrait et le fluage en flexion (GeM, École Centrale de Nantes), sur le fluage en compression (LMDC, Université de Toulouse), que sur la résistance à la fatigue (IFSTTAR Nantes). Les résultats de retrait obtenus par SIGMA Béton lors du chantier expérimental de Chaponost (décrit dans le chapitre 22) sont également présentés.

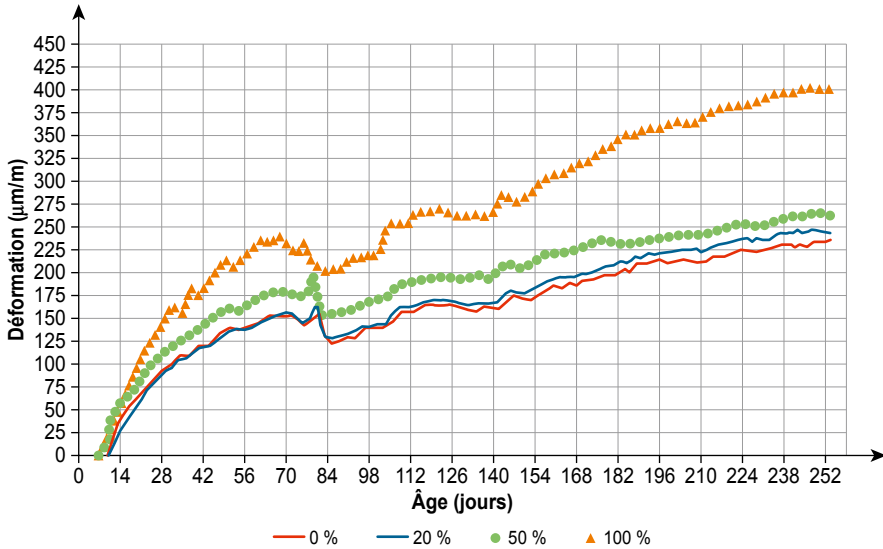
11.2. État de l'art sur le retrait et le fluage du béton de GBR

11.2.1. Influence du taux de substitution des GBR sur le retrait

L'influence du taux de substitution des granulats naturels par des GBR sur le retrait à long terme du béton a déjà fait l'objet de nombreux travaux [Hansen et Boegh, 1985 ; Tavakoli et Soroushian, 1996b ; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001 ; Gomez-Soberon, 2003 ; Katz, 2003 ; Domingo-Cabo *et al.*, 2009 ; Fathifazl *et al.*, 2011b ; Dao, 2012 ; Manzi *et al.*, 2013 ; Pedro *et al.*, 2014]. Les résultats montrent que les bétons de GBR présentent un retrait augmenté de 15 à 60 %, selon le taux de substitution. Toutefois, la plupart des études n'ont pris en compte que la substitution des gravillons.

Figure 11.1

Retrait des bétons de GBR avec différents taux de substitution des granulats naturels [Domingo-Cabo *et al.*, 2009]



Ce phénomène s'explique par l'absorption d'eau élevée des gravillons de GBR, qui sont des matériaux très poreux en raison de la présence de l'ancien mortier adhérent (aux grains du granulat d'origine), et dont le taux a été estimé par [Domingo-Cabo *et al.*, 2009] à 31,5 % et 18 % pour les classes 4/8 et 8/20 respectivement. À 28 jours, pour les bétons ayant un taux de substitution de 20 %, la différence avec le béton à base de granulats naturels est faible, alors qu'après 6 mois, elle atteint 4 % (Figure 11.1). En revanche, pour des taux de substitution de 50 % et 100 %, l'augmentation du retrait est de 12 % et 70 %, respectivement.

L'effet de la pré-saturation des GBR sur le retrait à long terme est peu étudié dans la littérature, alors qu'il s'agit d'un paramètre important, compte tenu de la forte absorption d'eau des GBR [Tam *et al.*, 2008 ; Djerbi-Tegger, 2012 ; Bendimerad *et al.*, 2016]. [Brand *et al.*, 2015] ont étudié trois niveaux de saturation des GBR : saturés surface sèche (SSS), partiellement saturés (80 % de l'état SSS) et séchés à l'étuve (SE). Les auteurs ont également étudié l'effet du procédé de malaxage, selon les consignes de la norme ASTM d'une part [ASTM C192, 2007], procédé repéré ici PNM (Procédé Normal de Malaxage), et selon la méthode développée par [Tam et Tam, 2008] d'autre part, repérée M2E (Malaxage en Deux Étapes). Pendant les premières 24 heures, aucun effet de l'état initial de saturation des gravillons et du procédé de malaxage (PNM ou M2E) sur le retrait n'est observé. Néanmoins, à long terme, tous les bétons élaborés selon le procédé PNM présentent moins de retrait, notamment le béton où les GBR sont pré-saturés à 80 % de l'état SSS. Le béton avec les

granulats secs (SE PNM) présente le retrait le plus élevé. [Brand *et al.*, 2015] expliquent que les GBR séchés à l'étuve n'atteignent pas la saturation complète au terme du malaxage. Le retrait libre de séchage est plus important pour le béton avec les GBR SE, puisque le rapport eau efficace sur ciment (E_{eff}/C) est plus élevé que pour le béton avec les GBR partiellement ou totalement saturés. Cette hypothèse est vérifiée par le fait que le retrait de séchage à 90 jours est statistiquement plus faible pour les bétons à base de GBR partiellement ou entièrement saturés, que pour les bétons à base de GBR SE.

11.2.2. Influence du taux de substitution des granulats recyclés sur le fluage

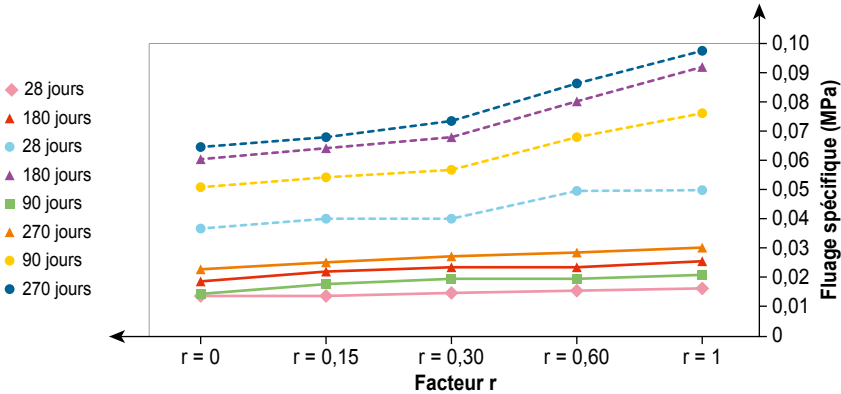
Des observations similaires ont été faites dans des études de fluage : le fluage augmente avec le taux de GBR [Hansen, 1992a ; Hansen, 1992b ; Gomez-Soberon, 2003 ; Domingo-Cabo *et al.*, 2009 ; Domingo *et al.*, 2010 ; Fathifazl *et al.*, 2011b ; WRAP, 2007a ; Marinkovic et Ignjatovic, 2013].

La Figure 11.2 montre que pour une charge permanente égale à 40 % de la résistance à la compression de l'éprouvette, la déformation de fluage du béton de GBR, pour des taux de substitution compris entre 20 à 100 %, est supérieure de 35 à 51 % respectivement à celle du béton de granulats naturels témoin. Vu sous un autre angle, le fluage conduit à la relaxation des contraintes élastiques et, par la suite, à la diminution des contraintes de traction en cas de retrait empêché [ACI 224R-01, 2001]. [Fan *et al.*, 2014] ont étudié l'effet de l'ancien mortier adhérent aux granulats sur les caractéristiques de fluage des bétons de GBR. La teneur en GBR, le module d'élasticité et les caractéristiques de l'ancien mortier sont responsables de cette différence. Sur la base de ces paramètres, les auteurs ont adapté le modèle de Neville [Neville *et al.*, 1983] pour prédire le fluage du béton recyclé.

Selon l'étude de [Gomez-Soberon, 2002a], les caractéristiques et la composition des bétons de GBR influent sur le comportement mécanique à court et à long terme des bétons. En particulier, le fluage de dessiccation est significativement affecté, comparativement à celui du béton de granulats naturels, du moins lorsque le taux de substitution dépasse 30 % (Figure 11.2). L'étude [WRAP, 2007] porte uniquement sur la substitution des gravillons de GBR. Le taux de substitution annoncé, par rapport à la masse totale des granulats, était de 0 %, 30 % et 60 % : cette dernière valeur, nettement supérieure à 50 %, suggère que la masse totale considérée était celle des gravillons uniquement, de sorte que les taux de substitution réels sont probablement de 15 % et 30 % environ. Les bétons étaient de classe de résistance à la compression C20/25 et C35/45. Quatre formules ont été étudiées, avec pour chacune deux essais de retrait et deux essais de fluage sur une durée de six mois environ. Les résultats montrent que le retrait des bétons de GBR est le même ou un peu inférieur à celui des bétons de granulats naturels. À l'inverse, le fluage est nettement plus élevé pour les bétons de GBR, avec une valeur maximale double. En extrapolant les

Figure 11.2

Fluage propre (lignes pleines) et fluage de dessiccation (lignes en pointillés) des bétons de GBR pour différents taux de substitution [Gomez-Soberon, 2002a]



courbes expérimentales à long terme, le rapport entre fluage des bétons de GBR et fluage des bétons de granulats naturels conduit aux ordres de grandeur du Tableau 11.1.

Tableau 11.1

Effet relatif du recyclage sur le fluage ([WRAP, 2007b])

Béton	C20/25		C35/45	
	30 %	60 %	30 %	60 %
Taux de GBR				
Fluage béton de GBR / béton de GN	1,6	2,4	1,8	2,2

L'extrapolation à 100 % de GBR donnerait un fluage maximum d'environ 4 fois celui des bétons de granulats naturels (et même plus si le taux effectif de GBR est inférieur à 60 %). Dans une autre référence [Marinkovic et Ignjatovic, 2013], une compilation de résultats montre que le fluage des bétons de GBR est au maximum supérieur de 50 % à celui des bétons de granulats naturels.

11.2.3. Influence des GBR sur la fatigue en flexion du béton

Les chaussées sont un réservoir traditionnel pour les matériaux recyclés, principalement en couches profondes, qu'elles soient collées ou non. Cependant, depuis plusieurs décennies, les chaussées en béton sont devenues aussi un débouché attrayant pour les GBR, avec, par exemple, la technologie de recyclage en « double passe » développée par les autrichiens, et appliquée depuis 1990 en Suisse [FHWA, 2007 ; Gaspar *et al.*, 2015]. Pour dimensionner

rationnellement une chaussée en béton, il est nécessaire de déterminer deux propriétés du matériau : son module d'élasticité et son comportement à la fatigue en flexion [SETRA-LCPC, 1997]. La première propriété est traitée au Chapitre 10, la seconde l'est dans le présent chapitre.

Le comportement à la fatigue du béton en compression, en traction ou en flexion est souvent décrit par la courbe de Wohler suivante [Arora et Singh, 2015] :

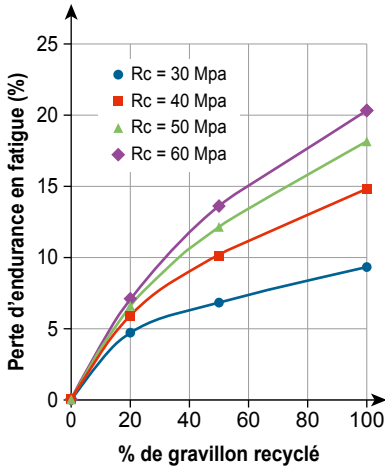
$$\frac{\sigma_{\log N}}{\sigma_0} = A + B \log N \quad (11.1)$$

où σ_0 représente la résistance statique, $\sigma_{\log N}$ la contrainte de flexion cyclique conduisant à la rupture du béton après N cycles, $\sigma_{\log N}/\sigma_0$ l'endurance du béton après N cycles, et A et B deux paramètres empiriques fonction du mode de chargement et du type de béton. B est négatif.

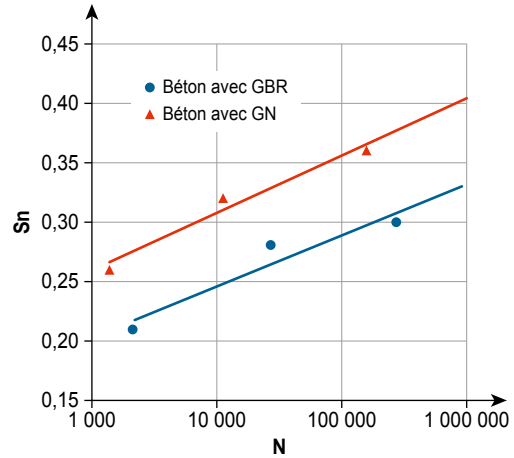
La méthode française de conception des chaussées est basée sur le comportement en flexion du matériau, ce qui suppose $A = 1$. B est tiré d'essais de fatigue, avec une valeur de s proche de s_6 . Comme les essais sont dispersés, l'écart-type de $\log(N)$ est un paramètre très important pour le dimensionnement des chaussées [SETRA-LCPC, 1997] et sa détermination nécessite de nombreux essais (voir la norme NF 98-233-1). Malheureusement, très peu de données sont disponibles dans la littérature sur le comportement à la fatigue en flexion du béton non armé contenant des GBR. Pour le comportement à la fatigue en compression, [Xiao *et al.*, 2013] ont montré que l'endurance à 2 millions de cycles est plus élevée pour les bétons de GBR que pour les bétons ordinaires (0,68 vs 0,58). Cependant, [Thomas *et al.*, 2014a ; Thomas *et al.*, 2014b] ont montré qu'elle diminue de 0,65 à 0,55 lorsque le taux de GBR et la résistance à la compression augmentent (Figure 11.3). Bien que chaque valeur d'endurance soit extrapolée à partir de dix essais de fatigue à différents niveaux de contrainte, aucune conclusion claire n'est donnée concernant l'évolution de la dispersion avec le taux de recyclage. Certaines données sont également disponibles à partir d'essais de fatigue en flexion quatre points. [Sobhan et Krizek, 1999 ; Sobhan *et al.*, 2016] prétendent qu'un matériau traité au ciment avec un squelette entièrement en GBR se comporte comme un matériau de chaussée conventionnel. Mais [Xiao *et al.*, 2013b] ont trouvé que l'endurance diminuait pour un béton contenant 100 % de GBR. [Arora et Singh, 2015 ; Arora et Singh, 2016] ont testé deux bétons à la fatigue en flexion quatre points, à 0 et 100 % de GBR. Ils ont obtenu une endurance à 2 millions de cycles de 0,58 pour le béton témoin et ont confirmé sa diminution pour le béton de GBR (0,50). Leurs nombres importants de points expérimentaux a permis de calculer l'écart-type S_N selon la norme NF 98-233-1, en fonction du niveau de contrainte. La Figure 11.4 montre que le taux de recyclage entraîne une augmentation modérée de S_N .

Figure 11.3

Perte d'endurance à 2 millions de cycles en fonction du taux de GBR [Thomas *et al.*, 2014b]

**Figure 11.4**

Évolution de l'écart-type de $\log N$ (S_N) en fonction du niveau de contrainte [Arora et Singh, 2016]



En conclusion, l'examen de la bibliographie montre que l'endurance tend à diminuer lorsque des GBR sont incorporés dans le béton. Néanmoins, peu de données fiables sont disponibles dans la littérature, en particulier avec un nombre suffisant d'échantillons permettant de prendre en compte la dispersion de la durée de vie en fatigue, paramètres primordiaux pour le dimensionnement des chaussées.

11.3. Effet des GBR sur le retrait du béton

11.3.1. Première campagne expérimentale

Les formulations des mortiers et bétons étudiés sont issues du rapport réalisé dans le cadre du thème 0 du Projet National RECYBETON « Développement des formules de béton de référence » [Sedran, 2013] (voir Annexes). Les mesures de retrait à long terme ont été effectuées sur éprouvettes de dimensions $2 \times 2 \times 16 \text{ cm}^3$ pour les mortiers, et sur éprouvettes de dimensions $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour les bétons. Ces éprouvettes ont été équipées à leurs extrémités de goujons métalliques scellées dans le matériau, permettant de les placer verticalement sur un banc d'essai et de suivre en continu leur variation de longueur avec un capteur de déplacement LVDT. Le démoulage a eu lieu 24 heures après fabrication. Pour chaque mélange, les éprouvettes ont été conservées soit en condition endogène, soit en condition de dessiccation. Pour cette dernière, une éprouvette a servi à suivre la perte de masse dans le temps, afin de rapprocher ces mesures de celles du retrait de dessiccation.

Les essais ont eu lieu dans un local régulé en température et en humidité (20 °C, 50 % HR). L'acquisition automatique des mesures a été programmée toutes les heures. La première mesure a été faite 20 minutes environ après le démoulage. Le modèle suivant, proposé par Torben [Hansen et Mattock, 1966], a été calibré sur les mortiers de GBR à partir des mesures de retrait à 7 et 40 jours :

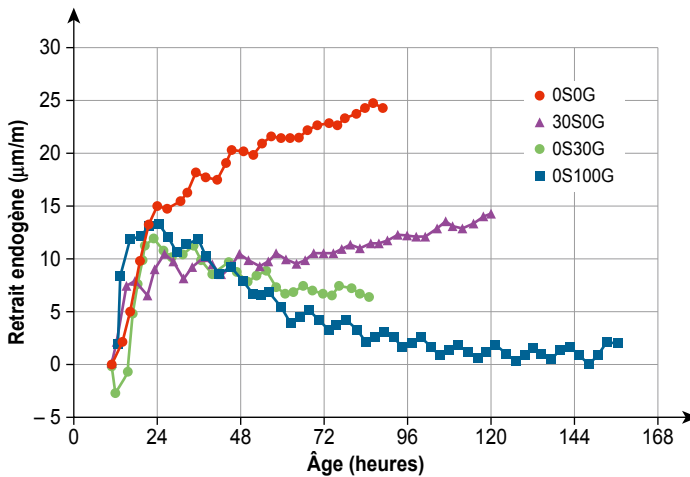
$$\varepsilon(t) = \frac{t}{N_s + t} \varepsilon_\infty \quad (11.2)$$

où ε_∞ représente le retrait à long terme, et N_s le temps nécessaire pour atteindre la moitié du retrait à long terme. On obtient alors : $N_s(7 \text{ j}) = 2,45$; $N_s(40 \text{ j}) = 2,43$; $(7 \text{ j}) = 1\,388 \mu\text{m/m}$; $(40 \text{ j}) = 1\,348 \mu\text{m/m}$. Compte tenu de la dépendance linéaire entre le temps N_s et le carré du rayon de séchage, un temps de mesure de 7 jours sur une éprouvette $2 \times 2 \times 16 \text{ cm}^3$ correspond à environ 86 jours sur une éprouvette $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$.

Les mesures de retrait endogène sur bétons de GBR ont été réalisées avec le dispositif BTJADE développé par l'IFSTTAR [Boulay, 2007] (Figure 11.5).

Figure 11.5

Retrait endogène des bétons de GBR



On constate qu'il n'y a pratiquement pas de retrait endogène. Le retrait le plus conséquent est celui du béton de granulats naturels (environ 25 $\mu\text{m/m}$). Les bétons et mortiers de GBR présentent des déformations plus faibles. Dans le cas du béton à 100 % de gravillons de GBR (0S100G), une expansion apparaît après 24 heures. Les GBR semblent donc agir comme un réservoir capable de fournir de l'eau pour minimiser l'auto-dessiccation. Ce mécanisme a déjà été observé pour les granulats légers [Kohno *et al.*, 1999 ; Zhutovsky *et al.*, 2002], et aussi pour des granulats de béton concassés provenant de retour de chantiers

[Maruyama et Sato, 2005 ; Kim et Bentz, 2008]. Ces auteurs montrent un effet des granulats légers sur la diminution du retrait endogène, de 40 à 70 %, par comparaison à des bétons de granulats naturels.

Tableau 11.2

Influence du taux de gravillons de GBR sur le retrait total (endogène + dessiccation) et temps caractéristique de retrait N_s (*eau sur ciment)

	0S0G	0S30G	0S100G
$e/c^* = 0,64$			
ϵ_∞ ($\mu\text{m/m}$)	593	654	661
N_s (jours)	15,4	17,6	23,7
$e/c = 0,53$			
ϵ_∞ ($\mu\text{m/m}$)	651	–	696
N_s (jours)	15,5	–	19,7

Compte tenu de ces résultats, le retrait endogène a été négligé pour la suite. Le Tableau 11.2 montre l'effet du taux de GBR sur l'amplitude du retrait de dessiccation et sur le temps caractéristique de retrait. Par rapport au béton témoin 0S0G, l'augmentation de l'amplitude du retrait du béton 0S100G n'est que de 7 et 11 %, pour les rapports E/C = 0,53 et 0,64 respectivement. Il y a cependant une augmentation assez claire du temps caractéristique de retrait avec le taux de GBR. Cette évolution a déjà été observée sur mortiers, et elle est attribuée à la porosité plus fine de la pâte de ciment de l'ancien béton. La partie la plus importante du retrait de dessiccation est liée à la perte de masse, qui provoque une diminution de l'humidité interne et, par suite, une augmentation de la pression capillaire, moteur du retrait. Le comportement présente trois phases. Dans la troisième phase, aucune reprise de masse liée à la carbonatation du matériau n'a été observée (arrêt des mesures à 110 jours). Dans la première phase, la perte de masse ne provoque pratiquement pas de retrait. Cette phase relativement brève est associée à l'évaporation de l'eau contenue dans les pores les plus gros situés à la périphérie de l'éprouvette [Khelidj et Loukili, 1998]. La perte de masse augmente avec le taux de substitution en GBR. Cette phase est aussi plus longue pour le béton ayant le rapport E/C le plus élevé. À l'inverse, pour les bétons ayant un rapport E/C faibles ($< 0,35$), cette phase est pratiquement inexistante et la relation retrait-perte de masse devient linéaire [Bissonnette *et al.*, 1999]. La deuxième phase est toujours linéaire. Elle est caractérisée par la diminution de l'humidité interne avec le début du retrait de dessiccation. Cependant, dans la partie finale, la perte de masse commence à se stabiliser alors que le retrait continue à augmenter. En traduisant la perte de masse en distance équivalente [Samouh *et al.*, 2016] ont obtenu le résultat présenté Figure 11.6. Une profondeur de séchage donnée peut refléter deux

configurations différentes ; dans le cas des GBR, la pâte et les granulats se dessèchent simultanément, alors que dans le cas des granulats naturels, la profondeur de séchage n'est reliée qu'à la dessiccation de la pâte de ciment seule. Cependant, les profondeurs de séchage sont proches de $D_{max}/2$ (où D_{max} représente la taille maximale des granulats) ; ce qui révèle l'existence d'un effet de paroi qui affecte la peau du béton (Figure 11.7). Son séchage rapide entraîne alors une hydratation incomplète de la pâte de ciment, voire même des microfissures.

Figure 11.6

Influence de la substitution des GBR sur la relation retrait total/perte de masse

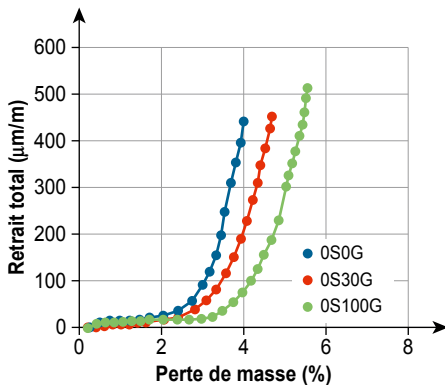
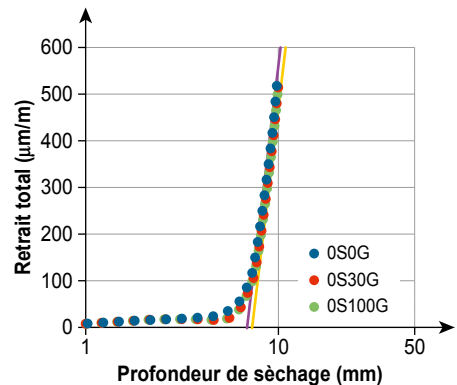


Figure 11.7

Influence de la substitution des GBR sur la relation retrait total/profondeur de séchage



11.3.2. Deuxième campagne expérimentale

Dans ce programme expérimental, trois bétons ont été étudiés afin d'évaluer l'influence de l'incorporation des GBR sur les propriétés de déformations différées.

Le Tableau 11.3 résume la composition des bétons selon les spécifications de [Sedran, 2013]. Pour trois bétons, une résistance à la compression de 35 MPa à 28 jours était visée. Les propriétés physiques et chimiques des constituants sont disponibles dans [Sedran, 2013]. Ces bétons ont été utilisés pour l'étude du retrait et pour l'étude du fluage en compression.

Le Tableau 11.4 présente les résultats pour $f_{cm,28}$ et E_{28} , utilisés par la suite pour l'étude du fluage en compression.

Dans ce qui suit, les résultats et discussions sont présentés en comparant systématiquement le béton de référence 0S0G aux bétons de GBR 30S30G et 0S100G. La figure 11.8 présente la variation du retrait de dessiccation dans le temps, entre 28 et 146 jours.

Tableau 11.3

Composition des bétons (granulats secs)

Formule (kg/m ³)	0S0G	0S30G	0S100G	
Eau totale		185	220	238
Eau efficace		175	179	185
CEMII/A-L 42,5 N		299	321	336
Fillers calcaires		58	44	53
Sable naturel 0/4		771	491	782
Gravillons naturels 4/10		264	168	
Gravillons naturels 6,3/20		810	542	
Sable de GBR 0/4			214	
Gravillons de GBR 4/10			142	158
Gravillons de GBR 10/20			164	682
Retardateur			1.3	
Superplastifiant		2.1	1.64	2.18

Après malaxage selon [Sedran, 2013], les bétons ont été coulés dans des moules cylindriques Ø 11 × 22 cm³, qui ont servi à mesurer à 28 jours la résistance à la compression [NF EN 12390-3], le module d'élasticité [NF EN 12390-13] et le retrait (les conditions de conservation sont détaillé dans [RILEM – TC107-CSP]).

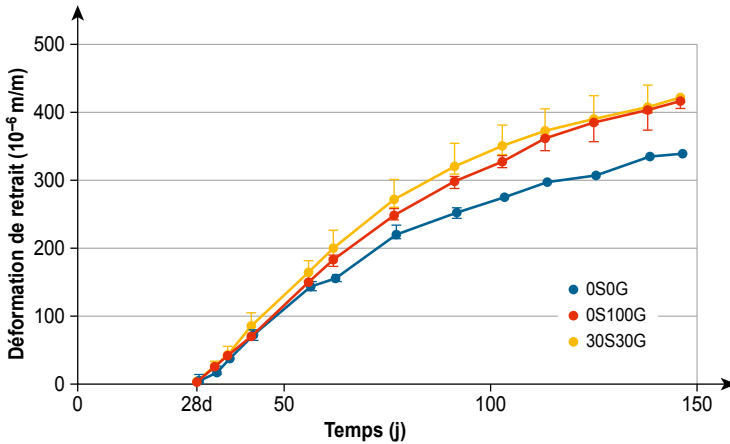
Tableau 11.4

Caractéristiques mécaniques instantanées

Béton	0S0G	30S30G	0S100G	
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)		36,7	37,6	34,8
Module d'élasticité à 28 jours (GPa)		36,7	33,4	30,0

Figure 11.8

Évolution du retrait de dessiccation dans le temps



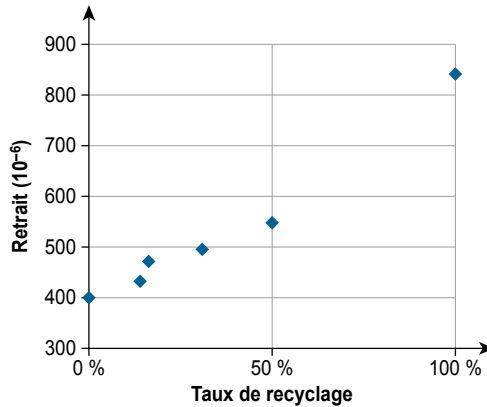
En ne tenant compte que du retrait de dessiccation, les mesures et leur dispersion (début des mesures à 28 jours) montrent des déformations similaires en cinétique et en amplitude pour les deux bétons de GBR (30S30G et 0S100G). À la fin des essais (146 jours), les valeurs mesurées pour le retrait de dessiccation sont d'environ 340 et 420 $\mu\text{m}/\text{m}$, pour le béton témoin 0S0G et pour les bétons de GBR, respectivement. Ainsi, par rapport au béton témoin, l'ajout de GBR provoque une augmentation du retrait de dessiccation d'environ 24 %, pour les deux bétons de GBR. On peut noter qu'après 28 jours (début de l'essai), aucun retrait endogène n'a été détecté pour l'ensemble des bétons. Il faut noter également que les écart-types pour les résultats de retrait endogène se situaient entre 3 et 61 $\mu\text{m}/\text{m}$.

11.3.3. Troisième campagne expérimentale

Le chapitre 22 présente le chantier expérimental réalisé à Chaponost (69) dans le cadre du Projet National RECYBETON. Six bétons, dont le taux de substitution a varié de 0 à 100 %, ont été réalisés pour construire un dallage de parking. Les bétons ont été échantillonnés à la centrale et les essais conventionnels ont été effectués, dont le retrait de dessiccation, conformément à la norme NFP 18-427. Pour cet essai, des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ ont été coulées, démoulées à un jour et conservées à 20 °C, HR 50 %. Les variations dimensionnelles ont été mesurées entre 1 à 90 jours. Les résultats des essais en fonction du taux de substitution sont présentés Figure 20.2. La Figure 11.9 illustre la relation entre le taux de recyclage, égal au rapport entre la masse totale de GBR (toutes coupures confondues) et la masse totale de granulats, et le retrait de dessiccation à 90 jours. Bien que certains bétons ne contenaient que des gravillons de GBR, et d'autres que du sable de GBR, il est intéressant de noter que tous les bétons s'alignent sur la même courbe maîtresse. Selon cette courbe, un recyclage total conduit à doubler le retrait de dessiccation.

Figure 11.9

Retrait de dessiccation des bétons de Chaponost, en fonction du taux de substitution



11.3.4. Étude numérique de la fissuration induite par le retrait

La prévision du comportement thermomécanique des bétons de GBR dans les ouvrages nécessite de compléter les modèles numériques existant, afin d'y intégrer les propriétés des GBR. Un modèle numérique est alors proposé dans ce chapitre. L'évolution de l'hydratation (relation 11.3) et les effets de l'élévation de la température et du développement des propriétés mécaniques doivent être prises en compte, afin de pouvoir prédire au mieux l'évolution des contraintes au cours de l'hydratation et de la dessiccation à long terme. Le modèle couramment utilisé dans la littérature (par exemple [Briffaut *et al.*, 2011]) considère que l'hydratation est thermo-activée (selon une loi d'Arrhenius) et exothermique (chaleur latente) (relation 11.4). Les propriétés mécaniques sont directement liées au degré d'hydratation en utilisant une loi de puissance et un seuil de percolation (relation 11.5).

$$\xi = \tilde{A}(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (11.3)$$

$$C\dot{T} = \nabla(k\nabla T) + L\dot{\xi} \quad (11.4)$$

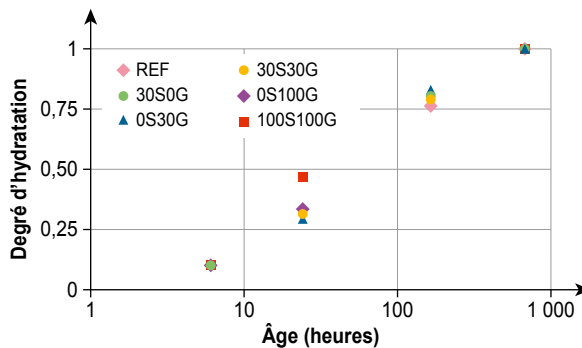
$$E(\xi) = E_\infty \bar{\xi}^{-a1} \dots \dots \dots f_t(\xi) = f_{t_\infty} \bar{\xi}^{-a2} \quad (11.5)$$

où E_a [$J \cdot mol^{-1}$] représente l'énergie d'activation, R [$J \cdot K^{-1} mol^{-1}$] la constante universelle des gaz, T [K] la température, ξ le degré d'hydratation, $\tilde{A}(\xi)$ [s^{-1}] l'affinité chimique normalisée, L [$J \cdot m^{-3}$] la chaleur latente d'hydratation, k [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] la conductivité thermique, C [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$] la capacité thermique, f_{t_∞} [MPa] la résistance à la traction finale (quand $\xi = \xi_\infty$, i.e. le degré final d'hydratation), E_∞ [MPa] le module d'Young final, et $a1$ et $a2$ les paramètres régissant les évolutions des lois.

Dans le cas de structure mince (par exemple un dallage au sol), la chaleur latente est négligée. Une approximation de l'évolution du degré d'hydratation est alors obtenue en considérant que le degré d'hydratation évolue linéairement avec la résistance à la compression mesurée. Dans la partie « Chantiers expérimentaux » de ce livre, ce type d'approximation a été utilisé pour obtenir l'évolution du degré d'hydratation des différents bétons de GBR (substitutions en sable et gravillons de GBR allant de 0 à 100 %) (Figure 11.10). L'évolution du degré d'hydratation est presque identique pour toutes les formules. L'effet de la présence des GBR ne semble donc pas avoir d'effet significatif sur l'évolution de l'hydratation dans le temps.

Figure 11.10

Évolution du degré d'hydratation pour différents taux de substitution en GBR



Le retrait endogène (ε_{en}) est directement lié à l'évolution du degré d'hydratation [Mounanga *et al.*, 2006] et il peut être modélisé par une relation linéaire reliée au degré d'hydratation [Briffaut *et al.*, 2011]

$$\varepsilon_{en} = -\kappa(\xi)\bar{\xi}1 \text{ avec } \bar{\xi} = \left\langle \frac{\xi - \xi_0}{\xi - \xi_\infty} \right\rangle_+ \quad (11.6)$$

où $\kappa(\xi)$ représente la fonction d'évolution, $\langle \cdot \rangle_+$ la partie positive de l'opérateur et ξ_0 le seuil de percolation mécanique [Torrenti et Benboudjema, 2005].

Après coulage, les structures en béton de GBR sont soumises à deux types de transferts :

- les transferts thermiques induits par l'hydratation et par la température ambiante,
- les transferts d'eau, en raison du déséquilibre entre l'humidité relative interne et l'humidité relative de l'environnement.

Le retrait est également couplé au fluage. Une représentation basique peut être utilisée en couplant par exemple une chaîne de Kelvin-Voigt à un amortisseur en série. Les coefficients de la chaîne et de l'amortisseur dépendent du degré d'hydratation. Pour augmenter la précision des simulations numériques, un autre amortisseur est ajouté en série pour prédire de manière plus précise le

caractère partiellement réversible de la contrainte de fluage, et le fait que le fluage total présente une évolution logarithmique à long terme.

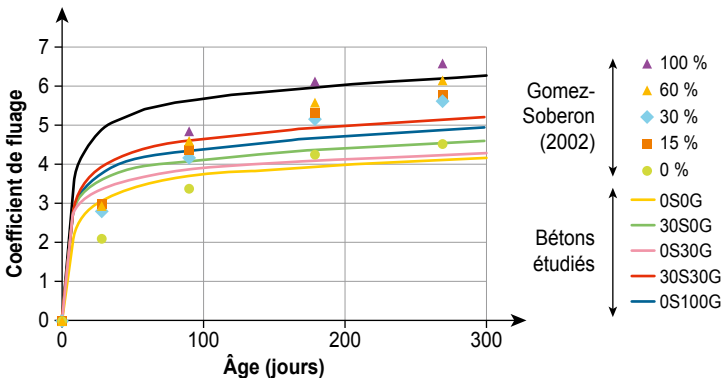
Les résultats expérimentaux montrent une proportionnalité entre la déformation de fluage de séchage en compression ε_{dc} (et en traction) et le retrait de séchage ε_{ds} , qui dépend d'un paramètre matériau λ_{dc} . Le modèle proposé par [Bazant et Chern, 1985] pour la prévision des déformations de fluage de séchage est conservé :

$$\dot{\varepsilon}_{dc} = \lambda_{dc} \dot{\varepsilon}_{dc} \bar{\sigma} \quad (11.7)$$

Enfin, le modèle rhéologique est étendu aux états de contraintes multiaxiales par l'utilisation d'un coefficient de Poisson de fluage qui peut être pris égal au coefficient de Poisson élastique [Benboudjema et Torrenti, 2008]. En cas de séchage à température ambiante, il suffit de ne prendre en compte que le mécanisme de perméation de l'eau liquide, qui prédomine lors du séchage du béton dans ces conditions. Ainsi, la préservation de l'eau liquide au sein du béton conduit à la résolution d'une équation différentielle parabolique non linéaire. L'évolution de la teneur en eau avec l'humidité relative est représentée par l'isotherme de sorption (degré de saturation en eau liquide par rapport à la pression capillaire), en utilisant le modèle de Van Genuchten. En considérant que le retrait de séchage résulte de la déformation mécanique du squelette solide sous la pression capillaire, un modèle poromécanique pour les milieux non saturés peut être utilisé [Sciumé *et al.*, 2013]. Les résultats numériques du coefficient de fluage (rapport entre la déformation et la contrainte appliquée), pour les bétons présentés dans le chapitre 22, sont comparés Figure 11.11 à ceux de [Gomez-Soberon, 2002a]. On peut voir que les valeurs du coefficient de fluage sont similaires entre les deux études. Cela valide indirectement les modèles numériques proposées pour le fluage total et le fluage de dessiccation. De plus, le béton 100 % recyclé diffère significativement des autres formulations avec des valeurs de fluage plus élevées. Le béton témoin (0 % de GBR) est proche des autres formulations ayant des taux de substitution en GBR inférieurs à 100 %.

Figure 11.11

Évolution du fluage total pour différents taux volumiques de substitution. Comparaison entre résultats expérimentaux [Gomez-Soberon, 2002a] et numériques

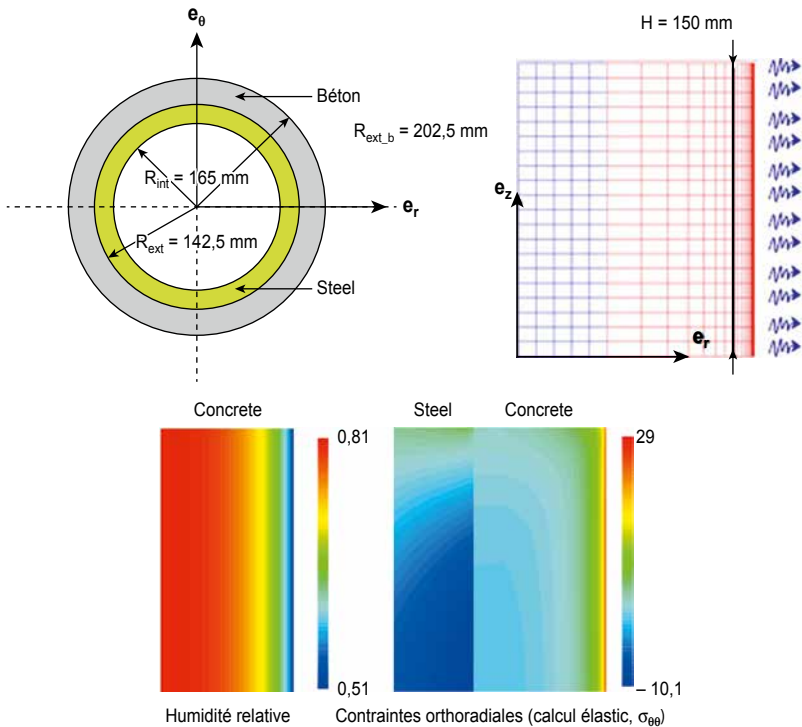


La connaissance d'un indicateur de fissuration associé au retrait n'est pas suffisante pour prédire à quel endroit la fissuration va se produire dans la structure. L'ajout d'un modèle d'endommagement permet d'avoir accès à la localisation des fissures. Celui développé par [Mazars, 1984], qui prédit la dégradation du matériau à partir des déformations d'extension principales, a été adopté et étendu pour prendre en compte l'hydratation.

La Figure 11.12 présente la géométrie et le maillage utilisés pour étudier la susceptibilité à la fissuration des différents bétons de GBR lors de l'essai à l'anneau. Les résultats finaux après 200 heures, en termes d'humidité relative et de contraintes orthoradiales (avec un premier calcul élastique) sont reportés Figure 11.12 pour le béton à 100 % de GBR. On voit que le séchage est très lent et qu'il n'est pas terminé. Pour les contraintes, les gradients de séchage induisent des contraintes de tension très élevées à la périphérie, qui dépassent la résistance à la traction du matériau. Il faut donc s'attendre à une microfissuration superficielle. Le fait que le retrait de séchage soit empêché par l'acier induit également des contraintes de traction dans le béton, équilibrées par des contraintes de compression dans l'acier.

Figure 11.12

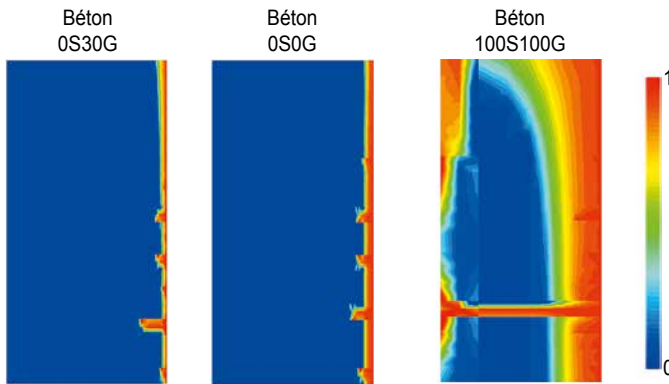
Géométrie et maillage (calcul axisymétrique)
pour l'étude numérique de l'essai à l'anneau sur différents bétons de GBR



En considérant les endommagements (Figure 11.13), deux modèles de fissuration différents sont obtenus à la fin du calcul. Seul le béton à 100 % de GBR présente une fissure traversante, alors que les autres bétons ne montrent qu'une fissuration superficielle (sur la peau du béton), phénomène qui se produit classiquement à cause du gradient de séchage entre la surface et le cœur du béton. Une grande valeur d'endommagement à l'interface entre l'acier et le béton est également observée. Elle est représentative du décollement généralement observé pour l'essai à l'anneau [Briffaut *et al.*, 2011]. Une caractérisation microscopique doit être effectuée afin de valider ou non les résultats obtenus par cette approche de modélisation.

Figure 11.13

Endommagement dans trois bétons 0S30G, 0S0G, 100S100G.
L'indicateur d'endommagement va de 0 pour le matériau sain, à 1 pour le matériau entièrement fissuré



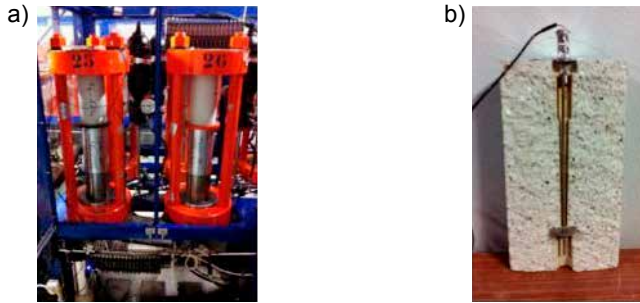
11.4. Effet des GBR sur le fluage du béton

11.4.1. Fluage en compression du béton de GBR

Comme pour le retrait (§ 11.3.2), les bétons 0S0G, 0S100G et 30S30G ont été testés sur éprouvettes cylindriques $\varnothing 11 \times 22 \text{ cm}^3$ sous sollicitation de fluage, soit en mode dessiccation (échange hydrique avec l'environnement) soit en mode endogène (sans échange hydrique avec l'environnement).

Figure 11.14

Réalisation de l'essai de fluage ; a) Chargement ; b) Éprouvette équipée d'un capteur LVDT



Crédit photo : . Cassagnabere, LMDC.

Avant l'essai, les éprouvettes ont été conservés 28 jours à 20 °C dans une enveloppe plastique (certaines d'entre elles ont été partiellement endommagés durant le transport). Les déformations différées ont été suivies pendant 146 jours, avec le montage (capteur LVDT) présenté Figure 11.14. Pour les trois bétons, la contrainte appliquée était égale à 40 % de la résistance à la compression mesurée à 28 jours, soit 14,7 MPa pour 0S0G, 15 MPa pour 30S30G et 13,9 MPa pour 0S100G. La déformation différée totale est égale à la somme des déformations de fluage, instantanées et de retrait (Eq. 11.8). Ainsi, le fluage peut être dissocié des contraintes élastiques et de retrait, bien que les différents phénomènes soient interdépendants [Cassagnabère *et al.*, 2009].

$$\varepsilon_{dd}(\tau = 40 \%f_{c28,t}) = \varepsilon_{ins}(\tau = 40 \%f_{c28}) + \varepsilon_{df}(\tau = 40 \%f_{c28,t}) + \varepsilon_{dr}(t) \quad (11.8)$$

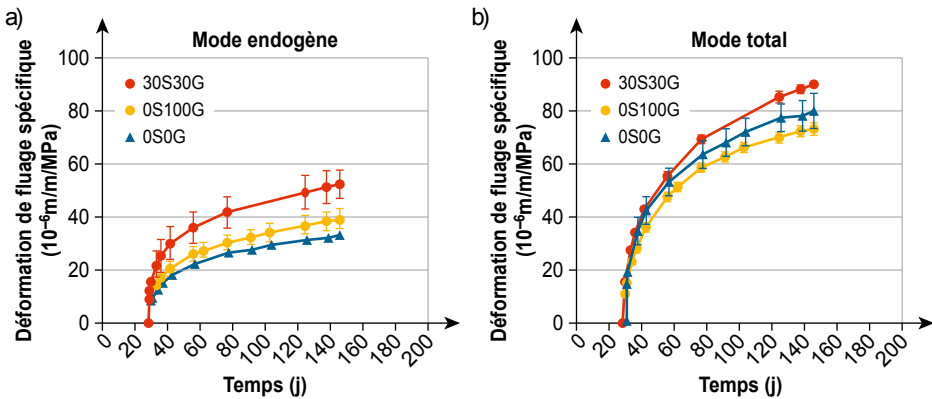
où $\varepsilon_{dd}(\tau = 40 \%f_{c28,t})$ représente les déformations différées à l'âge t (taux de chargement de 40 % de la résistance à 28 jours), $\varepsilon_{df}(\tau = 40 \%f_{c28,t})$ les déformations de fluage à l'âge t (taux de chargement de 40 % de la résistance à 28 jours), $\varepsilon_{ins}(\tau = 40 \%f_{c28,t})$ les déformations élastiques instantanées à l'âge t (taux de chargement de 40 % de la résistance à 28 jours) et $\varepsilon_{dr}(t)$ les déformations de retrait à l'âge t.

Les courbes spécifiques de fluage endogène et total en fonction du temps (de 28 à 146 jours) sont présentées Figure 11.15 (en mode dessiccation et en mode endogène). Il faut rappeler que, pour exprimer le fluage spécifique, les valeurs de déformation de fluage sont divisées par les valeurs de charge. Ces figures montrent clairement que les déformations spécifiques de fluage sont modifiées de manière significative lorsque les granulats naturels sont partiellement remplacés par des GBR, mais avec des tendances différentes selon le mode de conservation. L'augmentation des déformations de fluage peut être liée à la quantité plus élevée de pâte de ciment. En mode dessiccation, l'écart entre les courbes devient constant à partir de 126 jours ; à 146 jours et comparativement au béton témoin, on observe une diminution de 8 % de la déformation lorsque 100 % des gravillons sont substitués (79,8 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour

0S0G et 73,4 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour 0S100G) et une augmentation de 13 % lorsque le sable et les gravillons sont substitués (90 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour 30S30G). Comme pour le mode endogène, les évolutions sont différentes en mode dessiccation ; la différence entre les courbes devient constante à partir de 77 jours ; à 146 jours, et comparativement au béton témoin, l'augmentation est d'environ + 20 % et + 59 % (pour 0S100G et 30S30G respectivement).

Figure 11.15

Évolution des déformations de fluage spécifiques dans le temps ; a) mode endogène ; b) mode dessiccation



Ces résultats montrent que l'incorporation de GBR dans le béton contribue à une modification des déformations différées sous charge et plus spécifiquement pour le fluage en mode dessiccation et endogène. Il convient de noter que l'incorporation de 100 % de gravillons de GBR réduit le fluage de dessiccation. Cependant, cet effet ne s'applique qu'à court terme, lorsque l'humidité interne du béton est encore élevée, en raison de la réserve d'eau stockée dans les GBR.

Le coefficient de fluage exprime le rapport entre la déformation de fluage à t jours (146 jours) et la déformation élastique à 28 jours ($f_{c28}(t_0)/E_{c28}$) :

$$C_{\text{fluage}} = \frac{\varepsilon_{\text{cr}}(\tau = 40 \% f_{C28,t}) \times E_{C28}}{f_{C28}} \quad \text{avec } t = 146 \text{ jours} \quad (11.9)$$

Le Tableau 11.5 présente le coefficient de fluage déterminé selon l'équation (11.9).

Tableau 11.5

Coefficient de fluage calculé à 146 jours

Coefficient de fluage ($\mu\text{m}/\text{m}$)	0S0G	30S30G	0S100G
Endogène	1,27	2,06	1,24
Dessiccation	3,08	3,55	2,31

Les coefficients calculés à 146 jours font apparaître deux caractéristiques importantes. Par rapport au béton de référence (0S0G), le béton incorporant du sable et des gravillons de GBR (30S30G) présente des valeurs de fluage plus élevées dans les deux modes. À l'inverse, pour le béton incorporant uniquement des gravillons de GBR (0S100G), les valeurs sont plus faibles que celles du béton de référence, montrant que ces granulats favorisent le comportement au fluage. En complément de cette étude sur l'impact de l'incorporation de GBR dans une formulation de béton vis-à-vis des déformations différées, les valeurs expérimentales obtenues lors des essais de retrait et de fluage ont été comparées aux valeurs prévues selon l'Eurocode 2 (EC2) « Calcul des structures en béton » [NF EN 1992-2, 2006], annexe B « Déformations de fluage et de retrait ». Dans l'EC2, différents modèles permettent de définir les contraintes de retrait et de fluage en modes endogène et de dessiccation. Pour utiliser les modèles de l'EC2, diverses données d'entrée sont nécessaires. Le Tableau 11.6 résume celles utilisées pour calculer les déformations différées.

Tableau 11.6

Coefficient de fluage calculé à 146 jours

Données d'entrée utilisées	0S0G	30S30G	0S100G
t_0 (j)	28	28	28
HR (%)	50	50	50
Éprouvette (cm)	Ø 11 × 22	Ø 11 × 22	Ø 11 × 22
$f_{cm}(t = 28 \text{ j} = t_0)$ (MPa)	36,7	37,6	34,8
$f_{ck} = f_{cm} - 8$ MPa (MPa)	28,7	29,6	26,8
$\sigma_{t0} = 40 \% \cdot f_{cm}(t_0)$ (MPa)	14,7	15,0	13,9
$E_{cm}(t = 28 \text{ j})$ (MPa)	36 700	33 400	30 000
$E_c = 1,05 E_{cm}(t = 28 \text{ j})$ (MPa)			

Le Tableau 11.7 compare les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de déformation différée (fluage et retrait), en mode de conservation endogène et de dessiccation. Ce tableau suscite quelques commentaires. Concernant le retrait, les valeurs prédites selon les modèles de l'EC2 surévaluent les valeurs expérimentales (de + 21 % à + 53 %), malgré une précision de 30 % annoncée pour le modèle de fluage de l'EC2. Pour le fluage, l'inverse se produit en mode dessiccation, avec une sous-estimation des valeurs prédites de fluage, comparativement aux valeurs expérimentales (de - 12 % à - 74 %).

Tableau 11.7

Résultats des déformations différées à 146 jours
(valeurs expérimentales/valeurs prévues par l'EC2)

Déformations différées ($\mu\text{m/m}$)	0S0G	30S30G	0S100G
Déformations de retrait			
Endogène	- / 22	- / 25	- / 17
Dessiccation	339 / 517	420 / 508	415 / 538
Déformation de fluage ($\mu\text{m/m}$)			
Endogène	490 / 181	588 / 208	779 / 203
Dessiccation	1189 / 812	1341 / 906	1097 / 963

Pour conclure sur l'impact de la substitution des granulats naturels par des GBR vis-à-vis du comportement au fluage, on retiendra qu'une augmentation significative du fluage endogène est observée lorsque des GBR ont été incorporés dans le béton. Lorsque 100 % des gravillons sont substitués par des GBR, le fluage de dessiccation est réduit. Enfin, le volume de pâte, différent pour les 3 bétons, peut expliquer ces modifications. Les modèles de l'EC2 pour la prévision du fluage et du retrait ne semblent pas pertinents lorsque des GBR sont incorporés dans la formule du béton.

11.4.2. Fluage en flexion du béton de GBR

L'influence des GBR sur le fluage en flexion de poutres en béton est présentée dans ce paragraphe. Dans ce but, trois poutres avec entaille, réalisées avec les bétons 0S0G, 0S30G et 0S100G, ont été soumises à un essai de fluage en flexion durant trois mois. Une charge constante égale à 40 % de l'effort maximum (F_{max}) a été appliquée. Les essais de fluage en flexion ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $10 \times 20 \times 80 \text{ cm}^3$, en utilisant un dispositif de fluage spécifique développé par le GeM [Omar *et al.*, 2009] placé dans une enceinte régulée en température et en hygrométrie ($20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et HR $50 \% \pm 5 \%$). L'application de la charge sur la poutre se fait en plaçant une masse de 500 kg sur le point d'appui supérieur. La flèche totale est mesurée au milieu de la poutre, à l'aide d'un capteur LVDT. La flèche correspond au déplacement instantané dû à l'application de la charge, auquel s'ajoute le fluage. Compte tenu de la taille des échantillons étudiés, le retrait du béton des poutres n'a pas été mesuré. Dans ce cas, le fluage est défini comme la différence entre la flèche totale sous charge et la flèche élastique instantanée, mesurée après 2 minutes, qui correspond à une déformation d'équilibre avant que les phénomènes viscoélastiques ne se produisent. Les déplacements

spécifiques différés sont calculés en soustrayant la partie élastique de la flèche totale, divisée par la contrainte de flexion :

$$\sigma = \frac{3}{4} \frac{\rho g h l^2}{(h - a_0)^2} + \frac{3}{2} \frac{F l}{b(h - a_0)^2} \quad (11.10)$$

où ρ représente la masse volumique du béton, l la distance entre appuis, F la charge appliquée, h et b , respectivement la hauteur et la largeur de la poutre, et a_0 la profondeur de l'entaille.

La Figure 11.16 montre les déplacements spécifiques différés pour les trois types de béton. On découvre que la cinétique de fluage est plutôt similaire entre le béton de granulats naturels et le béton à 30 % de GBR, avec une amplitude 1,2 fois plus grande pour ce dernier, après trois mois de chargement. Pour le béton à 100 % de GBR, la cinétique de fluage est plus rapide et l'amplitude est pratiquement doublée par rapport au béton de granulats naturels. L'amplitude du fluage du béton de granulats naturels après trois mois de chargement est atteinte dès quatre semaines par le béton à 100 % de GBR. L'analyse de la rupture de ces bétons [Guo *et al.*, 2016] a conduit à formuler deux hypothèses : son origine est liée soit au fluage des GBR, soit à la microfissuration qui affaiblit le béton de GBR sous charge constante. Pour vérifier ces hypothèses, l'évolution du fluage a été analysée en figurant le déplacement spécifique différé au temps t rapporté au déplacement spécifique final mesuré à la fin de l'essai, en fonction du temps (Figure 11.17). Les évolutions du déplacement relatif différé sont comparables pour les trois bétons. Cela suggère que le mécanisme de fluage est identique pour le béton de granulats naturels et les bétons de GBR. Mais les déplacements de fluage final sont différents en raison de la quantité plus élevée de pâte de ciment et, si des microfissures se produisent, en raison d'une interface plus fragile avec l'ancien mortier adhérent qui entoure les GBR. En d'autres termes, la viscoélasticité et/ou les microfissures sont de même nature

Figure 11.16

Déformations différées des poutres en béton sous fluage

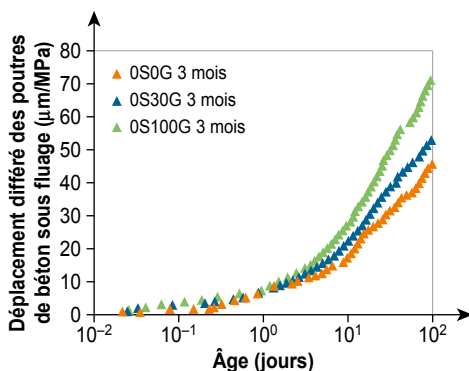
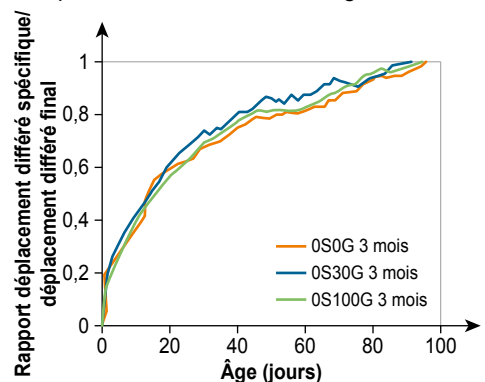


Figure 11.17

Déformations différées relatives des poutres en béton sous fluage



pour les trois types de béton, mais leurs amplitudes sont différentes. Les essais réalisés montrent l'influence des GBR sur le retrait et le fluage du béton. Mais ces essais sont limités dans le temps. Ainsi, pour pouvoir prévenir la fissuration des structures en béton de GBR, tant à un âge précoce qu'à long terme, ou quantifier pour le moins la dégradation de leurs propriétés, il est nécessaire de fonder une modélisation prédictive, incluant tous les mécanismes impliqués.

11.4.3. Modèle mésoscopique pour le fluage des bétons de GBR

La simulation du fluage du béton nécessite la connaissance de la complaisance de fluage de sa matrice (mortier) et de ses granulats. Le fluage du mortier nécessite de connaître celle de la pâte de ciment et du sable. Et le fluage de la pâte de ciment nécessite de connaître celle des phases hydratées et non hydratées. Ainsi, le fluage du béton dépend principalement de la viscoélasticité des derniers constituants cités. Dans le cas d'un béton de GBR, à l'échelle du béton, l'ancien mortier adhérent aux granulats peut être assimilé à une auréole de transition [Grondin et Matallah, 2014] (Figure 11.18). Comme le béton de GBR est aussi un béton ordinaire, ses propriétés peuvent être déterminées selon l'approche énoncée ci-avant. Ce modèle considère que la pâte de ciment est formée d'une matrice continue, constituée de C-S-H et de pores, et d'inclusions correspondant aux autres hydrates ($V_{\text{hyd}} = [\text{CH}, \text{Ettringite}, \text{gypse}, \text{C}_3\text{AH}_6, \text{FH}_3]$) et au clinker anhydre résiduel ($\text{C}_3\text{S}, \text{C}_2\text{S}, \text{C}_3\text{A}, \text{C}_4\text{AF}$) [Farah *et al.*, 2013]. Avec l'avancement de l'hydratation, la fraction volumique du clinker diminue tandis que la fraction volumique des hydrates augmente. Sur la base de la loi d'Arrhenius, ces fractions volumiques peuvent être calculées à partir des relations stœchiométriques du ciment [Bernard *et al.*, 2003 ; Grondin *et al.*, 2010] :

$$V_k^p(t) = \sum_{i=1}^n V_0^i \frac{n_k^p \rho_c M_k}{n_i^R \rho_k M_i} \xi_i(t) \dots \dots k = 1, m \quad (11.11)$$

où V_0^i représente le volume du clinker résiduel, $V_k^p(t)$ le volume des hydrates nouvellement formés, M la masse molaire [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$], ρ la masse volumique [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] et n le nombre de moles. L'indice k représente les produits (clinker), l les réactifs et c le ciment.

À l'échelle de la pâte de ciment et du mortier, le problème local est résolu sur un volume élémentaire représentatif V , formé de deux phases distinctes : la matrice V_m et n inclusions V_i ($i = 1, n$). La matrice a un comportement viscoélastique, sa complaisance (J) étant définie par un modèle de Kelvin généralisé à quatre chaînes. Une force constante de traction F est appliquée sur la surface supérieure Γ_1 de V , selon la normale n , et la surface inférieure Γ_2 reste fixe. Ces conditions impliquent un champ de déplacements locaux $u(y)$, un champ de déformations locales $\varepsilon(y,t)$ et un champ de contraintes locales $\sigma(y,t)$

en chaque point y de V . La relation entre les déplacements viscoélastiques locaux et les contraintes viscoélastiques locales est donnée par :

$$\varepsilon^V(y,t) = J(t) \otimes \sigma^V(y,t) \quad (11.12)$$

Selon le modèle Kelvin-Voigt, $J(t)$ est donné par :

$$J(t) = \frac{1}{E} + \sum_{i=1}^{i=3} \frac{1}{k_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (11.13)$$

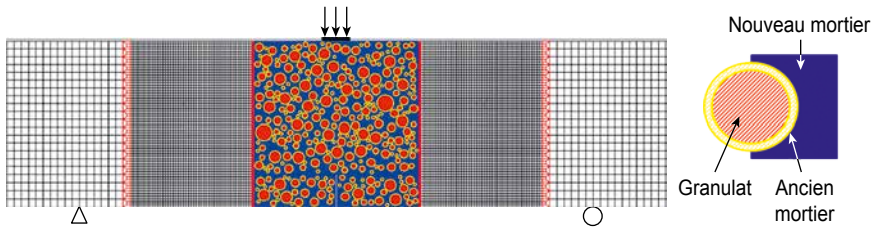
où k_i représente le coefficient de rigidité et τ_i le temps caractéristique.

La résolution du problème local donne une relation entre les contraintes moyennes $\langle \sigma \rangle_V$ et les déformations moyennes $\langle \varepsilon \rangle_V$ liées par le tenseur de fluage effectif J^{hom} :

$$\langle \varepsilon \rangle_V = J^{\text{hom}} \langle \sigma \rangle_V \rightarrow \quad (11.14)$$

Figure 11.18

Maillage des poutres en béton de GBR soumises à un essai de fluage en flexion trois points (à gauche) et représentation d'un GBR avec l'ancien mortier adhérent (à droite)



À l'échelle du béton, le modèle viscoélastique précédent est couplé au modèle de dommages développé par [Saliba *et al.*, 2013]. Le calcul du fluage du béton de GBR nécessite la connaissance d'un grand nombre de paramètres. En effet, le modèle physique développé ici tient compte des différentes phases du matériau et de leurs propriétés élastiques, viscoélastiques et de rupture respectives. À l'échelle de la pâte de ciment, seule la matrice est supposée viscoélastique, en raison de la viscoélasticité des C-S-H et de la présence des pores. Dans une première étape, les propriétés des C-S-H sont déterminées par une analyse inverse, allant de l'échelle du béton à celle des C-S-H. Le calcul à l'échelle du béton a été appelé sur les essais présentés au paragraphe 11.3.1. La formule de [Ricaud et Masson, 2009] est utilisée pour déduire les propriétés des CSH, indépendamment de la composition du béton et de l'âge :

$$k_i^{\text{CSH}} = k_i^{\text{CSH+pores}} \frac{3f_p}{4(1-f_p)} \quad (11.15)$$

où f_p représente la fraction volumique des pores dans la matrice de pâte de ciment.

Pour les quatre chaînes du modèle de fluage, les valeurs k_i pour les essais de fluage sont : $k_1^{\text{CSH}} = 16,56$ GPa ; $k_2^{\text{CSH}} = 5,96$ GPa ; $k_3^{\text{CSH}} = 2,65$ GPa ; $k_4^{\text{CSH}} = 0,53$ GPa. À partir de ces paramètres, il devient possible de calculer les propriétés de fluage de toutes pâtes de ciment et donc de tout mortier. Pour l'ancien mortier adhérent, dont la composition est inconnue, on suppose qu'il se situe parmi 16 formules de mortiers ordinaires : 4 rapports E/C différents (0,3, 0,4, 0,5, 0,6) et 4 rapports sable/ciment différents (3, 3,46, 5, 7). Le modèle d'hydratation permet d'estimer les propriétés élastiques moyennes de toutes les formules de mortier et le modèle de fluage donne la compliance moyenne. Pour limiter les erreurs, il faut fixer les valeurs minimales et maximales qui encadrent le résultat sur le béton. Enfin, les paramètres de rupture (f_t et énergie de fissuration G_f) de l'ancien mortier adhérent sont calculés en fonction des relations du modèle d'endommagement :

$$G_f = \frac{h(1+\nu)f_t^2}{2 \cdot 2E} = \frac{h(1+\nu)E^2\varepsilon_0^2}{2 \cdot 2E} = \frac{h}{4}(1+\nu)E\varepsilon_0^2 \quad (11.16)$$

où h représente la taille de l'élément fini et ε_0 le seuil d'endommagement. Cela permet d'écrire la relation entre l'ancien et le nouveau mortier :

$$\frac{G_f^{\text{anc-m}}}{G_f^{\text{nouv-m}}} = \frac{E^{\text{anc-m}}}{E^{\text{nouv-m}}} \quad (11.17)$$

De plus, le comportement élastique à l'endommagement du mortier permet d'écrire : $f_t^{\text{anc-m}} = E^{\text{anc-m}} \cdot \varepsilon_0$, avec $\varepsilon_0 \in (5e^{-5}, 1e^{-4})$.

Les poutres en béton sont simulées en considérant un maillage mésoscopique au centre et un maillage homogène aux extrémités de la poutre, et en cherchant les propriétés qui conduisent aux mesures expérimentales (Figure 11.16). Le Tableau 11.8 présente l'ensemble des paramètres retenus et les méthodes de détermination associées (Lit. : littérature ; Hyd. : modèle d'hydratation ; Hyp. ; hypothèse ; Cal. : calculé par le modèle multi-échelle ; Calib. : calibré). Les temps de fluage caractéristique des quatre chaînes sont respectivement : $\tau_1 = 0,1$ jour ; $\tau_2 = 1$ jour ; $\tau_3 = 10$ jours ; $\tau_4 = 100$ jours.

Tableau 11.8

Coefficients utilisés dans le modèle fluage-endommagement

	E [GPa]	ν [-]	f_t [MPa]	G_f [N·m ⁻¹]	k_1 [GPa]	k_2 [GPa]	k_3 [GPa]	k_4 [GPa]
Granulat naturel	78 Lit.	0,24 Lit.	6 Lit.	80 Lit.	∞ Hyp.	∞ Hyp.	∞ Hyp.	∞ Hyp.
GBR	54,2 Lit.	0,24 Lit.	6 Lit.	80 Lit.	∞ Hyp.	∞ Hyp.	∞ Hyp.	∞ Hyp.
Ancien mortier (min-max)	27,2-30,2 Hyd.	0,33-0,33 Hyd.	1,36-1,51 Mul. Cal.	139-154 Mul. Cal.	90-250 Mul. Cal.	45-76 Mul. Cal.	22-37 Mul. Cal.	4-7 Mul. Cal.
Nouveau mortier	27,45 Hyd.	0,33 Hyd.	1,6 Mul. Cal.	140 Calib.	892 Mul. Cal.	203 Mul. Cal.	98 Mul. Cal.	21 Mul. Cal.

Les fluages spécifiques calculé et mesuré sont donné Figure 11.19. On voit que pour le béton à 100 % de GBR, le déplacement calculé est inférieur à celui mesuré. Une étude récente a montré que les gravillons de GBR sont moins résistants à l'attrition et aux chocs [Omary *et al.*, 2015]. Leur influence sur le fluage du béton doit donc être prise en compte dans les simulations. Le coefficient viscoélastique des GBR a alors été calibré à la valeur de 23 GPa pour les quatre chaînes, ce qui a permis de reproduire le fluage des bétons incorporant 30 % et 100 % de GBR, sans autre calibration (Figure 11.19).

Ce modèle permet de prédire le fluage des bétons de GBR en tenant compte de l'influence de l'ancien mortier adhérent. Les paramètres déterminés permettent de fixer l'étalonnage de chaque coefficient. Un exemple est donné pour plusieurs taux de substitution (Figure 11.20).

Figure 11.19

Comparaison entre les déplacements de fluage mesurés et calculés pour OS0G (en haut à gauche), OS100G sans étalonnage (en haut à droite), OS100G après étalonnage (en bas à gauche), OS30G (en bas à droite)

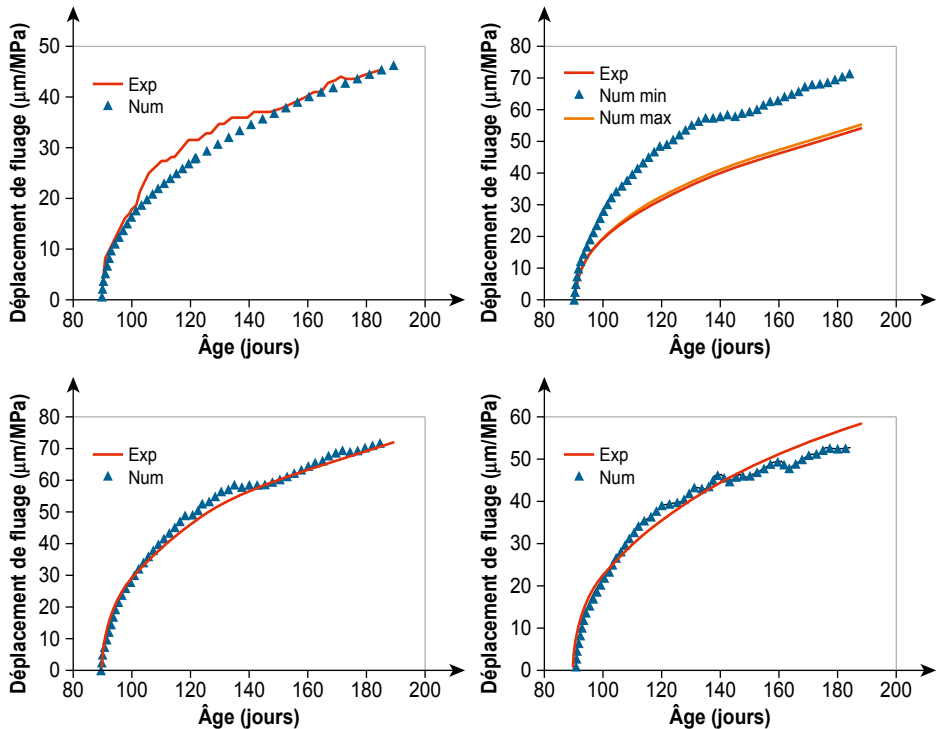
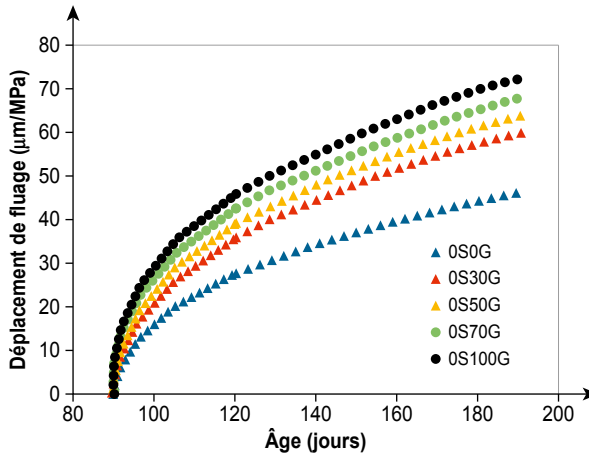


Figure 11.20

Déplacements de fluage pour différents taux de substitution des GBR



11.5. Fatigue du béton de GBR

11.5.1. Étude expérimentale et résultats

Trois bétons avec des taux de GBR différents ont été formulés avec les constituants sélectionnés par le Projet National RECYBETON (voir annexes) en visant (presque) la même résistance à la traction par fendage $R_{tb} = 3,3 \text{ MPa}$ que celle requise classiquement pour les couches de roulement en béton en France (Tableau 11.9). Le comportement à la fatigue de ces bétons a été évalué selon la norme NF 98-233-1, avec 2 types d'essais de flexion. Tous les détails sont donnés dans [Sedran et Le Mouel, 2016]. Quatre gâchées de 90 litres de chaque béton ont été réalisées pour couler :

- 12 éprouvettes trapézoïdales pour l'essai de flexion statique (NF P 98-232-4),
- 24 éprouvettes trapézoïdales testées en fatigue à un nombre de sollicitations proche de s_6 (NF P 98-233-1),
- 8 éprouvettes cylindriques pour les essais de compression (NF EN 12390-3) et de module d'élasticité (NF EN 12390-13).

Tous les essais ont été effectués à environ 95 jours d'âge pour limiter l'influence de l'hydratation du ciment. Le Tableau 11.10 montre que le béton témoin présente des paramètres de fatigue (SN proche de 1 et endurance autour de 0,54) de même ordre que ceux donnés dans [SETRA-LCPC, 1997]. Il confirme également qu'il y a une diminution modérée de l'endurance et une augmentation de l'écart-type lorsque la teneur en GBR augmente.

Tableau 11.9

Formulation des bétons testés

Formule (kg/m ³)	0S0G	50S100G	100S100G
Eau totale	179,5	245	271
Eau efficace	169,1	167,5	176,7
CEMII/A-L 42,5 N	308	385	443
Fillers calcaires	45	50	63
Sable naturel 0/4	747	337	
Gravillons naturels 4/10	256		
Gravillons naturels 6,3/20	785		
Sable de GBR 0/4		337	653
Gravillons de GBR 4/10		229	296
Gravillons de GBR 10/20		615	430
Retardateur		2,7	3,6
Superplastifiant	0,7	2,3	3,5

Tableau 11.10

Résultats mécaniques

	0S0G	50S100G	100S100G
Résistance à la compression à 95 jours (MPa)	44,6	55,7	57
Module d'élasticité à 95 jours (GPa)	37,2	29,5	28,8
σ_0 (résistance au fendage) à ~ 95 jours (MPa)	4,7	4,5	4,0
σ_6/σ_0 à ~ 100 jours (σ_6 correspond à la contrainte qui a généré une fissure à 10^6 cycles)	0,505	0,46	0,48
SN à ~ 100 jours	0,7	0,9	1,2

Afin d'évaluer quantitativement l'impact du recyclage, une structure type correspondant à la planche n° 21 du Catalogue des Structures des Chaussées [SETRA-LCPC, 1998] a été dimensionnée en utilisant les paramètres de fatigue du Tableau 11.10. Cette structure consiste en une couche de béton armé continu (BAC) coulé sur une couche de 5 cm d'enrobé bitumineux de granularité contrôlée de classe 3, posée sur une couche de forme de 120 MPa de portance. Le Tableau 11.11 résume les résultats des calculs en tenant compte d'un trafic de 3 000 camions/jour et par direction. En première analyse,

elle montre que l'intérêt économique et environnemental de la substitution des granulats naturels par des GBR est contrebalancé par une forte augmentation de la consommation en ciment par m² de chaussée. Une analyse plus détaillée est toutefois nécessaire.

Tableau 11.11

Dimensionnement de la chaussée béton pour les trois bétons

	0S0G	50S100G	100S100G
σ_{limite} (contrainte maximale admissible, MPa)	1,26	0,89	0,78
Épaisseur minimale de la couche de béton (cm)	22	27	29
Consommation en ciment (kg/m ²)	68	104	128
Augmentation de la consommation de ciment par rapport au béton de référence (%)	0	53	90

La valeur σ_{limite} est directement liée à SN et à σ_6 . Par conséquent, l'endurance est un paramètre important mais σ_0 aussi. La résistance à la flexion σ_0 a été calculée à partir des proportions du mélange à l'aide des équations suivantes :

$$R_{\text{tb}} = k_t k_g f\left(\frac{E}{C}\right) \text{ [de Larrard, 1999], voir aussi le chapitre 10} \quad (11.18)$$

$$\sigma_0 = 1,44R_{\text{tb}} \text{ ([SETRA-LCPC, 1997])} \quad (11.19)$$

où $f()$ représente une fonction décroissante du rapport E/C et k_g et k_t des paramètres granulaires contrôlant respectivement la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage. La littérature montre que les GBR et les granulats naturels présentent généralement des k_t très similaires. En effet, lorsqu'on les compare aux granulats naturels dont ils sont faits, les GBR ne présentent qu'une diminution limitée (entre 7 et 13 %) de k_t . Cependant, dans le cas particulier de cette étude ([Sedran, 2013]), les GBR affichent un k_t très faible par rapport à celui des granulats naturels, et celui des granulats naturels est plutôt élevé, soit respectivement 0,364 et 0,453 ([Sedran, 2013]). La sélection des granulats faite pour le Projet National RECYBETON a introduit indéniablement un biais, car les granulats naturels et les GBR ne proviennent pas de la même région. Ceci conduit, pour un affaissement et un σ_{limite} donnés, à une forte augmentation de la demande en ciment pour le béton de GBR, par rapport au béton de référence.

Selon l'approche scientifique de formulation présentée au Chapitre 15, il est possible de recalculer la composition théorique et le module d'élasticité des bétons 50S100G et 100S100G pour différents k_t , avec le même affaissement et le même σ_0 que le béton de référence. Par exemple, si l'on prend le même k_t pour les granulats naturels et les GBR, comme le suggèrent les publications,

et que l'on garde les mêmes constantes de fatigue du Tableau 11.10, la surconsommation théorique de ciment tombe à 22 % (83 kg/m²) pour 50S100G et à 39 % (94 kg/m²) pour 100S100G. Si l'on adopte une valeur plus « conservatrice » de $k_t = 0,42$, la surconsommation théorique est respectivement de 30 et 52 %. Dans ce dernier cas, on peut évaluer la surconsommation théorique de ciment à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta C = 0,44 S + 0,08 G \quad (11.20)$$

où S et G représentent respectivement les rapports de substitution massique du sable naturel et des gravillons naturels par des GBR. Cette équation montre que le sable de GBR a une influence plus grande que les gravillons de GBR sur la surconsommation en ciment. De plus, selon ce modèle, la surconsommation serait limitée à 2,4 % pour un béton où seulement 30 % des gravillons naturels sont remplacés par des GBR, comme cela se fait déjà dans plusieurs pays.

11.5.2. Discussion

Les essais réalisés dans le cadre de cette étude confirment que des taux de recyclage élevés (100 % de gravillons, 50 à 100 % de sable) conduisent à une légère détérioration du comportement à la fatigue des bétons de chaussée. En effet, on constate une diminution de l'endurance et une augmentation de l'écart-type SN, qui ne sont pas entièrement compensés par la diminution concomitante du module d'élasticité, dans le dimensionnement de la chaussée. Cependant, les évolutions sont modérées et probablement teintées de dispersion. Avant de généraliser ces résultats, il serait donc nécessaire de les confirmer sur d'autres bétons.

Le dimensionnement de la chaussée réalisé dans le cadre de cette étude montre que des taux de recyclage élevés entraînent une surconsommation importante de ciment par m² de chaussée, ce qui est préjudiciable aux avantages économiques et environnementaux du recyclage. Cependant, il faut noter que le choix des GBR du Projet National RECYBETON a conduit à des valeurs qui sont probablement surestimées, en raison d'un comportement en traction des GBR particulièrement faible, et non en raison d'une forte dégradation du comportement en fatigue des bétons de GBR (i.e. endurance σ_6/σ_0 et écart-type SN). En outre, la communauté technique semble s'orienter vers des taux de recyclage plus faibles (environ 30 % pour les gravillons, pas de sable de GBR), comme prévu par la norme NF EN 206/CN. Cela conduit alors à limiter fortement (autour de 2,5 %) l'augmentation de la demande en ciment pour un affaissement et une résistance à la compression identique. Dans ce cas, les performances en fatigue sont plutôt proches de celle des bétons de granulats naturels, puisque la dispersion des paramètres de fatigue observée dans la présente étude est limitée, et correspond aux valeurs maximales attendues. Toutefois, ce point doit faire l'objet d'un examen plus approfondi.

En conclusion, le comportement à la fatigue des bétons de GBR doit être vérifié plus amplement, mais il ne paraît pas être un facteur bloquant pour le développement d'un recyclage modéré des GBR dans les bétons de chaussée.

11.6. Conclusion

Un état de l'art et des essais expérimentaux sur les déformations différées et le comportement à la fatigue des bétons de GBR ont été réalisés.

L'état de l'art et les essais réalisés dans le cadre du Projet National RECYBETON montrent que le retrait à long terme augmente pour les bétons de GBR, en raison d'une plus grande quantité de pâte de ciment, et selon les caractéristiques des GBR et leur taux de substitution :

- jusqu'à 30 % de substitution des gravillons, l'augmentation est généralement limitée à 10 % ;
- au-delà de 50 %, l'augmentation est plus conséquente. Certaines études font état d'une augmentation de 70 % pour un taux de substitution de 100 %. Cependant, il est important de noter qu'une telle augmentation n'est pas systématique ; + 24 % a été obtenu pour le béton 0S100G testé dans le cadre du Projet National RECYBETON. D'autre part, les bétons industriels utilisés sur le chantier de Chaponost n'ont présenté qu'un retrait double pour le béton entièrement recyclé, par rapport au béton témoin.

Les résultats montrent également que les GBR peuvent jouer un rôle positif en ce qui concerne le retrait endogène, en raison de leur teneur en eau initiale élevée.

Concernant la déformation par fluage en compression des bétons de GBR :

- une augmentation significative (c'est-à-dire supérieure à 35 %) de la déformation totale de fluage a été observée à partir d'un taux de substitution de 20 % des granulats naturels par des GBR (ou encore une augmentation du fluage d'environ 175 % pour une substitution totale des granulats naturels par des GBR, en faisant une extrapolation linéaire) ;
- cependant, la tendance précédente ne peut pas être généralisée à tous les bétons de GBR. [Gomez-Soberon, 2002] indiquent qu'il n'y a pas une augmentation significative du fluage jusqu'à des taux de substitution de 30 %. En fait, un grand nombre de paramètres sont impliqués dans le phénomène de fluage : caractéristiques des GBR (proportion volumique et compacité de la pâte de l'ancien béton, nature du granulats naturel, degré initial de saturation en eau, historique de fluage de l'ancien béton, etc.), proportion volumique de pâte dans le béton de GBR, rapport E/C de la pâte de ciment du béton de GBR, etc.

Les essais effectués sur le fluage en flexion montrent une augmentation d'environ 45 % pour 100 % de GBR, mais la différence est inférieure à 10 % avec 30 % de GBR. La différence avec le fluage en compression peut provenir

ici de la zone en traction au bas de la poutre, qui localise les contraintes dans la pâte de ciment plus abondante dans le béton de GBR. Dans les essais de fluage en compression, l'effet de la quantité de pâte de ciment est moins marqué.

Une étude a également été réalisée pour évaluer l'effet d'un taux de recyclage élevés (100 % de gravillons, 50 à 100 % de sable de GBR) sur la fatigue en flexion, pour les applications en béton de chaussée routière. Les essais effectués semblent confirmer que même le recyclage complet ne conduit qu'à une légère détérioration du comportement à la fatigue du béton, en raison d'une diminution de l'endurance (environ - 5 %) et d'une augmentation de l'écart-type SN (environ + 0,5 en valeur absolue). En conclusion, le comportement en fatigue des bétons de GBR doit encore être plus largement vérifié, mais il ne semble pas être un facteur bloquant pour le développement d'un recyclage modéré dans les bétons de chaussées (taux de recyclage des gravillons autour de 30 %, sans sable de GBR).

Chapitre 12.

Propriétés liées à la durabilité

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

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

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

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

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

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

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

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

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

12.1. Introduction

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

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

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

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

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

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

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

12.2. État de l'art

12.2.1. Propriétés de transport

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

12.2.2. Résistance aux cycles de gel/dégel

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

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

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

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

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

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

12.2.3. Réaction alcalis-silice et GBR

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

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

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

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

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

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

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

12.3. Résultats RECYBETON

12.3.1. Propriétés de transport

12.3.1.1. Procédures expérimentales

12.3.1.1.1. Compositions des bétons

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

Tableau 12.1

Composition des bétons, en kg pour un mètre cube

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

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

Tableau 12.2

Propriétés des granulats

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

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

12.3.1.1.2. Coulage et cure des éprouvettes

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

12.3.1.2. Résultats et interprétation

12.3.1.2.1. Carbonatation et porosité

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

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

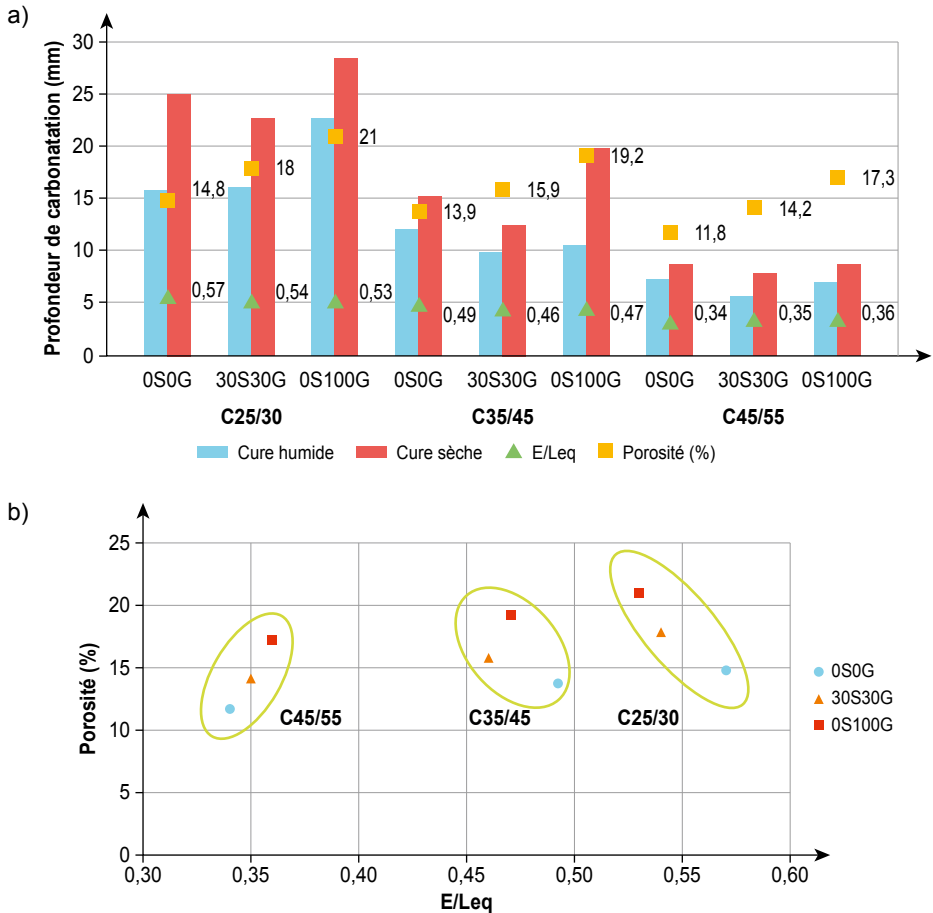
Les résultats confirment le rôle clé du rapport E/L (Figure 12.1-b) : plus ce rapport est élevé, plus la profondeur de carbonatation est grande. Les performances des bétons C45/55 (E/L faible) au regard de la carbonatation sont donc meilleures que celles des bétons C35/45, eux-mêmes meilleures que celles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

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

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

Figure 12.1

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



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

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

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

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

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

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

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

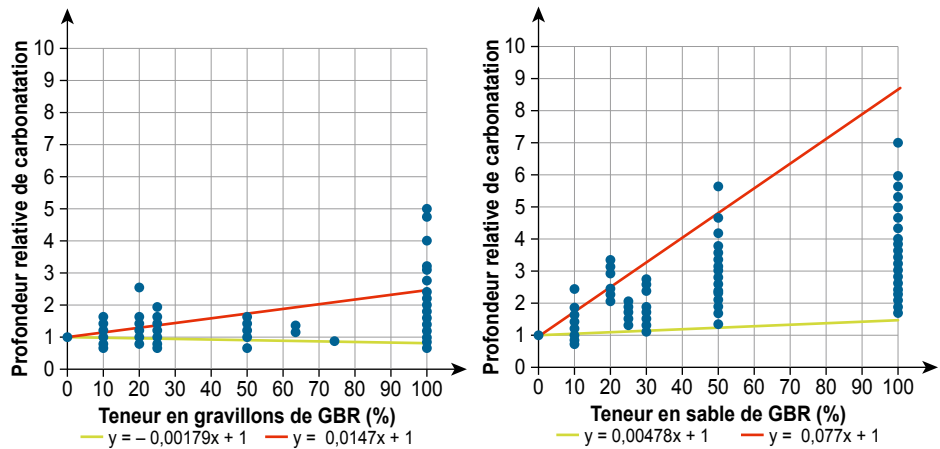
En conclusion, il apparaît que :

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

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

Figure 12.2

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

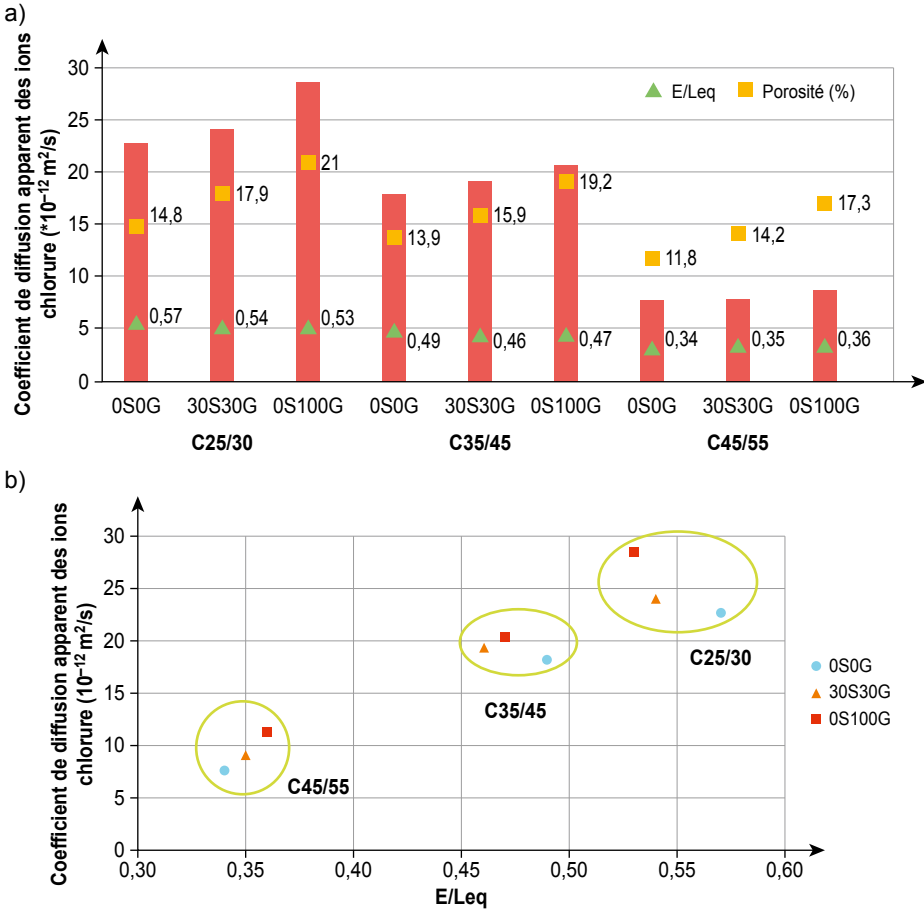


12.3.1.2.2. Migration des ions chlorure

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

Figure 12.3

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



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

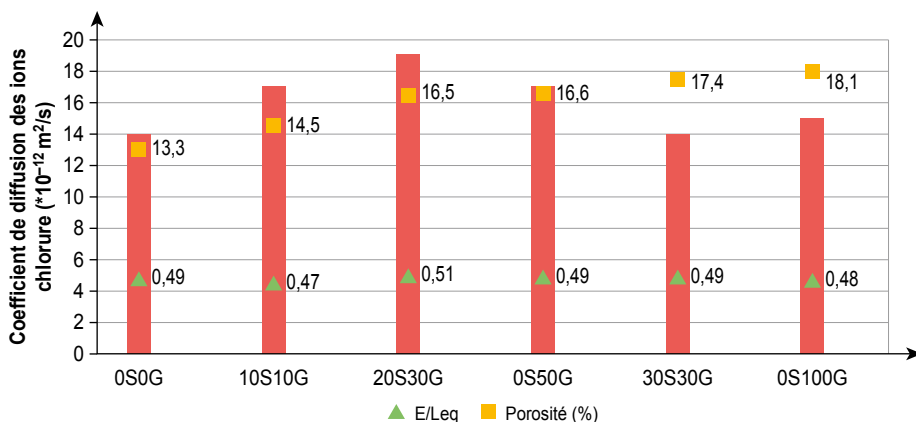
Contrairement aux observations faites lors des essais de carbonatation, l'augmentation du coefficient de diffusion des ions chlorure est plus importante pour les bétons C45/55 que pour les bétons C25/30. Le coefficient de diffusion apparent est plus grand pour la classe de résistance la plus faible mais,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

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

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

Figure 12.4

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



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

En conclusion, il apparaît que :

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

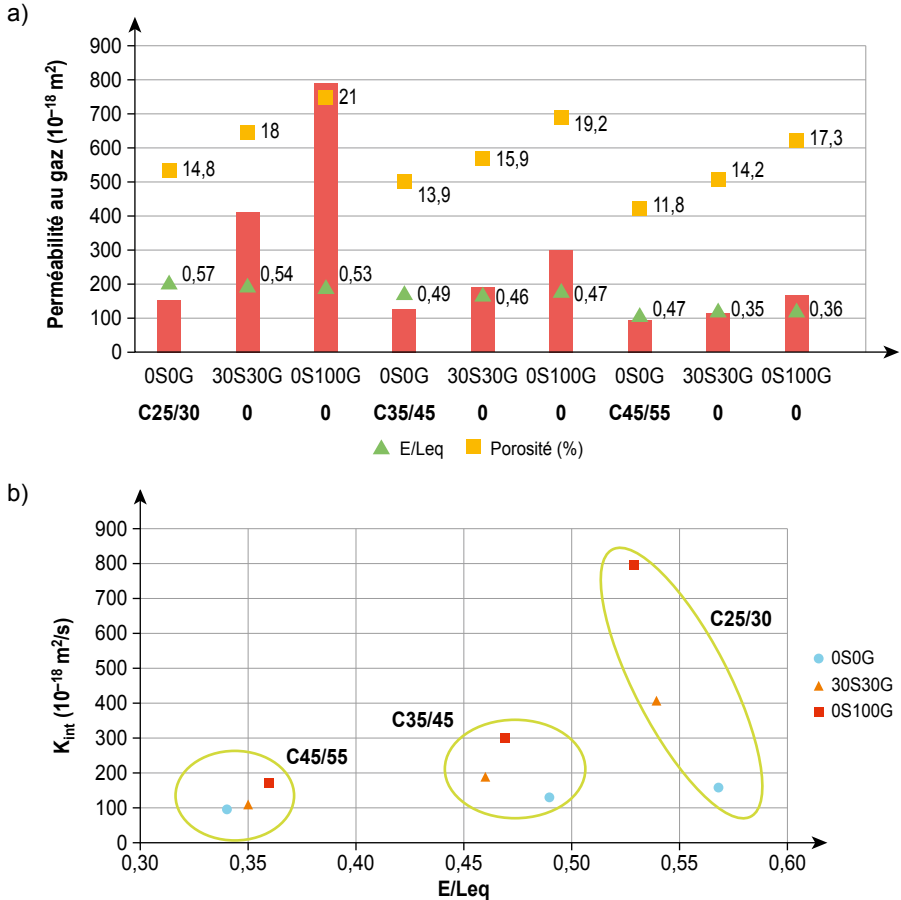
12.3.1.2.3. Perméabilité

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

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

Figure 12.5

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



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

12.3.1.3. Conclusion

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

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

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

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

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

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

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

12.3.2.1. Introduction – Caractéristiques du béton

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

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

Tableau 12.3

Formulation des bétons, pour un mètre cube

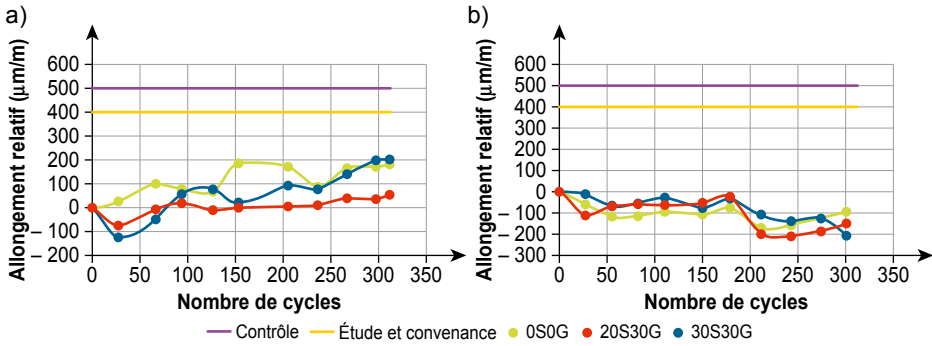
Constituants (kg/m ³)	C 30/37		
	0S0G	20S30G	20S30G
Eau	151	147	154
CEM III/A-L 42,5 N	342	334	350
Fillers calcaires	39	38	40
Sable naturel (0/4)	739	628	535
Sable de GBR (0/4)	0	157	229
Gravillons naturels (4/10)	254	134	157
Gravillons de GBR (4/10)	0	255	281
Gravillons naturels (6,3/20)	777	461	497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

12.3.2.2. Résultats

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

Figure 12.6

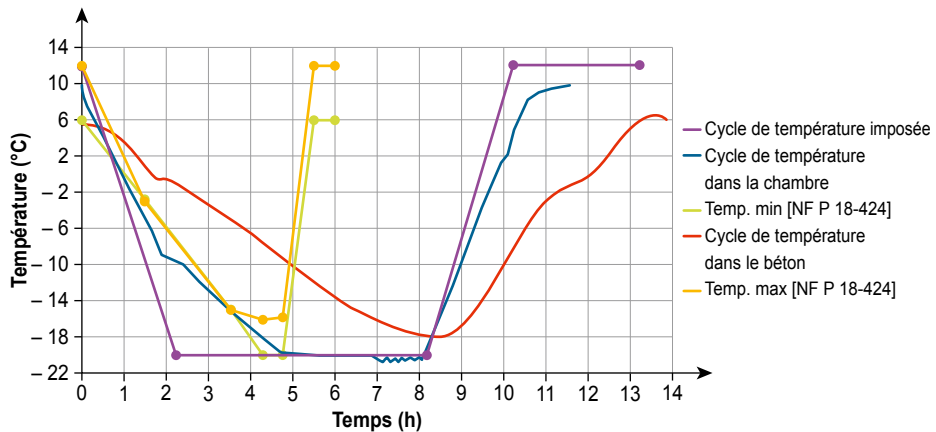
Résistance après 300 cycles de gel/dégel selon la procédure des normes [NF P 18-424, 2008] (a) et [NF P 18-425, 2008] (b)



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

Figure 12.7

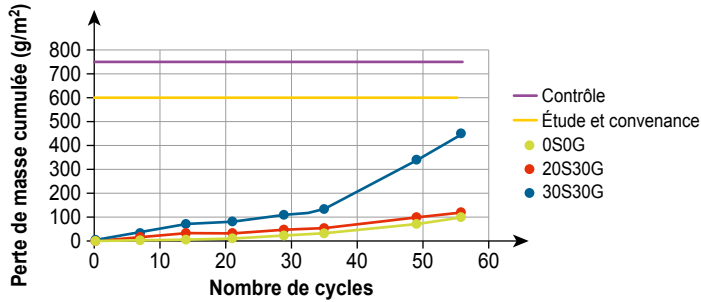
Cycles de gel/dégel imposés dans la troisième méthode, comparés à ceux des normes [NF P 18-424, 2008] et [NF P 18-425, 2008]



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

Figure 12.8

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



12.3.2.3. Conclusion

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

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

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

12.3.3.1. Introduction

Cette étude comprend :

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

12.3.3.2. Alcalins et silice solubles dans les GBR

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

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

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

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

Tableau 12.4

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

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

Tableau 12.5

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

	SR1	SR2	SR3	SR4	Moy.	GR1	GR2	GR3	GR3	GR4	Moy.	
Coupure	mm	0/6	0/6	0/4	0/4	4/20	4/20	4/10	4/20	10/20	4/20	
K ₂ O	mg/kg	596,8	149,9	232,4	227,6	301,7	249,5	140,9	164,5	151,0	56,6	152,5
Taux dissolution	%	7,65	1,43	4,94	2,30	4,1	2,66	1,61	2,95	2,67	0,51	2,1
Na ₂ O	mg/kg	402,6	158,5	246,7	206,9	253,7	147,7	94,6	83,1	76,3	23,4	85,0
Taux dissolution	%	13,42	0,81	16,44	4,14	8,7	4,50	1,85	3,00	2,93	0,36	2,5
Na ₂ O _{eq}	mg/kg	795,3	257,1	399,4	356,7	452,1	311,9	187,3	191,3	175,3	60,7	185,3
Taux dissolution	%	9,78	1,71	8,70	3,10	5,8	3,32	1,72	2,97	2,78	0,44	2,2

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

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

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

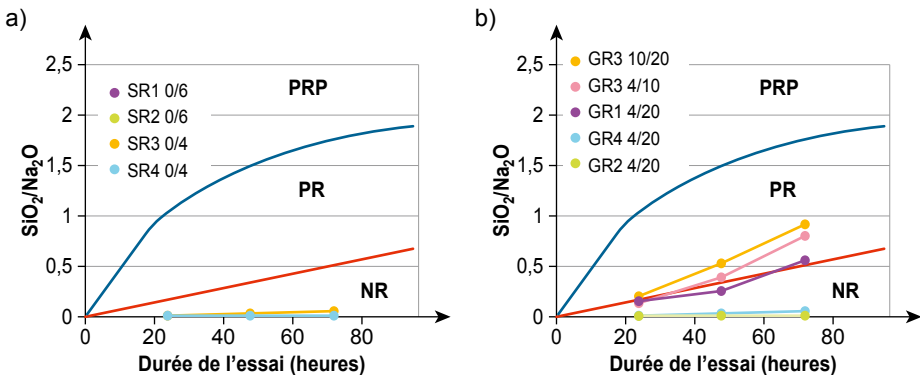
Tableau 12.6

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

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

Figure 12.9

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



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

Tableau 12.7

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

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

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

Tableau 12.8

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

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

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

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

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

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

12.3.3.3. Réactivité potentielle des GBR

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

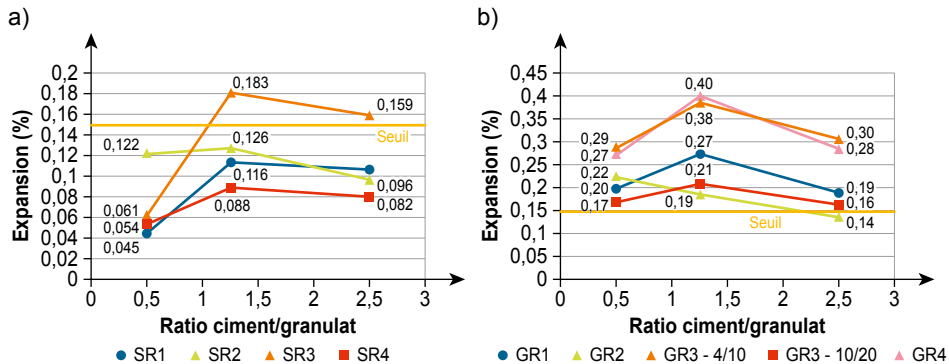
Les essais sur mortier (autoclave) ont été effectués sur la classe 0,16/5 mm obtenue par tamisage des sables et par broyage et tamisage des gravillons de GBR. Les mortiers avaient un rapport eau/ciment égal à 0,5 et des rapports ciment/granulat de 0,5, 1,25 et 2,5 respectivement. À noter que le protocole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

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

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

Figure 12.10

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



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

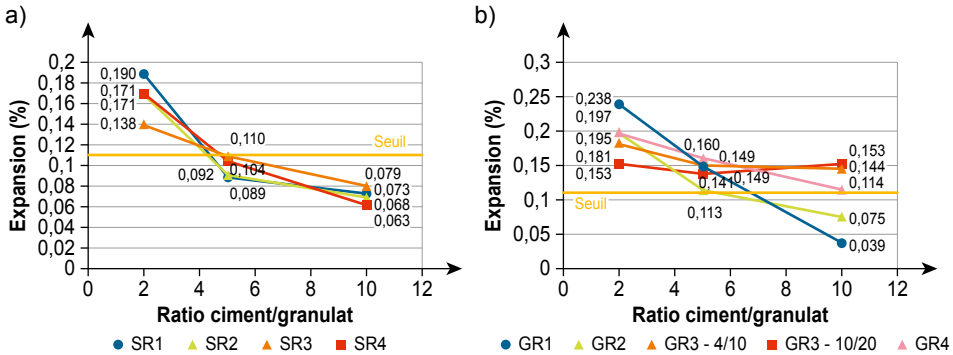
Les essais sur micro-mortier ont été effectués sur la classe 0,16/0,63 mm obtenue par broyage puis tamisage des sables et gravillons de GBR. Les micro-mortiers avaient un rapport eau/ciment égal à 0,3 et des rapports ciment/granulat de 2, 5 et 10 respectivement. Comme précédemment, le protocole normalisé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

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

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

Figure 12.11

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



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

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

12.3.3.4. Béton incorporant des GBR

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

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

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

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

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

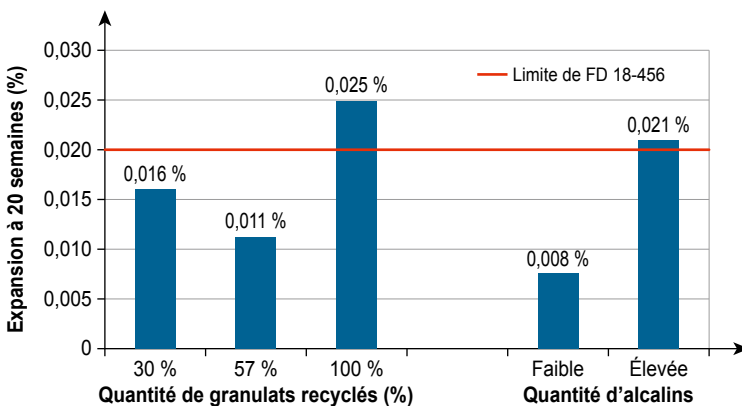
(1) CEM I 52,5R (4 500 cm²/g, 0,76 % Na₂O_{eq}) ; (2) CEM III/A-L 42,5N (11 % de fillers calcaires, 3 700 cm²/g, 0,59 % Na₂O_{eq}) ; (3) 4 600 cm²/g ; (4) cendres calcinées, 16 m²/g, indice d'activité (15 % à 28) : 1,05 ; (5) CaO/SiO₂ : 1,14, 4 300 cm²/g, Na₂O_{eq} solubles dans l'eau : 0,003 % ; (6)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

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

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

Figure 12.12

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



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

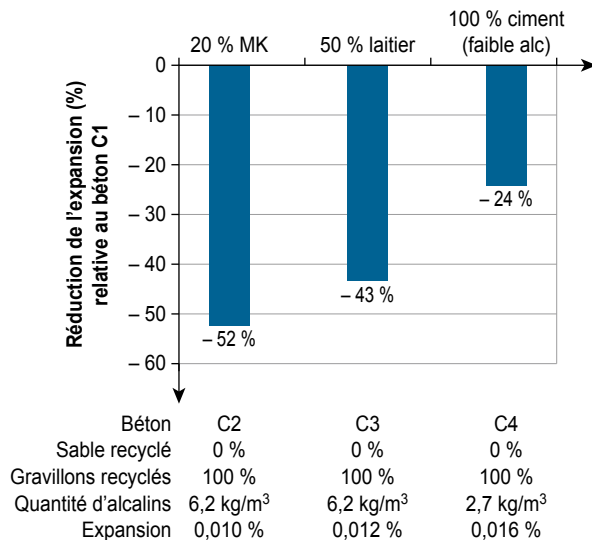
recommandent une valeur maximale de $3,5 \text{ kg/m}^3$, si le liant utilisé contient moins de 60 % de LHF [NF FD P 18-464, 2014]. On peut voir ici que ces valeurs conviennent également pour les GBR.

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

Figure 12.13

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

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



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

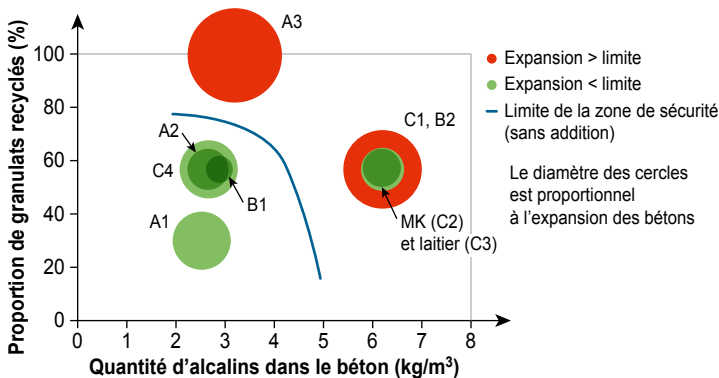
- la présence d'une grande quantité d'alcalins dans le béton limite le taux de substitution des granulats naturels par des GBR ;
- une plus grande quantité de GBR dans le béton implique une diminution de la teneur en alcalins pour rester en dessous de la limite d'acceptabilité de l'expansion.

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

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

Figure 12.14

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



12.3.3.5. Conclusion

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

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

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

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

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

12.3.4.1. Introduction

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

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

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

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

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

12.3.4.2.1. GBR

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

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

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

Tableau 12.10

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

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

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

Tableau 12.11

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

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

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

Tableau 12.12

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

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

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

12.3.4.2.2. Plâtre utilisé comme source de pollution

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

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

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

Tableau 12.13

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

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

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

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

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

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

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

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

Tableau 12.14

Caractéristiques des sables utilisés dans les mortiers

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

12.3.4.4. Résultats relatifs à la formation de l'ettringite

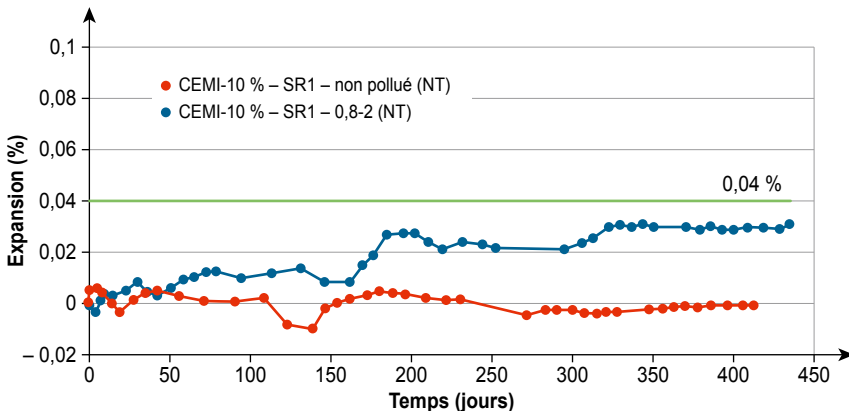
12.3.4.4.1. Analyse des résultats des mortiers incorporant des sables de GBR

Les résultats obtenus sur mortier ont révélé plusieurs points importants.

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

Figure 12.15

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



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

Le deuxième point important concerne l'effet du traitement thermique. Les mortiers ayant subi un traitement thermique présentent un risque plus élevé de formation différée d'ettringite (DEF). Les résultats de la Figure 12.16 relatifs aux mortiers fabriqués avec le sable SR3 et les deux ciments CEM I (1 % et 10 % de C₃A) montrent que la teneur en C₃A (1 % ou 10 %) du ciment n'affecte pas significativement les expansions, quel que soit le taux de pollution par le plâtre. Un faible surcroît d'expansion est observé avec l'augmentation de la teneur en C₃A, mais les comportements restent proches.

La Figure 12.17 présente les expansions des mortiers fabriqués avec le sable de GBR SR1 (CEM I-10 %-SR1). On constate que les éprouvettes développent des expansions importantes qui se stabilisent à des valeurs comprises entre 0,06 et 0,08 % après 400 jours d'essai. Les mortiers fabriqués avec le sable de GBR SR3 (CEM I-10 %) (Figure 12-16) ont montré des expansions beaucoup plus faibles et stabilisées entre 0,03 et 0,05 % après 400 jours d'essai. La teneur en alcalins solubles explique manifestement la différence de comportement entre les mortiers fabriqués avec les sables SR1 et SR3. Leur taux de sulfate soluble dans l'eau sont identiques (Tableau 12.14), mais le sable SR1 libère deux fois plus d'alcalins solubles dans l'eau que le sable SR3 (Tableau 12.10), soit respectivement 795,3 mg Na₂O_{eq}/kg et 399,5 mg Na₂O_{eq}/kg. De nombreux auteurs ont montré que plus les alcalins sont lessivés, plus les phénomènes de RSI sont amplifiés [Aubert *et al.*, 2009 ; Leklou, 2008 ; Aubert *et al.*, 2013]. La teneur en aluminates solubles des sables de GBR peut également expliquer ce phénomène. En effet, plusieurs auteurs ont montré que le risque de RSI augmentait concomitamment à la teneur en aluminates solubles [Odler *et al.*, 1995 ; Hanehara *et al.*, 2008a ; Hanehara *et al.*, 2008b]. La quantité de produits expansifs formés est corrélée à la teneur en aluminates solubles, ce qui influence le taux de dégradation. En valeur absolue, le sable SR1 contient deux fois plus d'alumine que le sable SR3 (Tableau 12.10), mais il faut toutefois déterminer les quantités pouvant être réellement mobilisées dans ces deux sables. La Figure 12.17 montre également l'effet de la finesse (gros et fin) du plâtre. À cet égard, on notera que la plus grande finesse (0/100 μm) du plâtre de déconstruction ajouté au sable SR3 n'a pas une forte influence sur la cinétique et l'amplitude des expansions, quelle que soit la formulation.

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

Figure 12.16

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

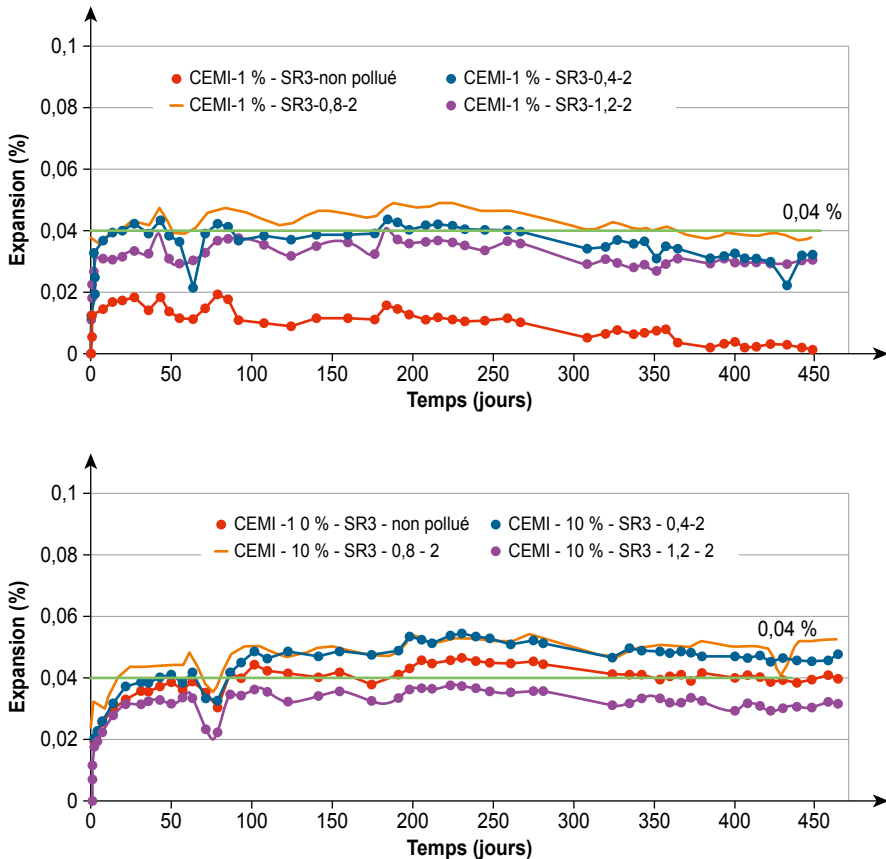
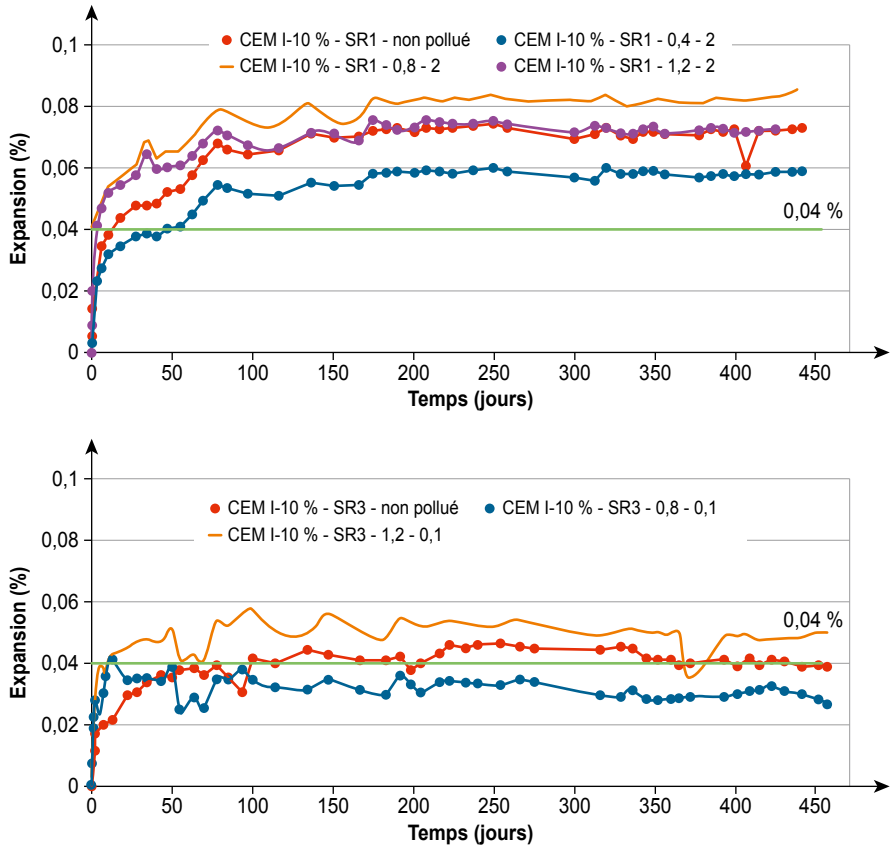


Figure 12.17

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



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

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

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

Tableau 12.15

Compositions des bétons

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

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

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

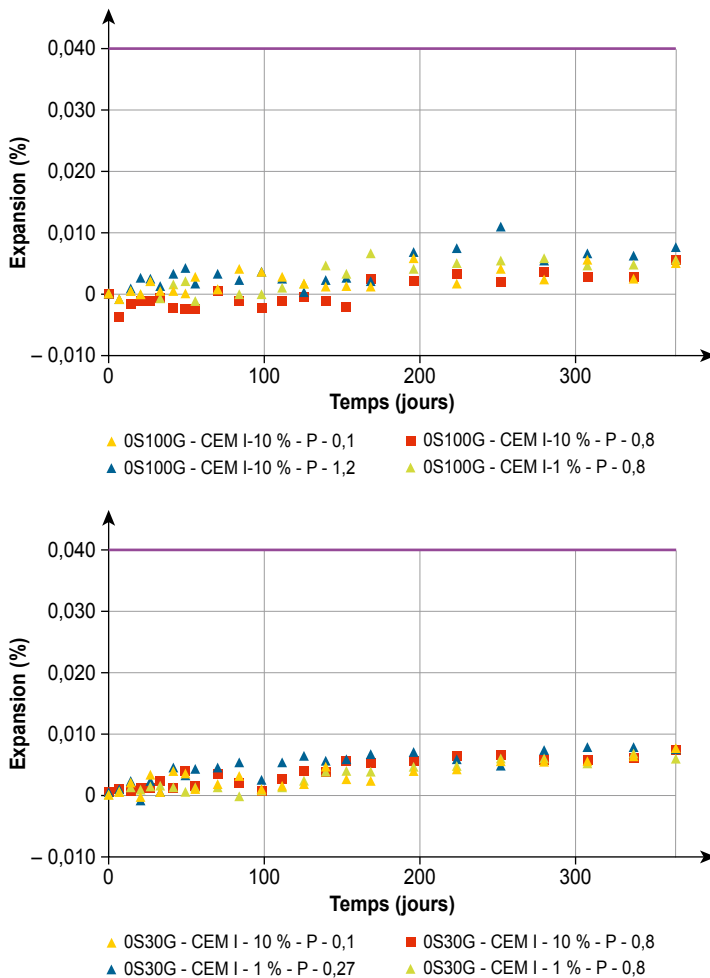
La Figure 12.18 montre l'expansion des bétons fabriqués avec 30 % et 100 % de gravillons de GBR de Paris, et les ciments « CEM I-1 % » et « CEM I-10 % ». Les éprouvettes de béton ont été conservées dans l'eau à 20 °C pendant près d'un an. Leur expansion a été très limitée et inférieure au seuil de 0,04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

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

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

Figure 12.18

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



12.3.4.6. Résultats liés à la formation de thaumasite

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

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

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

Figure 12.19

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

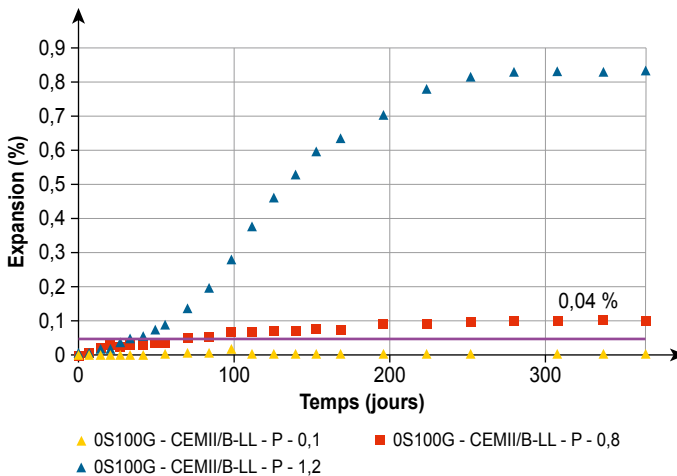


Figure 12.20

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



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

Figure 12.21

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

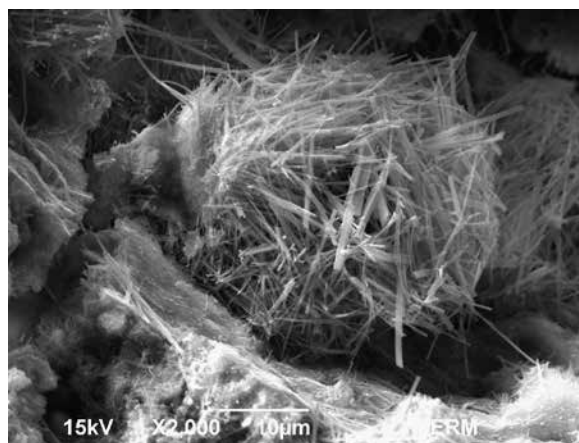
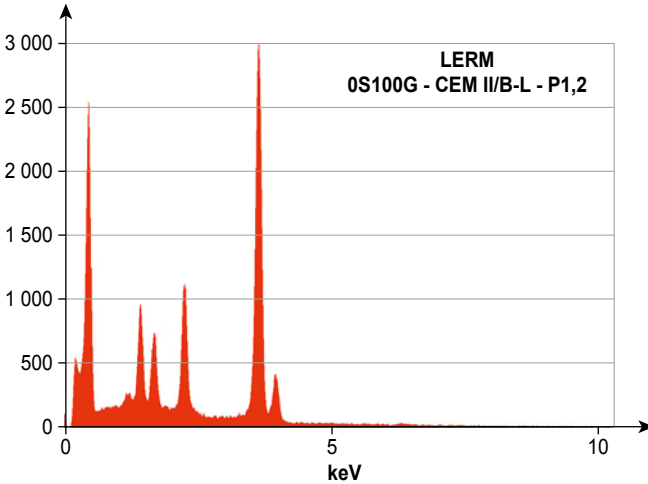


Figure 12.22

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



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

12.3.4.7. Conclusion

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

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

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

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

12.4. Besoins de recherche

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

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

12.5. Conclusion

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

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

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

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

Chapitre 13.

Comportement au feu

F. Robert¹, A.L. Beaucourt², H. Colina³

Résumé – L'incorporation de granulats de béton recyclé (GBR) dans le béton est l'une des voies pour obtenir des bâtiments plus durables. Aujourd'hui, les diverses propriétés des bétons de GBR sont mieux caractérisées, ce qui contribue à leur utilisation dans les projets de construction. Cependant, leur comportement au feu n'a fait l'objet que de recherches limitées.

Le présent chapitre s'intéresse aux propriétés thermo-physiques de deux bétons de GBR où 30 % et 100 % des gravillons naturels ont été substitués par des gravillons de GBR (et 30 % et 0 % du sable naturel par du sable de GBR, respectivement).

Il traite aussi de l'écaillage de ces bétons, évalué sur quatre dalles de dimensions 4,6 m × 1,5 m et 0,20 m d'épaisseur. Deux dalles ont été coulées avec les deux bétons de GBR, et deux dalles avec deux bétons de granulats naturels (siliceux ou calcaires). Les essais ont été réalisés avec une montée en température conventionnelle (ISO 834), en enregistrant le profil thermique à l'intérieur des dalles. Les bétons de GBR ont présenté des écaillages localisés non préjudiciables à la stabilité mécanique. L'origine de ces désordres est reliée à la teneur en eau plus élevée des bétons de GBR, par rapport aux bétons de granulats naturels (+ 0,5 à + 1,5 %). Le gradient thermique au sein des dalles montre que la diffusivité thermique des bétons de GBR est inférieure à celle des bétons de granulats naturels, ce qui est confirmé par des mesures TPS de conductivité thermique.

Par ailleurs, les propriétés thermo-mécaniques, à chaud et résiduelles, des deux bétons de GBR ont été mesurées sur des éprouvettes de diamètre 10 cm et de hauteur 30 cm, à 300 °C et 600 °C (selon les recommandations de la RILEM).

Enfin, la résistance au feu de deux poutres de 4,20 m de longueur a été comparée aux spécifications de l'Eurocode 2-1-2 (essais réalisés selon la norme NF EN 1365-3). Les résultats montrent une bonne concordance avec les modèles de l'Eurocode 2-1-2.

1. CERIB, Epernon.

2. L2MGC, Université de Cergy-Pontoise.

3. ATILH, La Défense, Paris.

13.1. Introduction

13.1.1. Revue de la littérature

Jusqu'à présent, peu de travaux se sont intéressés aux performances des bétons à base de granulats de béton recyclé (GBR) soumis à des températures élevées [Cree *et al.*, 2013]. Lorsque le béton est chauffé, divers phénomènes apparaissent, tels la dilatation des granulats, le retrait de la pâte de ciment, l'augmentation de la pression de vapeur d'eau, la fissuration ou l'écaillage... Les GBR contiennent non seulement des granulats naturels de différentes minéralogies, mais aussi du mortier qui leur confère des propriétés différentes de celles des granulats naturels : ils sont plus poreux, leur coefficient d'absorption d'eau est plus élevé et ils contiennent des hydrates. De plus, les bétons de GBR possèdent en général deux auréoles de transition, l'une située entre le mortier et le granulats naturels originels, l'autre située entre le GBR et la nouvelle pâte de ciment [Liu *et al.*, 2011]. Ces auréoles de transition sont réputées être des zones de faiblesse, en termes de propriétés mécaniques notamment [Behera *et al.*, 2014 ; Scrivener *et al.*, 2004].

Les travaux recensés concernant les bétons de GBR soumis à des températures élevées proposent des conclusions variées [Zega et Di Maio, 2006 ; Xiao *et al.*, 2013 ; Sarhat et Sherwood, 2013 ; Vieira *et al.*, 2011 ; Eguchi *et al.*, 2007 ; Zega et Di Maio, 2009 ; Xiao et Zhang, 2007 ; Liu *et al.*, 2016]. Comme pour les bétons de granulats naturels exposés à de fortes chaleurs, les bétons de GBR présentent eux aussi une altération de leurs propriétés mécaniques, par rapport à leurs propriétés initiales :

- selon les études, les propriétés mécaniques résiduelles des bétons de granulats naturels et des bétons de GBR sont souvent différentes ;
- comme pour les granulats naturels, les GBR provenant de bétons de granulats calcaires présentent de meilleures résistances résiduelles que les GBR provenant de bétons de granulats de silice.

Les désordres thermiques constatés dans ces études sont l'apparition de fissures à partir de 800 °C sur éprouvettes cubiques [Xiao *et al.*, 2013a], et à partir de 600 °C sur éprouvettes prismatiques. Aucun écaillage « explosif » n'est décrit pour les bétons de GBR soumis au protocole ISO 834 [Xiao *et al.*, 2013a ; Sarhat et Sherwood, 2013].

D'une manière générale, les résultats de ces études sont plutôt dispersés, en particulier la relation entre la résistance mécanique résiduelle et le taux de substitution des granulats. Les écarts sont dus *a priori* à des vitesses de montée en température différentes et à la variété minéralogique des GBR. Un travail récent [Laneyrie, 2014] a comparé l'évolution des propriétés résiduelles d'un béton de référence et d'un béton où 100 % des gravillons naturels ont été substitués par des gravillons de GBR, les granulats naturels des GBR étant de même nature minéralogique que les granulats du béton de référence (silico-calcaire de Seine). Les résultats montrent qu'en l'absence de contaminants

dans les GBR (bois, enrobés, etc.), la résistance à la compression des deux types de béton évolue de façon similaire avec la température, alors que la résistance à la traction du béton de GBR diminue plus vite. Le nombre plus élevé d'interfaces dans le béton de GBR favorise probablement l'apparition de fissures, qui altèrent alors la résistance à la traction. Les contaminants non cimentaires ont un impact négatif sur les performances mécaniques résiduelles des bétons de GBR soumis au feu, en provoquant, lorsqu'ils sont pyrolysés, l'apparition de fissures, de défauts et de porosités [Laneyrie *et al.*, 2016].

13.1.2. Granulats, formulation et propriétés mécaniques des bétons

Les granulats naturels et les GBR utilisés dans la présente étude sont ceux du Projet National RECYBETON (voir les annexes). Les gravillons naturels sont des granulats calcaires concassés de Givet, de classes 4/10 et 6,3/20. Le sable naturel est un sable silico-calcaire 0/4 de Sandrancourt. Les GBR ont été produits sur la plateforme de recyclage de la société DLB Gonesse, par concassage de déchets de béton de bâtiments déconstruits. Trois classes granulaires ont été utilisées : 0/4, 4/10 et 10/20. La masse volumique et le coefficient d'absorption d'eau des différents granulats sont donnés dans [Sedran, 2013]. Un ciment Portland (CEM II/A-L 42,5) et un filler calcaire (HP-OG) de masse volumique 3,09 et 2,7 kg/dm³ respectivement ont été utilisés, ainsi qu'un superplastifiant MC Power-Flow 3140. Les GBR ont été pré-saturés 1 % au-dessus de leur coefficient d'absorption d'eau, dans des fûts hermétiques, 48 heures avant le malaxage des bétons.

Tableau 13.1

Résistance à la compression des bétons utilisés dans les différents essais

Résistance à la compression à 28 jours (MPa)				
Type d'essai	Essai d'écaillage	Résistance au feu	Propriétés thermomécaniques	Propriétés thermophysiques
C35/45 0S0G Givet	44 ± 3			
C35/45 0S0G Seine	36 ± 1			
C35/45 30S30G	29* ± 1	32 ± 1	39 ± 2	
C35/45 0S100G	40 ± 2	27 ± 4	34 ± 1	
C25/30 0S0G Givet				29 ± 2
C25/30 30S30G				28,5 ± 0,6
C25/30 0S100G				25 ± 0,6

* 7 jours.

Les deux bétons de GBR référencés C35/45 30S30G et C35/45 0S100G ont servi à couler :

- i) les dalles destinées à évaluer l'écaillage,
- ii) les poutres destinées à tester la résistance au feu et
- iii) les éprouvettes cylindriques qui ont servi à mesurer la résistance à la compression à chaud et la résistance à la compression résiduelle (après refroidissement à température ambiante). La formulation des bétons est celle proposée par le Projet National RECYBETON [Sedran, 2013]. Pour l'étude de l'écaillage, deux autres dalles en bétons témoins C35/45 0S0G (Givet) et C35/45 0S0G (Seine) ont été fabriquées, avec respectivement les gravillons calcaires de Givet et les gravillons siliceux du Val-de-Seine, toujours selon les formulations données dans [Sedran, 2013].

L'étude du comportement thermo-physique des bétons a été faite sur des cylindres 110×220 mm et 150×300 mm, avec les bétons C25/30 0S0G (Givet), C25/30 30S30G et C25/30 0S100G, respectivement.

Les propriétés mécaniques à 28 jours des bétons C25/30 et C35/45 sont données dans le Tableau 13.1. Les résistances à la compression ont été mesurées sur cylindres 110×220 mm.

13.2. Programme expérimental et résultats

13.2.1. Propriétés thermo-physiques

13.2.1.1. Essais

Les propriétés thermiques (conductivité, chaleur spécifique) des bétons ont été mesurées avec une sonde à disque chaud TPS1500. Le système est basé sur la technologie « Transient Plane Source (TPS) » (Source Plan Transitoire). Il a été mise au point à l'Université Technologique de Chalmers (Suède) par Gustafsson [Gustavsson, 1994]. Une sonde en mica (Kapton) d'un rayon de 14,61 mm constituée d'une double spirale très fine en nickel (épaisseur 10 microns) recouverte de deux couches minces de matériaux électriquement isolants est utilisée. La taille maximale des granulats (20 mm) est inférieure au diamètre de la sonde. La sonde est placée entre deux tranches cylindriques du béton étudié, de 40 mm d'épaisseur chacune (prélevées dans une éprouvette 110×220 mm). La surface de chaque tranche doit être parfaitement régulière afin d'éviter les défauts de contact avec le capteur. Après coulage, les éprouvettes ont été placées en cure pendant 90 jours dans des sacs hermétiques, en présence d'une serviette humide. Après découpage, les tranches cylindriques ont été séchées à 80 °C jusqu'à masse constante, puis chauffées dans un four électrique de 5 litres piloté par le logiciel « Hot Disk ». La vitesse de montée en température et de refroidissement était de 1 °C/min. À chaque température cible (30 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C, 450 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C et 600 °C), les mesures des propriétés thermiques ont

été effectuées en conditions isothermes, tant pendant la phase de chauffage que pendant la phase de refroidissement. La conductivité thermique et la diffusivité ont été calculées simultanément dans une démarche itérative, à partir de l'enregistrement transitoire de la température. La chaleur spécifique a été déduite de la diffusivité et de la conductivité. Les résultats présentés sont les valeurs moyennes de trois mesures.

La réponse thermique des cylindres en béton (150 × 300 mm) a également été étudiée à partir de cycles de chauffage/refroidissement à vitesse de 0,5 °C/min, jusqu'à 600 °C. La température à la surface et au sein des bétons a été relevée avec des thermocouples placés en surface, à mi-rayon et au centre des éprouvettes. Les cycles de chauffage/refroidissement ont été réalisés dans un four électrique programmable de taille 1,10 × 1,20 × 1,10 m, contrôlés par un régulateur-contrôleur relié à un thermocouple placé dans le four.

13.2.1.2. Résultats

Ils sont donnés Figure 13.1. À température ambiante, les bétons de GBR présentent une conductivité thermique inférieure à celle du béton témoin ; $1,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $1,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour le béton C25/30 30S30G et C25/30 0S100G respectivement, et $2,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour C25/30 0S0G. Ce différentiel provient de la porosité et du volume de pâte plus élevés dans les bétons de GBR. La conductivité thermique diminue ensuite, à mesure que la température augmente. Dans les matériaux non métalliques, la diminution de la conductivité thermique avec la température est attribuée à la dispersion/excitation des phonons. Mais, dans le cas des bétons, la diminution de la conductivité est aussi liée à l'endommagement, puisque la résistance résiduelle des éprouvettes ayant subi un cycle thermique est inférieure à celle des éprouvettes non chauffées. Parmi les mécanismes d'endommagement potentiellement concernés, on trouve : i) le départ de l'eau liée, puisque la conductivité thermique de l'eau est supérieure ($0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) à celle de l'air ($0,02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ; ii) la diminution des liaisons conductrices, suite à la décomposition des hydrates ; iii) la microfissuration au-delà de 300 °C. La conductivité des bétons 0S0G diminue plus rapidement que celle des bétons de GBR, de sorte que les différences entre les bétons s'estompent avec la température. On retrouve ici le fait que les bétons les plus conducteurs présentent une perte de conductivité plus élevée avec l'élévation de la température [Xing *et al.*, 2015 ; Niry, 2015 ; Yermak, 2015]. La perte moyenne de conductivité thermique pour une augmentation de température de 100 °C est de $0,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour C25/30 0S0G et $0,13$ et $0,12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour C25/30 0S100G et C25/30 30S30G, respectivement. À 600 °C, la conductivité du béton de référence a diminué de 50 % par rapport à sa valeur à 20 °C, et de 55 % par rapport à la conductivité des deux bétons de GBR. Les conductivités sont alors proches pour tous les bétons, et elles se situent dans la fourchette des valeurs rapportées dans la littérature pour la plupart des bétons. Les mesures effectuées lors du refroidissement montrent une hystérésis qui confirme l'irréversibilité des réactions, ou encore que les bétons ont bien été endommagés [Yermak, 2015 ; Yermak *et al.*, 2017 ; Jansson, 2004a ; Jansson, 2004b].

Figure 13.1

Évolution de la conductivité thermique des bétons avec la température, pendant le chauffage et le refroidissement

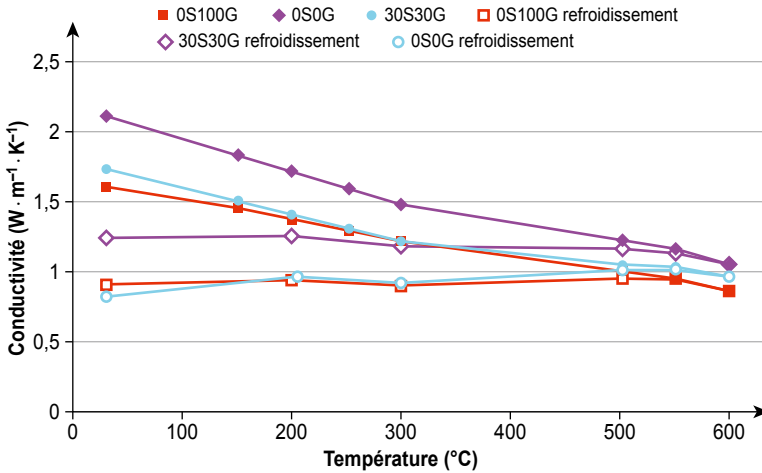
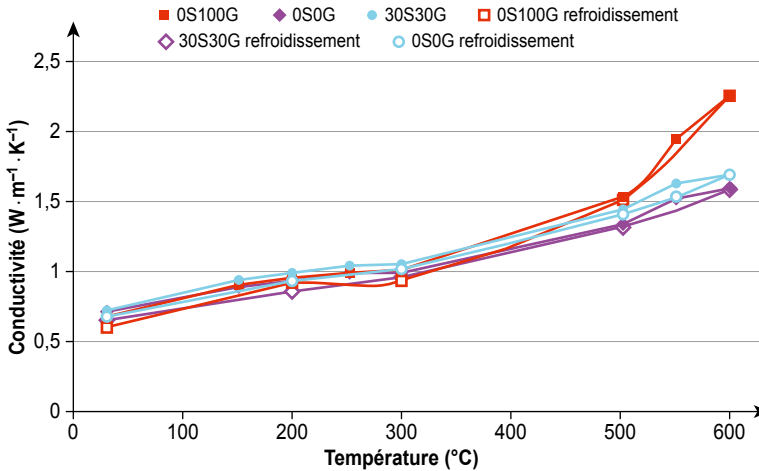


Figure 13.2

Évolution de la chaleur spécifique des bétons en fonction de la température, pendant le chauffage et le refroidissement



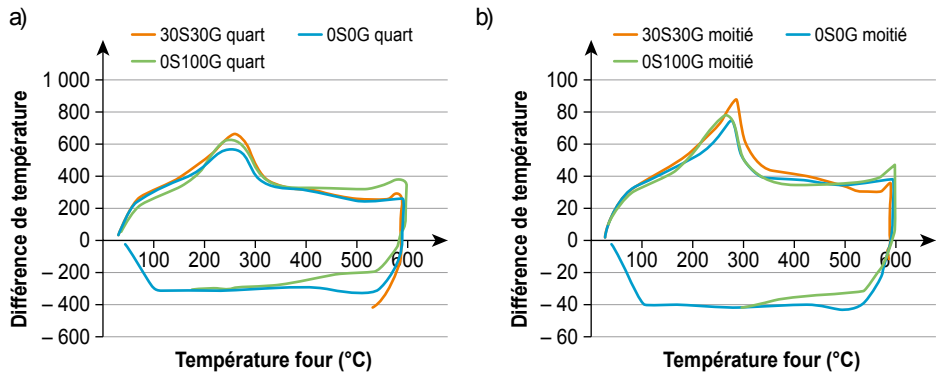
La Figure 13.2 montre l'évolution de la chaleur spécifique pendant la montée en température jusqu'à 600 °C, puis pendant le refroidissement jusqu'à température ambiante. La capacité thermique a été mesurée en conditions isothermes, après que les éprouvettes aient atteint un équilibre hygrothermique. La chaleur spécifique mesurée est alors considérée comme « fondamentale », c'est-à-dire non influencée par la chaleur latente des différentes transformations

physico-chimiques. Les GBR n'ont pas d'influence significative sur la chaleur spécifique fondamentale des bétons. La mesure de la réponse thermique d'une éprouvette de béton a complété cette analyse, et a permis d'évaluer l'influence des GBR sur la consommation de chaleur liée aux transformations physico-chimiques. Les résultats montrent que la chaleur spécifique augmente avec la température et que les différences entre les valeurs mesurées pour 0S0G et 30S30G ne sont pas significatives. Entre 500 °C et 600 °C, la chaleur spécifique du béton de GBR 0S100G croît plus rapidement. Cette évolution a également été observée sur d'autres types de béton [Khaliq *et al*, 2011]. Ici, le phénomène d'hystérésis est beaucoup moins marqué que pour la conductivité thermique. L'augmentation de la capacité thermique avec la température est donc essentiellement liée à des phénomènes réversibles. En effet, la chaleur spécifique dépend fortement des vibrations atomiques, principal mode d'absorption de l'énergie thermique dans les solides. Lorsque la température augmente, l'énergie des vibrations atomiques augmente, ce qui conduit à une chaleur spécifique plus élevée. Par conséquent, la mesure de la capacité thermique résiduelle ne peut se substituer à une mesure à chaud.

Les mesures, pendant la montée en température, de la température de surface (T_{surf}), à mi-rayon ($T_{1/4}$) et à mi-diamètre ($T_{1/2}$) des éprouvettes cylindriques en béton (150 × 300 mm) ont permis de comparer la réponse thermique des trois types de bétons, et d'en déduire la part de chaleur consommée pendant les changements de phase et les transformations chimiques. La Figure 13.3 montre que les différences de température ($T_{\text{surf}} - T_{1/4}$) et ($T_{\text{surf}} - T_{1/2}$) augmentent jusqu'à un pic situé à environ 250 °C et 270 °C respectivement, puis diminuent légèrement, avant une seconde augmentation vers 600 °C. Le premier pic est lié à l'évaporation de l'eau libre et à la décomposition des hydrates. La différence de température maximale, légèrement plus élevée pour les bétons de GBR, en particulier pour C25/30 30S30G, s'explique par le coefficient d'absorption d'eau plus élevé des GBR (les granulats étaient pré-saturés avant le malaxage) et la quantité plus élevée de pâte de ciment. Les deux bétons 30S30G et 0S100G ont presque le même volume de GBR et de pâte de ciment. Le pic le plus élevé observé pour le béton 30S30G peut être relié au coefficient d'absorption d'eau plus élevé du sable de GBR, par rapport à celui des gravillons de GBR et, par conséquent, à une teneur en eau totale plus élevée. Cependant, les différences de température restent assez faibles, comparativement aux pics de température enregistrés sur d'autres bétons de résistances supérieures, contenant un plus grand volume de pâte.

Figure 13.3

Différence de température ($T_{\text{surf}}-T_{1/4}$) (a) et ($T_{\text{surf}}-T_{1/2}$) (b) dans les éprouvettes pendant un cycle de chauffage à 600 °C et refroidissement (0,5 °C/min)



13.2.2. Essais d'écaillage et profils thermiques

Les quatre dalles de dimensions 4,60 × 1,50 × 0,20 m ont été soumises à l'essai thermique conventionnel (ISO 834), pendant une durée de 60 minutes. L'essai a été réalisé selon le protocole de la norme NF EN 1363-1. Les dalles ont été conservées préalablement pendant 90 jours à 50 % HR et 23 °C.

Un relevé manuel (avec une règle) de l'écaillage apparu à la surface exposée au feu a été effectué après essai. Pour chaque dalle, la surface écaillée et la profondeur maximale des éclats de chaque zone ont été relevées. Les résultats sont donnés dans le Tableau 13.2.

Tableau 13.2

Résultats de l'écaillage sur les dalles

Dalle	Béton	Zones	Surface écaillée (cm × cm)	Profondeur maximale d'écaillage (cm)	Commentaires	Teneur en eau	
						Surface	Cœur
D1	C35/45 OS100G	Zone 2+2'	40 × 78	3	3 zones principales	5,5 %	5,8 %
		Zone 8	18 × 18	1			
		Zone 3	45 × 65	2,5			
D2	C35/45 30S30G	Zone 6	25 × 10	2	3 zones localisées	4,4 %	4,9 %
		Zone 1	35 × 20	3			
		Zone 5	55 × 36	2,5			
D3	C35/45 OS0G Seine				Fissures à la surface	4 %	4,9 %
D4	C35/45 OS0G Givet	Zone 4	25 × 18	2	1 zone localisée au centre de la dalle	4 %	4,2 %

Figure 13.4

Surface exposée au feu des dalles après l'essai



Dalle 1



Dalle 2



Dalle 3



Dalle 4

Crédit photo : CERIB.

Les bétons de GBR ont présenté un écaillage superficiel et localisé (éclats de 3 cm de profondeur maximum, sur une surface d'environ 10 % de la surface totale). Cet écaillage peut être relié à la teneur en eau légèrement plus élevée de ces bétons, par rapport aux bétons de granulats naturels (voir Tableau 13.2). Ces éclats ne nuisent pas à la stabilité mécanique de l'élément testé.

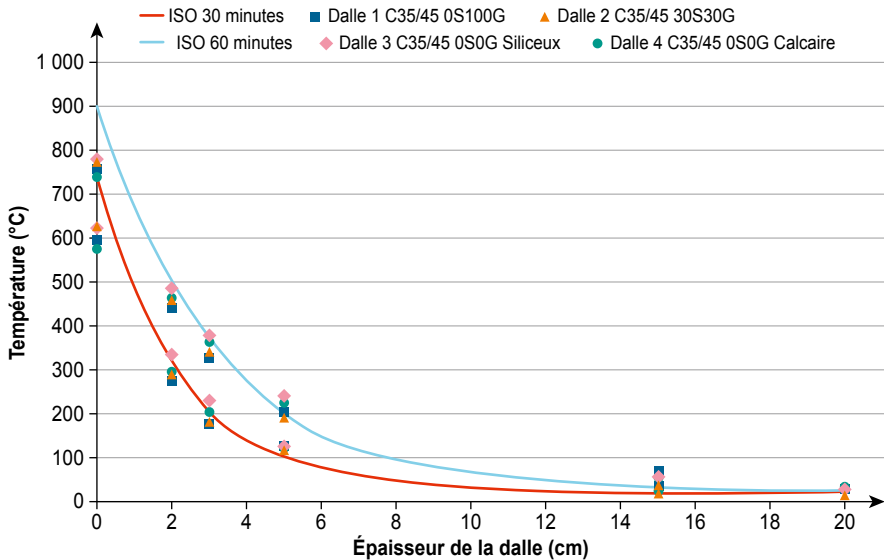
Les températures de chaque dalle ont été relevées à l'aide de 3 séries de thermocouples de type K positionnées dans l'axe longitudinal médian. Chaque série comprenait 5 thermocouples placés dans le béton, à 0 cm (surface exposée), 2 cm, 3 cm, 5 cm et 15 cm. Un thermocouple de surface (de type K) a été positionné sur la face non exposée de chaque dalle.

La Figure 13.5 présente les profils de température enregistrés. Ils sont comparés au résultat d'un calcul effectué selon l'annexe nationale française de l'Eurocode 2-1-2, avec le logiciel CimFeu EC2 (teneur en eau 3 %, masse volumique 2 300 kg/m³). Les points indiqués sont les moyennes des trois thermocouples positionnés à la même profondeur, la dispersion entre ces thermocouples pouvant atteindre jusqu'à 40 °C (elle est en moyenne de 15 °C).

La température au sein des dalles en bétons de GBR est nettement inférieure à celle des dalles en bétons de granulats naturels : à 3 cm de profondeur, la température moyenne dans les bétons de GBR à 30 minutes est de 182 °C pour 216 °C dans les bétons de granulats naturels ; à 60 minutes, la température est respectivement de 338 °C et 370 °C. Ce résultat confirme que la conductivité thermique des bétons de GBR est bien inférieure à celle des bétons de granulats naturels, et que le calcul du transfert de chaleur selon l'Eurocode 2-1-2 peut alors s'appliquer.

Figure 13.5

Profils de température dans les dalles à 30 minutes et 60 minutes



13.2.3. Propriétés thermo-mécaniques

Les essais ont été réalisés selon les recommandations TC 129-MHT de la RILEM [Rilem, 1995] sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 10 cm et de hauteur 30 cm. Les éprouvettes ont été conservées 6 mois à 50 % HR et 23 °C. Pour chaque essai, un préchargement égal à 20 % de la résistance à la compression mesurée à température ambiante (20 °C) a été appliqué sur l'éprouvette, puis maintenu pendant toute la durée du traitement thermique. La vitesse de préchargement était de 0,5 MPa/seconde.

La montée en température a été de 1 °C/minute.

Lorsque la température d'essai était atteinte, elle a été stabilisée pendant :

- 2 heures pour les essais à 300 °C ;
- 1 heure pour les essais à 600 °C.

Lorsque l'essai comportait des mesures résiduelles, l'éprouvette a été refroidie en 12 heures, après l'étape de stabilisation. À la fin de l'étape de stabilisation, ou après 12 heures de refroidissement, la charge a été augmentée jusqu'à la ruine de l'éprouvette (vitesse de 0,5 MPa/seconde).

Quatre éprouvettes ont été testées à 20 °C et deux pour chaque température d'essai (la dispersion à haute température étant inférieure à celle de la température ambiante, ainsi seules deux éprouvettes sont couramment testées à haute température pour un même point).

Les résultats à 20 °C, 300 °C et 600 °C et les rapports correspondants sont présentés dans le Tableau 13.3 et la Figure 13.6.

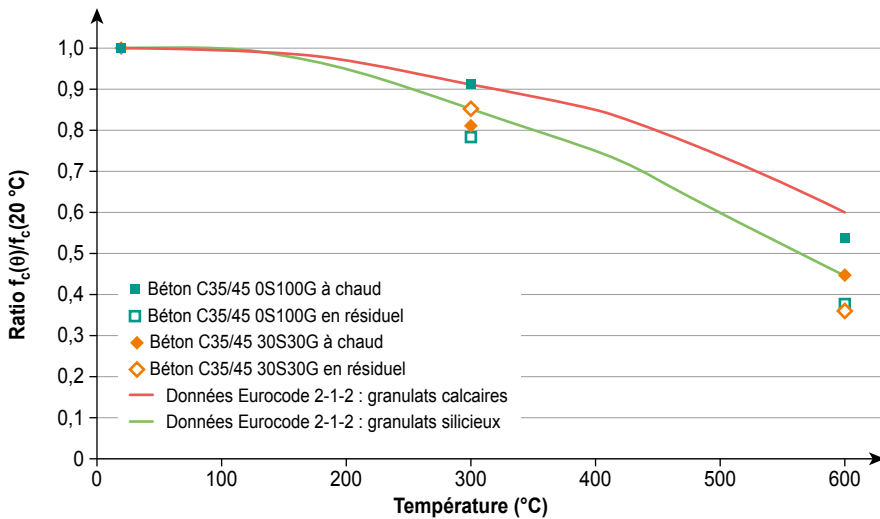
Tableau 13.3

Résistance à la compression et rapports $[f_c(\theta)/f_c(20\text{ °C})]$

Béton	À 20 °C	À 300 °C		À 600 °C	
		Chaud	Résiduel	Chaud	Résiduel
C35/45 0S100G	34,4 ± 0,9 [1]	28,1 ± 0,3 [0,82]	29,4 ± 0,0 [0,85]	15,3 ± 1,0 [0,45]	12,5 ± 0,4 [0,36]
C35/45 30S30G	39,3 ± 1,9 [1]	36,1 ± 0,3 [0,92]	30,8 ± 1,4 [0,78]	21,0 ± 0,3 [0,54]	14,8 ± 1,6 [0,38]

Figure 13.6

Rapport $f_c(\theta)/f_c(20\text{ °C})$ et comparaison avec les calculs selon la norme EN 1992-1-2



Ces résultats montrent que le coefficient $k_c(\theta)$ utilisé pour décrire la diminution de la résistance caractéristique f_{ck} du béton à base des granulats siliceux peut être retenu pour dimensionner les ouvrages utilisant des bétons de GBR. Par ailleurs, les performances du béton 30S30G sont meilleures que celles du béton 0S100G (environ 10 % en valeurs relatives). Ces observations devraient cependant être confirmées avec d'autres types de GBR.

13.2.4. Essais de résistance au feu

13.2.4.1. Description des poutres testées

Les poutres (portée 4,20 m ; sections de 30 × 40 cm) ont été conçues pour un immeuble de bureaux (G = poids propre +1 kN/m², soit G = 1,5 kN/m²).

L'enrobage des armatures transversales en sous-face est de 10 mm. Donc, compte tenu de la section des barres, la distance à l'axe des armatures longitudinales est de 26 mm. D'après les données tabulées de la norme EN 1992-1-2 (Tableau 5.5) les poutres sont alors classées R60.

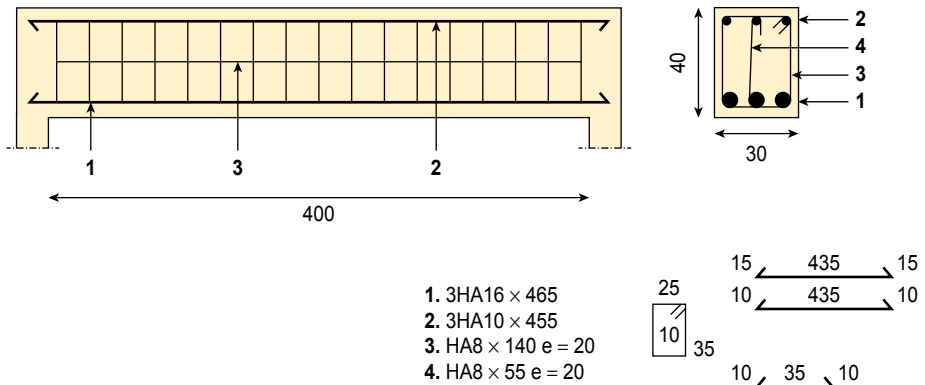
Avant essai, les poutres ont été conservées 90 jours à 50 % HR et 23 °C.

Deux poutres ont été testées mécaniquement en conditions ambiantes.

Deux poutres ont été testées mécaniquement après un traitement thermique de 60 minutes, appliqué selon la courbe température/temps conventionnelle (NF EN 1363-1 et NF EN 1363-3). Pendant l'essai au feu, la combinaison G + 0,5G a été appliquée (soit un moment isostatique de 66,15 kN · m). À la fin de l'essai, une charge « accidentelle » additionnelle de 9,45 T a été appliquée à l'aide de deux vérins symétriques positionnés à 0,69 m du centre. La charge a ensuite été augmentée jusqu'à la rupture.

Figure 13.7

Armature des poutres



13.2.4.2. Résultats des essais des poutres testées en conditions ambiantes

Les poutres en béton de GBR C35/45 OS100G et 30S30G se sont rompues à 18,1 T et 17,1 T respectivement (soit un moment fléchissant respectif de 126,6 kN · m et 119,9 kN · m).

D'un point de vue analytique, en prenant un coefficient de sécurité des matériaux égal à 1, le moment fléchissant maximum calculé est de 108,3 kN · m.

13.2.4.3. Résultats des essais des poutres testées au feu

Les poutres en béton de GBR C35/45 0S100G et 30S30G se sont rompues à 15,2 T et 16,6 T, (moment fléchissant de 106,4 kN · m et 116,2 kN · m), respectivement.

Le logiciel CimFeu donne un moment fléchissant résistant de 69,70 kN · m à 60 minutes.

Les moments résistants obtenus expérimentalement (et les rapports $M_{R,fi}/MR$), à la fin des essais, sont supérieurs à ceux calculés selon l'Eurocode 2-1-2.

Figure 13.8

Poutre 0S100G après essai



Crédit photo : CERIB.

Figure 13.9

Poutre 30S30G après essai



Crédit photo : CERIB.

Figure 13.10

Déplacement vertical au milieu de la poutre durant l'essai au feu

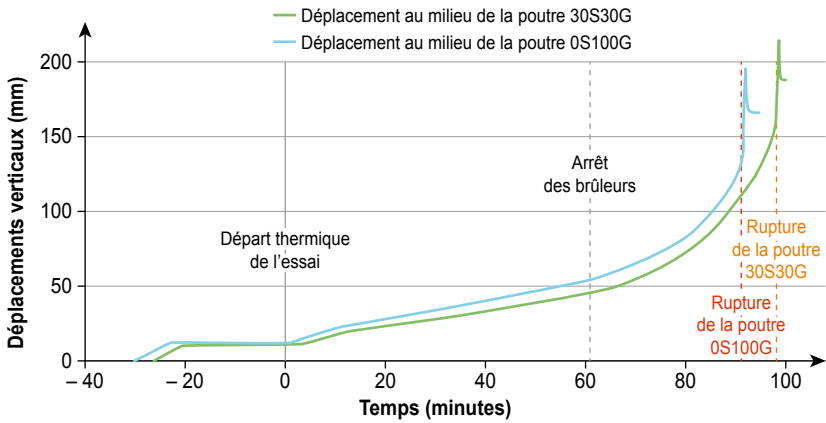
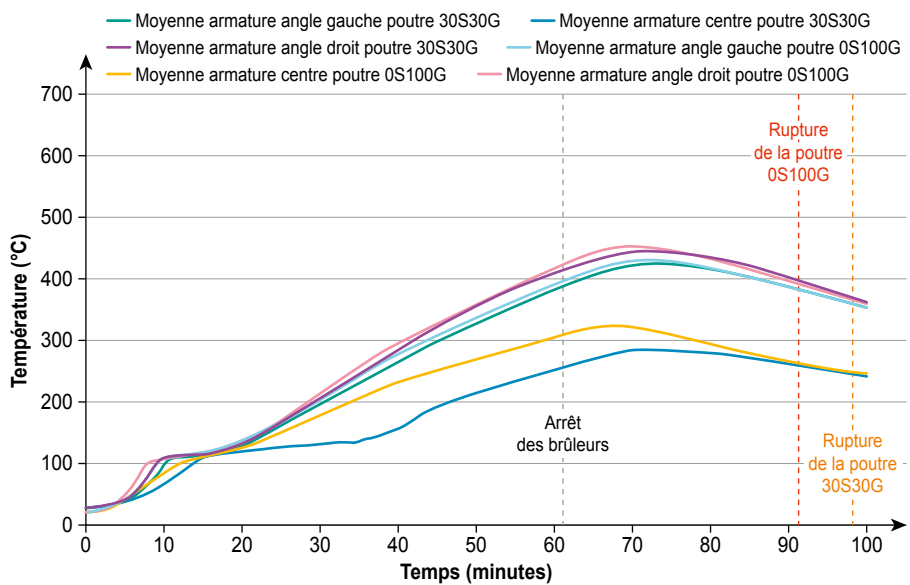


Figure 13.11

Température des armatures dans les poutres



13.3. Conclusions

Deux bétons contenant 30 % et 100 % de gravillons de GBR (et 30 % et 0 % de sable de GBR respectivement) ont été fabriqués pour étudier le comportement au feu des bétons de GBR. Le béton C25/30 a servi à tester les propriétés

thermo-physiques et le béton C35/45 à tester l'écaillage, ainsi que la résistance au feu et les propriétés thermomécaniques. Pour les essais d'écaillage et les propriétés thermo-physiques, des bétons témoins de la même classe de résistance ont été fabriqués également. Quatre dalles ont été coulées pour les essais d'écaillage, dont deux dalles témoins avec deux types de granulats naturels, et quatre poutres pour l'essai de résistance au feu (deux pour les essais en conditions ambiantes et deux pour les essais en conditions d'incendie).

Les conclusions suivantes peuvent être tirées à l'issue de cette étude :

- les bétons de GBR présentent des valeurs de conductivité thermique inférieures à celles des bétons de granulats naturels, différence expliquée par la porosité et par le volume de pâte plus élevés des bétons de GBR. La conductivité des bétons témoins diminue plus rapidement avec l'augmentation de la température, mais les valeurs de tous les bétons testés se rejoignent vers 600 °C. À cette température, la conductivité se situe dans la fourchette des valeurs recensées dans la littérature pour la plupart des bétons ;
- les GBR n'ont pas d'influence importante sur le pouvoir calorifique spécifique des bétons. La chaleur spécifique augmente avec la température et la différence entre la valeur mesurée pour le béton témoin et celle pour le béton de GBR 30S30G n'est pas significative ;
- les dalles contenant les bétons de GBR ont montré un écaillage superficiel et localisé (profondeur maximale de 3 cm, sur une surface d'environ 10 % de la surface totale), qui ne nuit pas à la stabilité de l'élément testé. L'origine de cet écaillage est *a priori* reliée à la teneur en eau légèrement plus élevée des bétons de GBR, par rapport aux bétons de granulats naturels ;
- les poutres en béton de GBR, testées pendant 60 minutes selon la courbe température/temps conventionnelle, présentent à la fin des essais des moments résistants expérimentaux (et des rapports $M_{R,fi}/M_R$) supérieurs à ceux calculés selon l'Eurocode 2-1-2.

On peut alors conclure que les bétons de GBR, par rapport aux bétons traditionnels, ont un bon comportement au feu, en particulier le béton 30S30G. Ces résultats devraient cependant être confirmés avec d'autres GBR, afin de les introduire dans les normes dédiées (Eurocode 2-1-2).

Partie V.

Formulation du béton recyclé

Thierry Sedran¹

Cette partie débute par un chapitre (chapitre 14) qui décrit la façon dont les bétons de granulats de béton recyclé (GBR) sont pris en compte dans la normalisation actuelle des bétons. Il s'intéresse principalement au contexte européen, et parfois plus spécifiquement au contexte français. Il montre que le manque de connaissances, notamment en matière de durabilité des bétons de GBR, a conduit à une approche conservatrice, qui limite fortement le taux de recyclage.

Le chapitre 15 s'intéresse aux méthodes de formulation des bétons de GBR, sans prendre en compte leur durabilité dans un premier temps. Les propriétés particulières des GBR (absorption d'eau, compacité, résistance mécanique, etc.) et les conséquences qualitatives sur la formulation du béton sont tout d'abord rappelées. Dans un deuxième temps, il est montré que pour un jeu d'exigences simples limitées à la résistance à la compression et à l'affaissement, et pour un taux de recyclage fixé *a priori*, une méthode empirique de type Dreux-Gorisse, très utilisée en France, peut être adaptée pour obtenir une formulation approximative d'un béton de GBR. Cependant, l'objectif est souvent d'optimiser le taux de recyclage, afin que le gain, qu'il soit économique ou environnemental, soit maximisé. Dans ce cas, les méthodes expérimentales sont trop lourdes et trop imprécises. Une approche plus scientifique est alors proposée, reliant compacité et propriétés, pour optimiser la teneur en GBR et sélectionner les scénarii de recyclage optimaux. Ce processus de formulation des bétons doit être complété par une approche prescriptive pour assurer la durabilité, en tenant compte du taux de recyclage, ou mieux par une approche performantielle. Les recherches résumées dans le chapitre 12, partie IV (« Propriétés liées à

1. Ifsttar, Nantes.

la durabilité ») devraient aider à identifier à l'avenir les critères et les seuils adaptés à la durabilité des bétons de GBR.

Le chapitre 16 est consacré à un chantier réalisé en 2005, pionnier dans le contexte français, ayant démontré la faisabilité d'un recyclage complet et localisé, sept ans avant le début du Projet National RECYBETON. Il concerne la démolition partielle d'une usine de traitement des eaux en béton et sa reconstruction avec les GBR produits sur place. Ce chapitre décrit l'analyse des normes existantes à l'époque, la caractérisation des granulats, le processus de formulation d'un béton C25/30 contenant entre 90 et 100 % de GBR (y compris la fraction fine), et les résultats du contrôle qualité. Au moment de la rédaction de ce livre (2018), l'ouvrage n'a montré aucune pathologie particulière.

Chapitre 14.

Spécifications des bétons de GBR

W. Pillard¹, T. Sedran², P. Rougeau³

Résumé – Selon la norme européenne EN 206, les spécifications d'un béton définissent l'ensemble des exigences techniques documentées qui sont imposées au producteur de béton, en termes de performances ou de composition, y compris pour les constituants. Cette norme prend en compte l'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR), mais de façon différente des règlements nationaux (voir chapitre 34). Néanmoins, les deux approches sont comparables et elles couvrent deux aspects ; la qualité des granulats et le type de béton.

Le présent chapitre détaille les normes françaises qui traitent de l'utilisation des GBR dans le béton. Une approche sécuritaire a été adoptée jusqu'à présent, en raison notamment du manque de connaissances sur la durabilité des bétons incorporant des GBR. Ainsi, le recyclage est limité pour les gravillons, et le plus souvent prohibé pour les sables de GBR.

Le Projet National RECYBETON a été entrepris afin d'apporter des réponses aux nombreuses questions concernant les GBR et les bétons de GBR. Les résultats significatifs obtenus doivent permettre de faire évoluer les normes, en prolongement naturel des travaux.

14.1. Introduction

Durant la dernière décennie, l'épuisement des ressources naturelles et les règlements environnementaux contraignants ont conduit à devoir chercher à utiliser les Déchets de Construction et de Démolition (DCD) comme granulats alternatifs pour la construction. L'utilisation de granulats de béton recyclé (GBR) dans le béton est une solution économique intéressante pour valoriser au mieux les DCD. Néanmoins, les GBR présentent des caractéristiques différentes de celles des granulats naturels (GN). Par conséquent, les performances des bétons incorporant des GBR sont aussi différentes de celles des bétons traditionnels (voir les parties I, III et IV du présent livre). Il faut alors tenir compte des spécificités des GBR dans les normes et les usages. Par exemple,

1. EGF.BTP, Paris.

2. IFSTTAR, Nantes.

3. CERIB, Epernon.

les propriétés mécaniques comme le module d'élasticité, le retrait et le fluage des bétons de GBR sont modifiées, de sorte que leur utilisation dépend du type d'ouvrage. Ainsi, pour les bâtiments, des dispositions constructives adaptées permettent de s'affranchir de ces modifications. En revanche, pour certaines structures (les ponts par exemple), elles sont essentielles et le projeteur a besoin de connaître leur évolution avec le taux de substitution de GBR. Plus généralement, en France, en raison du manque de connaissances pour garantir la durabilité, le maintien de la sécurité et des exigences imposées aux éléments en service, l'utilisation des GBR est fortement limitée par les normes. C'est pourquoi, l'emploi des GBR restent encore cantonné à des applications ordinaires, telles les plateformes des chaussées, malgré le potentiel intéressant que ces granulats ont montré suite aux nombreuses études menées ailleurs dans le monde, et les normes plus permissives adoptées dans d'autres pays.

Dans ce contexte, l'un des principaux objectifs du Projet National RECYBETON a été d'améliorer la connaissance sur les propriétés et la durabilité des bétons de GBR, afin de pouvoir proposer des modifications normatives permettant d'utiliser ces ressources dans les ouvrages, et de rassurer les Maîtres d'Ouvrage.

Pour comprendre la démarche et le déroulement du Projet National RECYBETON, il est nécessaire de bien connaître l'architecture des normes françaises existantes. Cette connaissance est aussi nécessaire en amont du processus de formulation des bétons de GBR, pour établir des spécifications pertinentes (voir chapitre 15). Dans ce but, le présent chapitre a recensé l'ensemble des normes et règlements français. Il est complété par une enquête conséquentielle portant sur les dispositions européennes et internationales, présentées dans le chapitre 34.

14.2. État de l'art

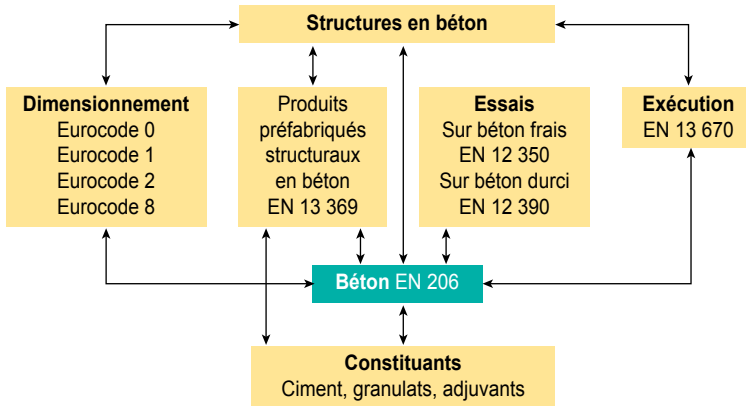
Pour les ouvrages en béton, l'objectif majeur est la durabilité, c'est-à-dire la capacité à répondre, pendant la durée de service, aux exigences pour lesquelles l'ouvrage a été conçu. La Figure 14.1 montre les interconnexions entre les normes européennes dédiées respectivement à la conception (Eurocodes), au béton (EN 206), aux produits préfabriqués en béton (EN 13369) et à l'exécution des ouvrages en béton (EN 13670). La garantie d'une durabilité acceptable pour l'ouvrage implique que tous ces textes soient cohérents entre eux, afin que les propriétés du béton intègrent l'ensemble des informations pertinentes issues des différentes normes.

En Europe, l'organisation générale de la normalisation se traduit par des normes européennes accompagnées de dispositions nationales. Par exemple, en France, la norme EN 206 traitant du béton est transposée en norme NF EN 206/CN.

Les paragraphes suivants détaillent les différents textes dans leur version actuelle.

Figure 14.1

Organisation générale des normes européennes garantissant la durabilité des ouvrages en béton



14.2.1. Granulats pour béton selon la norme européenne EN 12620 et dispositions nationales selon la norme NF P 18-545

La norme européenne fixant les spécifications des granulats pour béton est l'EN 12620. C'est une norme harmonisée dans laquelle les GBR sont classés en termes de constituants (Rc, Ru, etc., voir ci-dessous) et, comme pour les granulats naturels (GN), en termes de propriétés seuils (mesurées selon des essais normalisés). Le Tableau 14.1 donne les catégories normalisées de GBR dans lesquelles :

- Rc désigne le béton, les produits en béton, le mortier et les éléments de maçonnerie ;
- Ru désigne les granulats non liés, la pierre naturelle, les granulats traités aux liants hydrauliques ;
- Rb désigne les éléments en argile cuite (ex. : briques et tuiles), les éléments en silicate de calcium, le béton cellulaire non flottant ;
- Ra désigne les matériaux bitumineux ;
- Rg désigne le verre ;
- FL désigne les matériaux flottants en volume ;
- X désigne les autres constituants, tels les matériaux cohérents (par exemple, argile, sol), les métaux (ferreux et non ferreux), le bois, les matières plastiques et le caoutchouc non flottants, le plâtre.

Tableau 14.1

Catégories normalisées des gravillons recyclés dans la norme EN 12620, sur la base de leur composition selon la norme [NF EN 933-11, 2009]

Constituants	Teneur (en % massiques)	Catégories
Rc	≥ 90	Rc ₉₀
	≥ 80	Rc ₈₀
	≥ 70	Rc ₇₀
	≥ 50	Rc ₅₀
	< 50	Rc _{déclarée}
	No requis	Rc _{NR}
Rc + Ru	≥ 95	Rcu ₉₅
	≥ 90	Rcu ₉₀
	≥ 70	Rcu ₇₀
	≥ 50	Rcu ₅₀
	< 50	Rcu _{déclarée}
	No requis	Rcu _{NR}
Rb	≤ 10	Rb ₁₀₋
	≤ 30	Rb ₃₀₋
	≤ 50	Rb ₅₀₋
	> 50	Rb _{déclarée}
Ra	≤ 1	Ra ₁₋
	≤ 5	Ra ₅₋
	≤ 10	Ra ₁₀₋
X + Rg	≤ 0.5	XRg _{0.5-}
	≤ 1	XRg ₁₋
	≤ 2	XRg ₂₋
FL	≤ 0.2	FL _{0.2-}
	≤ 2	FL ₂₋
	≤ 5	FL ₅₋

En France, la codification des GBR se fait selon la norme [NF EN 12620+A1, 2008], complétée par les dispositions nationales de la norme [NF P 18-545, 2011]. Pour pouvoir être utilisés dans le béton, les GBR doivent respecter au moins les spécifications de ces deux normes, mais des contraintes supplémentaires sont imposées par la norme [NF EN 206/CN, 2014] (voir plus loin). Les principaux essais normalisés qui présentent un intérêt particulier pour la classification des GBR sont :

- [NF EN 1097-6, 2014] : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau ;
- [NF EN 1744-1+A1, 2014] : Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats – partie 1 : analyse chimique (notamment sulfates solubles dans l'eau) ;
- [NF EN 1744-5, 2007] : Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – partie 5 : détermination des sels chlorures solubles dans l'acide ;

- [NF EN 1744-6, 2007] : Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – partie 6 : détermination de l'influence d'un extrait de granulats recyclés sur le temps de prise initial du ciment ;
- [NF EN 1097-1, 2001] : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval) ;
- [NF EN 1097-2, 2010] : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats – partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.

14.2.2. Sélection des constituants du béton et propriétés selon la norme européenne EN 206 : 2013 et dispositions nationales NF EN 206/CN : 2014

Dans la norme européenne EN 206 : 2013, les spécifications sont définies comme la « compilation finale des exigences techniques documentées données au producteur, en termes de performances ou de composition ». Typiquement, elles comprennent toutes les exigences relatives aux propriétés du béton, nécessaires à son transport après fabrication, à sa mise en place, à son serrage et à sa cure ou tout autre traitement. Les spécifications peuvent inclure des exigences particulières (par exemple, l'obtention d'une finition architecturale particulière).

Par conséquent, le prescripteur doit veiller à ce que toutes les prescriptions pertinentes fixant les propriétés du béton soient incluses dans les spécifications données au producteur. Pour cela, il doit considérer :

- les conditions environnementales auxquelles l'élément sera exposé (définies par les classes d'exposition). Les classes d'exposition donnent des informations au producteur sur la façon d'obtenir une formulation conforme aux exigences, en termes de teneur minimale en ciment C, d'eau efficace maximale *via* le rapport E/C, etc., pour assurer la durabilité du béton. Dans la version française de la norme et dans les dispositions nationales qui l'accompagne [NF EN 206/CN, 2014], les tableaux de l'annexe NA.F.1 (béton prêt à l'emploi, béton fabriqué sur chantier ou béton pour les produits industriels préfabriqués en béton) et NA.F.2 (produits industriels préfabriqués en béton uniquement) donnent toutes les informations pertinentes nécessaires en termes de composition et de propriétés (par exemple la classe de résistance en compression) ;
- le comportement du béton à l'état frais est exprimé en termes de classe d'ouvrabilité. Elle est reliée à l'exécution des travaux selon [NF EN 13670/CN, 2013] et au choix de la méthode de coulage (béton pompé ou béton auto-plaçant, par exemple). L'EN 206 : 2013 autorise différentes techniques de mesure de cette propriété ;

- les propriétés du béton durci, principalement exprimées par la classe de résistance à la compression du béton de densité courante. Les classes de résistance à la compression sont définies sur une large plage allant de C8/10 à C100/115, désignation où le premier chiffre représente la résistance caractéristique en MPa mesurée sur cylindre $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}^3$, et le second la résistance caractéristique en MPa mesurée sur cubes de 150 mm d'arête ;
- la méthode de mise en place et les conditions de cure notamment. Certains bétons ont besoin d'une protection particulière durant l'exécution des travaux, en raison de leur sensibilité aux conditions extérieures, ce qui peut conduire à adopter les différentes classes de cure définies dans la norme [NF EN 13670, 2013] ;
- les dimensions de l'élément à réaliser, en relation avec le dégagement de chaleur qui peut induire la formation interne d'ettringite différée (RSI) s'il est trop élevé. L'expérience française traitant de la RSI a donné lieu à des recommandations nationales [IFSTTAR, 2017] ;
- la durée de vie de l'ouvrage, qui est de 50 ans selon l'EN 206, 2013. Le Fascicule 65 donne des spécifications applicables aux ouvrages publics en France, pour lesquels la conception prévoit une durée de vie de 100 ans. Dans ce cas, les tableaux NA.F doivent être adaptés, ou une approche performantielle doit être utilisée (voir paragraphe suivant) ;
- toutes les exigences liées à l'enrobage des aciers ou à la dimension minimale des pièces à bétonner, induisant par exemple le choix de la taille maximale des granulats, selon les normes [NF EN 1992-1-1, 2005] et [NF EN 13670, 2013]. Ces spécifications dépendent du dimensionnement de la structure (selon les Eurocodes) dans lequel interviennent les règles traitant de la durabilité (prévention de la corrosion des armatures) selon la classe de structure de l'ouvrage, et d'autres dispositions telles la qualité du béton et le contrôle qualité appliqué au projet ;
- toutes les suggestions supplémentaires sur l'utilisation des constituants contrôlant la durabilité (par exemple, type de ciment dans les environnements spéciaux).

Dans la norme EN 206 : 2013, le béton doit être spécifié comme suit :

- béton à propriétés spécifiées : béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées au producteur, qui a la responsabilité de fournir un béton qui satisfait à toutes les propriétés requises ;
- béton à composition prescrite : béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur, qui a la responsabilité de fournir un béton respectant cette composition prescrite.

En outre, les deux normes [NF EN 206, 2013] et [NF EN 206/CN, 2014] contiennent des spécifications sur la qualité des constituants, notamment celle des granulats.

14.2.3. Utilisation des granulats de béton recyclés selon EN 206 : 2013 et dispositions nationales

La norme EN 206 : 2013 permet l'utilisation de granulats recyclés, car elle se réfère pour leur acceptation à la norme européenne des granulats pour béton (EN 12620), dans laquelle la classification des granulats recyclés est donnée (voir Tableau 14.1). Toutefois, leur agrément local doit être établi par référence aux dispositions nationales et en conformité avec l'expérience locale. Ainsi, en France, la norme [NF EN 206/CN, 2014] impose des contraintes supplémentaires, comme indiqué ci-après.

Tout d'abord, trois types de gravillons de béton recyclé (GBR) sont définis selon leur codification dans la norme [NF EN 12620+A1, 2008], complétée par les dispositions nationales de la norme [NF P 18-545, 2011] (voir Tableau 14.2 et Tableau 14.3) et par la fréquence des contrôles :

- type 1 : toutes les caractéristiques sont CRB ;
- type 2 : toutes les caractéristiques sont CRB ou CRC ;
- type 3 : toutes les caractéristiques sont CRB, CRC ou CRD.

La fréquence des contrôles peut être temporelle ou quantitative mais, dans la première période de production (c'est-à-dire pendant au moins les 12 premiers mois, avec une production minimale de 10 000 tonnes), le producteur doit choisir la fréquence qui donne le plus grand nombre d'échantillons.

Les GBR peuvent alors être utilisés dans le béton à condition de respecter les points suivants :

- être conformes aux normes [NF EN 12620+A1, 2008] et [NF P 18-545, 2011] ;
- les gravillons sont de type 1, 2 ou 3 ;
- les sables sont conformes aux spécifications du Tableau 14.4 ;
- le béton n'est pas précontraint ;
- les taux maximums de granulats recyclés définis dans le Tableau 14.5 en fonction de la classe d'exposition sont respectés.

On peut constater que les directives fixées par la norme [NF EN 206/CN, 2014] sont plutôt restrictives et que les taux de recyclage sont limités (en particulier pour les sables de GBR dans les environnements sévères). Cette approche prudente est justifiée par le manque de connaissances sur la durabilité des bétons incorporant des GBR. Toutefois, il est intéressant de noter que la norme [NF EN 206, 2013] permet de recourir à une approche performantielle, en plus de l'approche prescriptive. L'approche prescriptive, exprimée par les tableaux NA.F, donne des valeurs seuils pour la composition du mélange (rapport eau/ciment maximum, teneur minimale en ciment C...) et pour les propriétés du béton (résistance à la compression). L'approche performantielle autorise une formule de béton lorsque sa durabilité est prouvée par des essais dédiés ou par des expériences antérieures. Cette approche est un bon moyen pour augmenter le taux de recyclage admissible, mais elle nécessite du temps et de l'argent et ne peut se justifier que pour les gros travaux. En France, ce concept repose sur deux approches :

- la première est appelée approche absolue et se base sur des indicateurs de durabilité tels la porosité, la perméabilité à l'air, etc. [AFGC, 2007]. La valeur limite de ces indicateurs dépend de la durée de vie et de l'environnement du béton. Ces règles pourraient être appliquées aux bétons de GBR, excepté pour l'exigence de porosité, qui risque d'être trop sévère si des granulats poreux comme les GBR sont utilisés à un pourcentage significatif ;
- la seconde est appelée approche équivalente et elle est basée sur la qualification d'un béton par comparaison à un béton de référence déjà accepté par la norme [NF EN 206/CN, 2014].

Tableau 14.2

Codification des gravillons de GBR selon leur composition

Code	Constituants principaux [NF EN 12620+A1, 2008]	Constituants secondaires [NF EN 12620+A1, 2008]				Type de fréquence d'essai	
		Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg _{0,5-}	FL _{0,2-}	Temporel	Quantitatif
CRB	Rcu95	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg _{0,5-}	FL _{0,2-}		
CRC	Rcu90	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg ₁₋	FL ₂₋	2/mois	1/2 000 tonnes
CRD	Rcu70	Rb ₃₀₋	Ra ₁₀₋	XRg ₂₋	FL ₂₋		

Tableau 14.3

Codification des gravillons de GBR selon leurs propriétés

Caractéristique	Méthode d'essai	Code	Catégorie	Fréquence du type d'essai	
				Temporel	Quantitatif
Sulfates solubles dans l'eau	[NF EN 1744-1+A1, 2014] article 10.2	CR _B , CR _C , CR _D	V _{ss0,2} SS _D V _{ss0,7}	1/semaine	1/1 000 tonnes
Masse volumique	[NF EN 1097-6, 2014]	CR _B , CR _C , CR _D	≥ 2,0 t/m ³ ≥ 1,7 t/m ³	1/semaine	1/1 000
Influence sur le temps de début de prise	[NF EN 1744-6, 2007]		A ₁₀ A ₄₀	2/mois	1/2 000
Aplatissement	[NF EN 933-3, 2012]	CR _B , CR _C , CR _D	FI ₃₅	1/mois	1/4 000
Los Angeles	[NF EN 1097-2, 2010]	CR _B , CR _C , CR _D	LA ₄₀ LA ₅₀	1/ 2 mois	1/8 000
Chlorures solubles dans l'acide	[NF EN 1744-5, 2007]	CR _B , CR _C , CR _D	À déclarer	2/mois	1/2 000
Absorption d'eau à 24h (Ab ₂₄)	[NF EN 1097-6, 2014]	CR _B , CR _C , CR _D	À déclarer	1/semaine	1/1 000
Alcalins actifs solubles dans l'eau de chaux	[XP P 18-544, 2015]	CR _B , CR _C , CR _D	À déclarer	2/mois	1/2 000

Tableau 14.4

Spécification pour les sables de GBR

Caractéristique	Méthode d'essai	Catégorie	Type de fréquence d'essai	
			Temporel	Quantitatif
Sulfates solubles dans l'eau	[NF EN 1744-1+A1, 2014] article 10.2	NF P 18-545 code SSD Vss0,7	1/semaine	1/1 000
Masse volumique	[NF EN 1097-6, 2014]	$\geq 1,7 \text{ t/m}^3$	1/semaine	1/1 000
Influence sur le temps de début de prise	[NF EN 1744-6, 2007]	A ₄₀	2/mois	1/2 000
Chlorures solubles dans l'acide	[NF EN 1744-5, 2007]	À déclarer	2/mois	1/2 000

Tableau 14.5

Taux maximums de substitution des sables et gravillons de GBR

(en pourcentage de la masse totale de sable ou de gravillons, respectivement)

Type de granulat recyclé	Classe d'exposition selon [NF EN 206/CN, 2014]*			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XD1, XS1	Toutes les autres classes d'exposition
Gravillons recyclés de type 1	60	30	20	0
Gravillons recyclés de type 2	40	15	0	0
Gravillons recyclés de type 3	30	5	0	0
Sable recyclé	30	0	0	0

* Définition des classes d'exposition : X0 : Aucun risque de corrosion ou d'attaque, XC : Corrosion induite par la carbonatation, XS : corrosion induite par les chlorures de l'eau de mer, XD : Corrosion induite par chlorures autres que de l'eau de mer. Plus l'indice est élevé, plus l'environnement est sévère.

14.2.4. Normes dédiées à l'alcali-réaction et au gel-dégel référencées dans la norme NF EN 206/CN : 2014

En complément à la norme européenne générale EN 206 : 2013, des dispositions nationales sont référencées dans la norme française [NF EN 206/CN, 2014]. En ce qui concerne les granulats, il est important de mentionner les textes techniques traitant de la résistance au gel-dégel et à la réaction alcali-silice.

Le document [NF FD P 18-464, 2014] définit un ensemble de dispositions nationales et des normes applicables aux granulats et au béton, afin d'éviter la réaction alcali-silice. Par exemple :

- [NF XP P 18-543, 2015] : Granulats – Étude pétrographique des granulats appliquée à l'alcali-réaction ;
- [NF XP P 18-544, 2015] : Granulats – Détermination des alcalins actifs solubles dans l'eau de chaux ;
- [NF FD P 18-541, 2015] : Granulats – Guide pour l'élaboration du dossier carrière dans le cadre de la prévention des désordres liés à l'alcali-réaction ;
- [NF FD P 18-542, 1988] : Granulats – Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction ;
- [NF P 18-594, 2015] : Granulats – Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis ;
- [NF P 18-454, 2004] : Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction – Essai de performance ;
- [NF FD P 18-456, 2004] : Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction – Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance.

Pour les environnements soumis au gel-dégel, les dispositions nationales sont établies sur la base d'un guide [LCPC, 2003] et de trois méthodes d'essai :

- [NF XP P 18-420, 2012] : Béton – Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline ;
- [NF P 18-424, 2008] : Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'eau – Dégel dans l'eau ;
- [NF P 18-425, 2008] : Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'air – Dégel dans l'eau.

Compte tenu de l'hétérogénéité des GBR (en relation avec leur classification selon la norme EN 12620) et de la présence éventuelle de polluants ou de produits autres que le béton, il serait intéressant de vérifier si les spécifications concernant la réaction alcali-silice, données dans la norme [NF FD P 18-464, 2014], sont toujours pertinentes pour les bétons de GBR (voir chapitre 12).

De même, l'absorption d'eau élevée de GBR peut avoir une influence vis-à-vis des recommandations formulées dans [LCPC, 2003] relatives au comportement au gel dégel.

14.2.5. Réalisation des ouvrages en béton selon la norme européenne NF EN 13670/CN et dispositions nationales (DTU 21, Fascicule 65)

La norme européenne [NF EN 13670/CN, 2013] traite de l'exécution des ouvrages en béton incluant un chapitre sur « l'opération de bétonnage », qui impose selon la Figure 14.1, que le béton soit conforme à la norme [NF EN 206/CN, 2014]. En outre, l'utilisateur est le prescripteur final, en particulier pour ce qui concerne le choix de la classe de consistance, en relation avec la façon dont le béton sera coulé. En France, les dispositions nationales suivantes complètent la norme [NF EN 13670/CN, 2013] :

- Fascicule 65 : Cahier des clauses techniques générales (CCTG) applicable aux marchés de génie civil – Exécution des ouvrages de génie civil en béton ;

- [NF DTU 21 P1-2, 2007] : DTU 21 – Travaux de bâtiment – Exécution des ouvrages en béton – partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux.

Il n'y a pas de restrictions dans la norme NF DTU 21 autres que celles données dans la norme [NF EN 206/CN, 2014].

Dans le Fascicule 65, des limitations supplémentaires sont données :

- seuls des GBR de type 1 provenant de la déconstruction d'un ouvrage de génie civil et dont la traçabilité est assurée peuvent être utilisés ;
- la classe de résistance à la compression du béton est limitée à C35/45 ;
- le recyclage est limitée aux classes d'exposition XC ou XF1 ;
- le taux de substitution (en masse) est au maximum de 20 %.

14.2.6. Granulats récupérés et recyclés issus de produits structuraux préfabriqués en béton, selon la norme européenne EN 13369 et les dispositions nationales

La norme européenne [NF EN 13369, 2013] donne des règles communes pour les produits structuraux préfabriqués en béton. Tous les produits structuraux préfabriqués se réfèrent à cette norme. Pour la formulation du béton et le dimensionnement, elle fait référence aux normes [NF EN 206, 2013] et [NF EN 1992-1-1, 2005], respectivement.

La norme [NF EN 13369, 2013] prend en compte, les granulats récupérés par concassage et les gravillons recyclés, mélangés dans le béton à d'autres granulats. Par définition :

- les granulats récupérés par concassage sont obtenus à partir des produits préfabriqués en béton issus de la même usine que celle où le béton a été produit. Ce sont des granulats de type 1 selon les normes [NF EN 12620, 2008] et [NF P 18-545, 2011] ;
- les gravillons recyclés évalués par le fabricant proviennent d'une source externe, mais ils sont constitués d'éléments en béton pur.

La quantité de granulats récupérés par concassage peut atteindre 10 % en masse de la quantité totale de granulats dans le béton, sans nécessité d'autres essais complémentaires sur le béton durci que la résistance à la compression. Toutefois, si des applications spécifiques l'exigent, la teneur en granulats concassés recyclés peut être limitée à 5 %. Cette teneur limite peut être augmentée à 20 % si l'un des cas suivants s'applique :

- la résistance mécanique du produit préfabriqué en béton est déterminée par calcul, assisté ou non par des essais grandeur nature, et toutes les propriétés du béton durci pertinentes pour le calcul sont déterminées par des essais ;
- la résistance mécanique du produit béton est déterminée par des essais grandeur nature.

Des teneurs supérieures à 20 % de granulats concassés recyclés peuvent être utilisées lorsque toutes les propriétés du béton durci pertinentes pour le calcul sont déterminées par des essais, et que la résistance mécanique du produit préfabriqué en béton déterminée par calcul est vérifiée par des essais initiaux grandeur nature. Une quantité maximale peut être déterminée par les dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation.

Des gravillons recyclés provenant d'une source externe constitués de débris de béton pur peuvent être utilisés dans les mêmes conditions que celles des granulats récupérés par concassage, pourvu que l'origine et les propriétés du béton concassé soient connues par le fabricant.

Les autres gravillons recyclés, qui ne proviennent pas de débris de béton pur, doivent être conforme à la catégorie RC₉₀ de la norme EN 12620 pour pouvoir être utilisés, et leur quantité dans le béton doit être limitée à la moitié des pourcentages admis pour les granulats récupérés par concassage.

14.2.7. Eurocode 2 : norme européenne EN 1992-1-1 et prescriptions nationales (NF EN 1992-1-1/NA)

L'Eurocode 2 [NF EN 1992-1-1, 2005] prend en compte les principes et les exigences pour la sécurité et la durabilité des ouvrages en béton *via* la notion d'état limite. Il n'aborde que les exigences de résistance mécanique et de résistance au feu. Les propriétés du béton sont données au chapitre 3 de l'Eurocode 2, partie 1-1. Sont traités la résistance à la compression et à la traction (f_{ck} et f_{ctm}), le module d'élasticité (E_{cm}), le retrait (ϵ_{cs}) et le fluage ($\Phi(t, t_0)$). Il est bien connu que ces trois dernières propriétés, ainsi que f_{ctm} dans une moindre mesure, peuvent varier pour une même résistance à la compression, lorsque des GBR sont introduits dans le béton à la place des granulats naturels (voir chapitres 10 et 11). Il serait alors utile d'amender l'Eurocode 2 avec des modèles modifiés prenant en compte l'influence des GNR sur ces propriétés.

14.2.8. Enquête sur les normes et spécifications internationales

Cette partie présente un inventaire sur la façon dont la production de bétons avec GBR est intégrée dans les critères normatifs de différents pays. [de Brito et Sakai, 2013] ont réalisé une importante compilation des normes et spécifications en vigueur autorisant l'utilisation des GBR dans les bétons. Leur analyse a concerné un large panel de pays : Brésil, Allemagne, Hong-Kong, Japon, Royaume-Uni, Pays-Bas, Portugal, Belgique et Suisse. Durant le Projet National RECYBETON, les règlements d'autres pays ont également été étudiés : Autriche, Italie, Norvège, Suède, Chine, USA et Canada [Bodet *et al.*, 2015].

L'analyse de ces normes montre que l'utilisation des GBR obéit généralement aux principes suivants :

- ils sont d'usage courant dans les applications routières pour lesquelles l'utilisation de granulats recyclés est bien contrôlée ;
- il est nécessaire de caractériser leurs performances (niveau de valeur et variabilité) ;
- il y a une différence très marquée entre gravillons et sables recyclés avec, pour ces derniers, des limitations dans leur utilisation en béton de structure où les risques sont plus élevés.

L'étude a montré aussi qu'il y a trois façons de promouvoir l'utilisation des GBR :

- classer les granulats (constituants, exigences, méthodes d'essais et de contrôle qualité) ;
- définir des taux de substitution admissibles dans le béton (selon le type de béton, les classes d'exposition et de résistance) ;
- ajuster les paramètres utilisés dans les codes de calcul pour prendre en compte les variations induites par les GBR (ex. : module d'élasticité, retrait et fluage).

L'étude montre qu'il y a des disparités marquées entre les différents pays au niveau de l'utilisation des gravillons de GBR dans les bétons de structure. Certains d'entre eux, comme les Pays-Bas, l'Allemagne, l'Australie, le Royaume-Uni et le Japon, sont les plus avancés en la matière.

Aux Pays-Bas, l'un des pays les plus avancés dans l'utilisation de GBR en Europe, le taux de substitution est limité à 50 %, indépendamment des classes d'exposition. Ce taux peut passer à 100 % si les classes XS et XD sont exclues. La classe de résistance des bétons de GBR peut atteindre C35/45, et l'utilisation de sable de GBR est acceptée.

En Allemagne, le taux de substitution peut aller jusqu'à 45 % en volume pour les gravillons et pour les classes d'exposition X0, XC, XF1, XF3 et XA1.

Au Royaume-Uni, les GBR sont autorisées jusqu'à 20 %, pour une classe de résistance maximale C40/50, mais limitée aux environnements X0, XC et XF1.

En Australie, où le recyclage suscite un intérêt général, jusqu'à 100 % de GBR peuvent être utilisés pour un béton C25/30, et jusqu'à 30 % pour un béton C40/50, du moment que la traçabilité du GBR est assurée et que des contrôles additionnels sont effectués.

Certains pays ont introduit un coefficient de sécurité dans le calcul des propriétés du béton, notamment pour le module d'élasticité, le retrait et le fluage, lorsque des gravillons recyclés sont utilisés (par exemple les Pays-Bas, la Suisse, l'Espagne).

Hormis la Suisse et la Norvège, tous les pays interdisent l'utilisation de GBR dans les ouvrages en béton précontraint.

[de Brito et Sakai, 2013] ont proposé un schéma d'analyse des différentes normes, prenant en compte les granulats et leur classification, les exigences les plus pertinentes et les conditions pour leur réutilisation dans le béton. La

plupart des spécifications classent les GBR en termes de composition. Le Tableau 14.6 montre une comparaison entre trois pays. Pour compléter cette classification, certaines exigences supplémentaires ont été retenues : masse volumique minimale, absorption d'eau maximale, teneurs en chlorures et en sulfates maximales (voir Tableau 14.7). L'utilisation de GBR est formulée en termes de taux de substitution des granulats naturels, classes d'exposition et classes de résistance maximale (voir Tableau 14.8).

Tableau 14.6

Aperçu sur la composition des granulats recyclés [de Brito et Sakai, 2013] destinés à être réutilisés dans les bétons de GBR (granulats recyclés) et les bétons mixtes (GBR et granulats de maçonnerie)

Pays	Classification	Composition (teneur maximale en %)					
		Béton	Maçonnerie	Organique	Contaminants	Matériaux légers	Fillers
Brésil	Béton de GBR	> 90	–	2	3	n.d	7
	Bétons mixtes	< 90	–	2	3	n.d	10
Royaume-Uni	Béton de GBR	> 95	< 5	1	0.5	n.d	
	Béton mixte	n.d	1	1	n.d		
Portugal	Béton de GBR 1	> 90	< 10	0.2	1	n.d	
	Béton de GBR 2	> 70	< 30	0.5	1	n.d	
	Béton mixte	> 90	2	1	n.d		

n.d : non disponible.

Tableau 14.7

Aperçu sur les spécifications des granulats recyclés [de Brito et Sakai, 2013]

Pays	Classification	Densité minimale (kg/m ³)	Absorption d'eau maximale (%)	Teneur maximale en chlorure (%)	Teneur maximale en sulfates (%)
Brésil	Béton de GBR	n.d	7	1	1
	Bétons mixtes	n.d	12	1	1
Royaume-Uni	Béton de GBR	n.d	n.d	n.d	1
	Béton mixte	n.d	n.d	n.d	n.d
Portugal	Béton de GBR 1	2 200	7		0.8
	Béton de GBR 2	2 200	7		0.8
	Béton mixte	2 000	7		0.8

Tableau 14.8

Aperçu sur le champ d'application des granulats recyclés [de Brito et Sakai, 2013]

Pays	Classification	Substitution maximale		Conditions d'utilisation	Classe maximale de résistance
		Gravillons	Sables		
Brésil	Béton de GBR	100 %	100 %	Béton non-structurel	15 MPa
Royaume-Uni	Béton de GBR	20 %	0 %	X0, XC, XF1, DC-1	C40/50
	Béton de GBR 1	25 %	0 %	X0, XC, XS1, XA1	C40/50
Portugal	Béton de GBR 2	20 %	0 %		C35/45
	Béton mixte	n.a	0 %	Béton non-structurel	n.a

14.2.9. Conclusion de l'enquête

Cet état de l'art montre que les GBR et leur usage commence à être intégré dans les documents et les normes de nombreux pays.

En France, la classification des GBR paraît satisfaisante, même si la pertinence de certaines propriétés soulève encore des questions, notamment pour l'absorption d'eau et la teneur en sulfates solubles dans l'eau.

Le taux de recyclage dans le béton est également codifié par la norme [NF EN 206/CN, 2014], mais les valeurs retenues sont très sécuritaires et restrictives, en raison d'un manque de connaissances sur la durabilité des bétons de GBR. Toutefois, certains pays sont plus permissifs, ce qui laisse à penser que ces taux pourraient augmenter à l'avenir.

Enfin, l'influence des GBR sur les propriétés du béton à l'état durci, comme la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité, le retrait et le fluage du béton, n'est pas prise en compte dans l'Eurocode 2, alors qu'elle est significative dès que le taux de substitution dépasse 10-20 %.

14.3. Résultats RECYBETON

Le Projet National RECYBETON a pour but de promouvoir l'utilisation des GBR dans de nouveaux bétons, en se référant à l'expérience française, mais aussi à celle des pays européens et des autres pays. Les nombreuses études réalisées durant ce projet apportent suffisamment d'informations pour envisager que les normes nationales ou européennes puissent être améliorées à l'avenir.

Parmi les résultats obtenus, on peut retenir, par exemple :

- au chapitre 3, que les normes granulats classiques peuvent être appliquées pour les GBR, ainsi que les seuils associés (absorption d'eau, sulfates ou chlorures solubles dans l'eau, Los Angeles) ;
- aux chapitres 10 et 11, que des informations nouvelles ont été obtenues sur l'influence du taux de substitution vis-à-vis des propriétés des bétons de GBR durcis, comme la résistance à la traction par fendage, le retrait, le module d'élasticité ou le fluage, par référence à la résistance à la compression. Ces données pourraient être intégrées dans les modèles de l'Eurocode 2 décrivant les matériaux, pour mieux prendre en compte les bétons de GBR dans le dimensionnement des ouvrages ;
- au chapitre 12, que la méthode française pour prévenir la réaction alcali-silice est applicable ;
- qu'il est possible de concevoir des bétons de GBR avec des taux de substitution des granulats naturels plus élevés que ceux proposés par l'actuelle norme française des bétons [NF EN 206/CN, 2014]. Le chapitre 12 souligne l'intérêt de la démarche performantielle autorisée par la norme [NF EN 206, 2013] pour atteindre cet objectif. À ce propos, il est intéressant de mentionner qu'un autre Projet National a été lancé, le projet PERFDUB traitant du développement de l'approche performantielle, où des études sur les bétons de GBR sont programmées. Les chantiers expérimentaux présentés dans la partie VII ont aussi démontré qu'un recyclage jusqu'à 100 % était possible dans certains cas.

14.4. Conclusion

Les différents textes techniques européens, tels l'Eurocode 2 et les normes EN 206, EN 13369, EN 13670 et EN 12620 sont fortement interconnectés et chacun d'eux contribue à la définition des conditions selon lesquelles les GBR peuvent être recyclés dans le béton. Ainsi, il est nécessaire que les spécifications d'un béton utilisé dans un ouvrage dimensionné selon l'Eurocode 2, incorporant des granulats conformes à la norme EN 12620, dont la composition respecte l'EN 206 ou l'EN 13369, et dont la mise en œuvre est réalisée selon l'EN 13670, soient bien prises en compte dans l'ensemble des normes.

En France, la classification des GBR est dorénavant intégrée dans les normes NF EN 12620 + A1 et NF P 18-545, et la norme NF EN 206/CN permet leur utilisation dans le béton. Cependant, les contraintes sont fortes en termes de qualité des GBR, de taux maximum de substitution et de classes d'exposition du béton, ce qui empêche en pratique une large utilisation des GBR dans le béton. Cette approche sécuritaire s'explique par un manque de retour d'expérience sur l'utilisation des bétons de GBR dans les applications structurales, et plus particulièrement en ce qui concerne leur durabilité. En outre, l'influence des GBR, à fort taux de substitution, sur les propriétés à l'état durci, comme la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité, le retrait et le fluage

n'est pas prise en compte dans l'Eurocode 2, alors que cette influence peut être significative.

L'enquête réalisée dans le cadre du Projet National RECYBETON a montré que plusieurs pays sont plus permissifs, ce qui suggère que le taux de recyclage pourrait bientôt être accru en France. Dans ce contexte, le Projet National RECYBETON a fourni de nombreuses études portant sur la caractérisation des GBR, les propriétés du béton frais et durci, la durabilité du béton, et des expériences de chantiers de construction qui seront utiles pour étayer des recommandations permettant d'améliorer l'ensemble des normes impliquées dans l'utilisation des GBR dans le béton.



Chapitre 15.

Adaptation des méthodes de formulation au béton de granulats recyclés

T. Sedran¹

Résumé – De nombreuses méthodes de formulation des bétons, souvent empiriques, existent de par le monde. En raison des propriétés particulières des granulats de béton recyclé (GBR), présentées dans les autres chapitres de cet ouvrage, leur incorporation dans de nouveaux bétons nécessite que les méthodes de formulation soient adaptées.

Ce chapitre présente tout d’abord un résumé des propriétés particulières des granulats de béton recyclé et de leurs conséquences qualitatives vis-à-vis de la formulation des bétons.

Il s’intéresse ensuite à l’adaptation de la méthode Dreux-Gorisse couramment utilisée en France, afin qu’elle tienne mieux compte de l’introduction des granulats de béton recyclé dans les bétons.

Enfin, ce chapitre montre l’intérêt de recourir à une méthode scientifique de formulation, permettant d’affiner les scénarii de recyclage optimisés.

15.1. Introduction

Les granulats de béton recyclé (GBR) présentent un certain nombre de propriétés qui les différencient des granulats naturels (GN), et qui ont des conséquences sur les propriétés des bétons dans lesquels ils sont introduits. Ces particularités sont décrites dans les chapitres précédents de ce livre, et elles sont résumées dans le paragraphe 15.2. À notre connaissance, il n’existe pas encore de méthodes éprouvées de formulation des bétons qui tiennent compte de ces spécificités. Plus précisément, le problème de la formulation d’un béton incorporant des GBR présente deux volets :

- optimiser un béton avec un taux de recyclage imposé (par une norme ou par un guide local) ;
- optimiser un béton dont le taux de recyclage optimal est recherché afin de minimiser le coût économique ou environnemental.

1. IFSTTAR, Nantes.

Dans le premier cas, les méthodes empiriques peuvent être adaptées, comme montré au paragraphe 15.3 pour le cas particulier de la méthode Dreux-Gorisse. Dans le second cas, il faut recourir à une approche plus scientifique, telle que décrite au paragraphe 15.4.

15.2. Particularités des granulats de béton recyclés et conséquences générales sur la formulation des bétons

15.2.1. Absorption d'eau

Les GBR présentent une absorption d'eau importante héritée du béton parent (entre 5 et 10 % typiquement) alors que les granulats naturels présentent généralement une absorption d'eau plus faible (1 à 3 %). Cette différence ne soulève pas de problème particulier pour la formulation. Elle a toutefois deux conséquences pratiques importantes.

En effet, les deux propriétés du béton les plus importantes, à savoir la consistance (affaissement) et la résistance à la compression, sont fortement dépendantes de la quantité d'eau efficace E_{eff} . Sa valeur correspond à l'eau apportée dans le mélange (eau de gâchage, eau des granulats et des adjuvants), diminuée de l'eau absorbée par les granulats (supposée ne pas servir à lubrifier le mélange ni à hydrater le ciment). Lors de la substitution des granulats naturels par des GBR, il faut considérer qu'une plus grande quantité d'eau sera absorbée par les granulats. Il est donc nécessaire d'augmenter l'eau totale lorsqu'une quantité d'eau efficace particulière est visée. Par exemple, dans un mélange contenant $1\,400\text{ kg/m}^3$ de GBR ayant une absorption d'eau de 7,5 %, l'eau absorbée représente 105 l/m^3 . Ainsi, pour une teneur en eau efficace visée de 200 l/m^3 , l'eau totale doit être 305 l/m^3 . Par comparaison, la correction d'eau pour un béton contenant $1\,700\text{ kg/m}^3$ de GN ayant une absorption d'eau de 1 % est de 17 l/m^3 seulement.

Lors de la fabrication du béton, les GBR sont généralement utilisés dans un état proche de la saturation. En effet, si les granulats sont secs, leur absorption n'est pas satisfaite instantanément, ce qui conduit à une évolution de l'eau efficace du béton dans les premières minutes et heures qui suivent le malaxage, et donc à des variations incontrôlées de la maniabilité (voir chapitre 7). En outre, lorsque les grains ne sont pas saturés, il est plus difficile de mesurer précisément leur teneur en eau réelle à la centrale, ce qui n'est pas acceptable d'un point de vue industriel.

15.2.2. Propriétés mécaniques

Les granulats naturels sont essentiellement issus de roches ayant des résistances à la compression supérieure à 50 MPa, alors que les GBR sont obtenus par concassage de bétons de résistance généralement moindre. En

outre, le concassage des GBR peut endommager la pâte résiduelle et réduire son adhérence au granulats naturels. Par conséquent, pour une nouvelle pâte de qualité fixée (c'est-à-dire pour un rapport E_{eff}/C fixé), l'augmentation de la teneur en granulats recyclés conduit généralement à une diminution de la résistance en compression du béton (voir chapitre 10). Comme les sables de GBR contiennent une plus grande quantité de pâte résiduelle, leur effet néfaste est plus conséquent que celui des gravillons de GBR. Ce problème peut être compensé par une diminution du rapport E_{eff}/C , ce qui revient à augmenter la teneur en ciment et/ou à diminuer l'eau efficace grâce à l'utilisation d'un superplastifiant. Il faut noter aussi que le remplacement des granulats naturels par des GBR peut parfois augmenter la résistance à la compression des bétons de résistance modérée, lorsque le granulats naturels est de moindre qualité (voir chapitre 10) ou grâce à la bonne adhérence des GBR à la nouvelle pâte de ciment, compte tenu de la présence de la pâte résiduelle associée aux GBR.

15.2.3. Compacité

La compacité d'un matériau granulaire est définie comme le rapport V_s/V_t où V_s est le volume solide occupé par le squelette après compactage, et V_t le volume du contenant.

Les méthodes de formulation des bétons visent le plus souvent à obtenir un squelette granulaire de forte compacité, en considérant les gravillons, le sable et parfois le liant et les additions minérales (Caquot, Faury, Baron-Lesage, Dreux-Gorisse, ACI 211...). En effet, augmenter la compacité permet de diminuer le volume des vides entre les grains du squelette. Par ailleurs, l'eau efficace ajoutée au béton joue deux rôles : remplir les vides restant dans le squelette, puis suspendre les grains et les séparer les uns des autres. Seule l'eau supplémentaire aux vides du squelette confère la maniabilité au béton, alors que l'eau présente dans la porosité du squelette est, en quelque sorte, inutile sur ce point. Ainsi, augmenter la compacité du squelette permet de minimiser la quantité d'eau « inutile » et, par conséquent, l'eau efficace, tout en gardant la même maniabilité. Enfin, parce que la résistance à la compression est une fonction décroissante du rapport E_{eff}/C , une compacité granulaire plus élevée conduit à une plus faible teneur de ciment pour une résistance et une maniabilité visée, et donc à un moindre coût en matériaux.

Les GBR résultent du concassage de bétons recyclés et ils sont constitués d'un mélange de granulats naturels et de pâte de ciment résiduelle. Leur surface est donc irrégulière et rugueuse. Par conséquent, ils présentent généralement une faible compacité, à cause des frottements entre grains. Par exemple, [Dao, 2012 ; Dao *et al.*, 2014] ont étudié la compacité de GBR provenant de divers bétons de résistances à la compression variables et confectionnés à base de deux types de granulats naturels : un granulats roulé siliceux semi-concassé (S) et un calcaire concassé (C). Les GBR obtenus ont été désignés « de seconde génération (G2) » lorsque le béton source contenait 100 % de GN, et

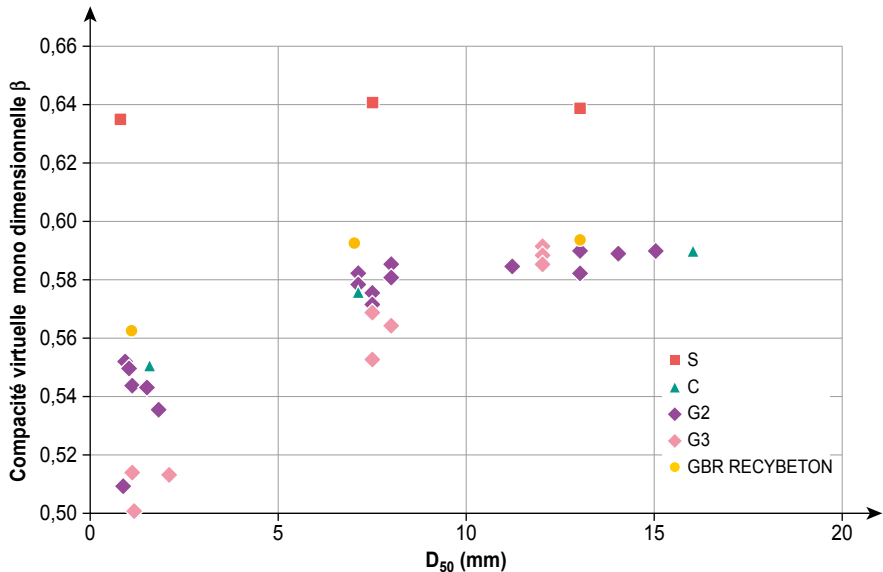
de « troisième génération (G3) » lorsque le béton source contenait 100 % de G2. À partir des mesures expérimentales réalisées sur les sables d'une part et sur les gravillons d'autre part, Dao a pu calculer, avec le Modèle d'Empilement Compressible [de Larrard, 1999], la compacité virtuelle résiduelle β des grains de chaque classe de taille. Les résultats, regroupés sur la Figure 15.1, montrent que, en moyenne, les GBR ont une compacité similaire à celle d'un granulat calcaire concassé, compacité inférieure à celle des grains roulés arrondis, et qu'elle diminue sensiblement avec la taille des grains. Ces résultats ont été confirmés avec les GBR utilisés dans le Projet National RECYBETON (voir annexes). On peut aussi constater que les compacités virtuelles sont assez semblables pour les différents gravillons de GBR, alors que l'échelle des valeurs est plus ouverte pour les sables de GBR.

Les conséquences bien connues sur les formules de bétons incorporant des GBR sont les suivantes :

- l'augmentation du taux de recyclage augmente généralement la demande en eau du béton (i.e. l'eau efficace nécessaire pour atteindre l'affaissement visé) ;
- les sables de GBR ont un effet négatif plus important que les gravillons de GBR sur la demande en eau du béton. En outre, cet effet est fortement dépendant de l'origine du sable de GBR.

Figure 15.1

Compacité virtuelle résiduelle β . Données issues du Projet National RECYBETON et de [Dao, 2012]. GN (S : granulats siliceux de rivière semi-concassé, C : calcaire concassé) et GBR (G2 et G3) provenant de différents bétons fabriqués avec le même GN



15.2.4. Résumé sur les propriétés clés des GBR

En conclusion, lors de la substitution des granulats naturels par des GBR, la morphologie et la rugosité des GBR conduit à augmenter l'eau efficace ou la dose de plastifiant/superplastifiant pour maintenir l'affaissement, tandis que leurs moindres propriétés mécaniques imposent généralement de diminuer le rapport E_{eff}/C pour maintenir la résistance à la compression du béton. Enfin, la demande en ciment augmente de façon non linéaire avec le taux de recyclage, pour un affaissement et une résistance données. Cet effet est négligeable pour les faibles taux de recyclage, mais il devient important pour les forts taux de recyclage. C'est pourquoi, parmi d'autres raisons, le taux de recyclage est généralement limité dans les règlements (en général, interdiction d'utiliser les sables de GBR et limitation du taux maximum de gravillons de GBR à 30 %).

En outre, en raison de l'absorption d'eau des GBR, il est obligatoire (comme pour les granulats naturels, mais d'une manière plus cruciale) de corriger l'eau totale et donc l'eau de gâchage utilisée pour compenser l'eau absorbée par les GBR, pour conserver la teneur en eau efficace visée.

15.3. Adaptation des méthodes de formulation existantes

15.3.1. Approche générale classique

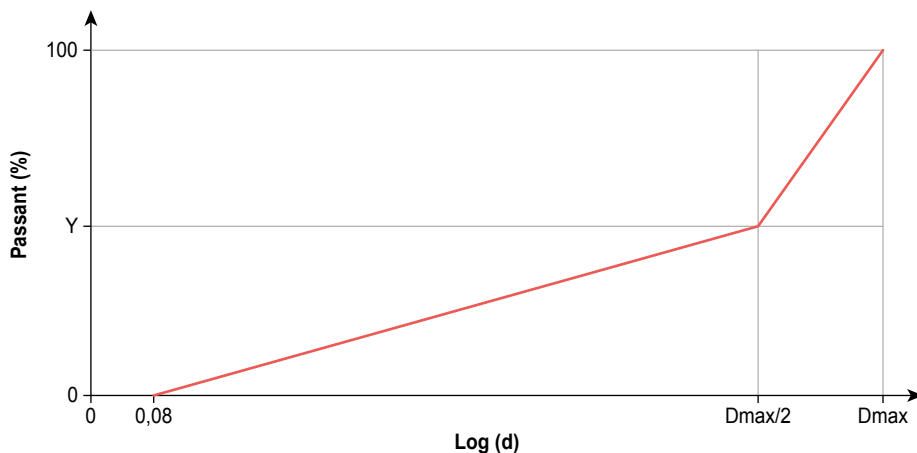
Les méthodes de formulation des bétons visent à déterminer la composition ayant le coût le plus faible, pour un jeu de propriétés visées. Ces méthodes comportent plus ou moins les mêmes étapes :

- définition d'un cahier des charges ;
- détermination du rapport E_{eff}/C pour atteindre la résistance attendue et/ou la durabilité requise ;
- optimisation de la compacité du squelette granulaire pour réduire la demande en eau du mélange ;
- ajustement des dosages en pâte et en superplastifiant pour atteindre l'ouvrabilité désirée ;
- utilisation éventuelle d'un retardateur pour maintenir l'ouvrabilité.

En France, la méthode Dreux-Gorisse [Dreux et Festa, 1995] est souvent utilisée pour la formulation des bétons. C'est une méthode essentiellement empirique, basée sur une courbe granulaire de référence. Cette courbe a été obtenue dans les années 1960, à partir de l'analyse de mélanges granulaires de bétons de la région parisienne ayant donné satisfaction. L'estimation de la quantité d'eau et du point Y (ordonnée du point de brisure de la courbe granulaire de référence, voir Figure 15.2) sont tabulées, mais les valeurs proposées dans la méthode d'origine doivent être souvent adaptées aux constituants locaux.

Figure 15.2

Forme de la courbe granulatoire de référence de la méthode Dreux-Gorisse



Dans les paragraphes qui suivent, chaque étape de cette méthode de formulation est détaillée, en expliquant les difficultés de son adaptation au cas des GBR, et en montrant la nécessité d'une méthode de formulation plus rationnelle.

15.3.2. Définition du cahier des charges

Les spécifications du cahier des charges traduisent a minima des objectifs en termes de maniabilité, de résistance à la compression à 28 jours et de durabilité.

Comme déjà signalé, lors de la formulation des mélanges de référence du Projet National RECYBETON ([Sedran, 2013] et annexes de ce livre), et dans l'étude spécifique sur le comportement à l'état frais des bétons (voir chapitre 7), l'augmentation de la teneur en sable de GBR induit une perte importante d'affaissement au cours du temps, alors que cet effet est plus modéré quand des gravillons de GBR sont utilisés. Il est donc important d'intégrer cet aspect durant le processus de formulation.

Afin d'obtenir sur chantier les valeurs de résistance à la compression requises, une marge supérieure à la résistance moyenne est prise en compte au moment de la formulation en laboratoire. Cette différence permet en principe de couvrir les fluctuations de qualité des constituants et les variations de composition du béton (dosage en eau principalement). Les GBR ont par nature des propriétés physico-mécaniques moins constantes que les granulats naturels. Cela peut induire des variations supplémentaires dans les propriétés des bétons de GBR, et cet aléa doit être pris en compte lors de la définition de la résistance à la compression moyenne visée. En première approximation, une augmentation de 50 % de la marge de sécurité utilisée pour les bétons de granulats naturels

peut être suggérée lorsque 100 % de gravillons de GBR sont utilisés. Mais cela implique que la composition des GBR, selon la norme [NF EN 933-1, 2012], soit relativement stable et que le rapport E_{eff}/C soit bien maîtrisé, même si l'absorption d'eau du GBR fluctue (voir chapitre 29).

La durabilité du béton peut être traitée selon une approche performancielle ou selon une approche prescriptive (voir chapitres 12 et 14). En Europe, l'approche prescriptive est le plus souvent considérée, au regard de la norme EN 206. Elle définit des classes d'exposition et impose des prescriptions sur la composition du béton, selon l'agressivité de l'environnement (dont la teneur minimale en ciment et le rapport E_{eff}/C maximum). Ces prescriptions ont été déterminées sur la base des expériences passées. La norme [NF EN 206/CN, 2014], qui est la version française de la norme européenne, tient compte de l'utilisation de granulats recyclés. Mais par manque de recul, les sables de GBR sont interdits et la substitution des gravillons naturels par des gravillons de GBR est d'autant plus limitée que l'environnement est sévère : 60 % (en masse) pour la classe X0, 30 % pour les classes XC1 et XC2, 20 % pour les classes XC3, XC4, XD1 et XS1, XF1 et 0 % pour les autres classes (voir chapitre 14). Si les seuils de la norme [NF EN 206/CN, 2014] sont dépassés (augmentation du taux de recyclage), il est alors nécessaire de démontrer la durabilité du béton de GBR, sur la base d'une approche performancielle, comme expliqué dans [AFGC, 2007] ou [FNTP, 2009] (voir chapitre 14 pour plus de détails). En effet, en raison de leur nature et de leurs propriétés spécifiques, les GBR peuvent avoir un fort impact sur la durabilité du béton de GBR. Les GBR sont plus poreux que les GN et ils diminuent de façon prévisible les performances du béton en matière de propriétés de transfert. Ils peuvent aussi influencer son comportement vis-à-vis du gel-dégel. En raison de leur nature composite, les GBR peuvent libérer une quantité importante d'alcalins solubles dans l'eau, en particulier les sables contenant une part importante de pâte de ciment résiduelle. Ils peuvent aussi contenir des phases de silice instables apportées par certains granulats naturels spécifiques, ainsi que de possibles polluants. Par conséquent, en utilisant des GBR, des précautions particulières doivent être prises vis-à-vis des risques de réaction alcali-silice. Enfin, la présence éventuelle dans les GBR de sulfates solubles dans l'eau peut entraîner la formation d'ettringite ou de thaumasite différées. Le chapitre 12 résume les principaux résultats obtenus dans le cadre des projets ECOREB et RECYBETON vis-à-vis de ces pathologies potentielles. Ils confirment que des bétons durables peuvent être réalisés avec des GBR, même à haut niveau de substitution, sous réserve toutefois de vérifier les propriétés des GBR et d'adapter la formulation (rapport E/L, teneur en air entraîné...).

Comme montré au chapitre 10, pour une même résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage d'un béton de GBR diminue généralement avec le taux de substitution en GBR. La diminution peut typiquement atteindre 13 à 17 % environ pour un taux de substitution de 100 %, du moins si le GBR est constitué du même granulats naturel qu'il remplace. Dans d'autres cas,

l'effet des GBR sur la résistance à la traction peut être neutre, négatif ou même positif, selon les propriétés respectives du GBR et du granulats naturels. De la même façon, la réduction du module d'élasticité peut atteindre 15 à 30 %. Ce comportement s'explique par le fait que les GBR sont plus déformables que les granulats naturels, en raison de la présence de la pâte résiduelle dans le GBR, et aussi parce que les bétons de GBR présentent généralement un plus grand volume de pâte que les bétons de granulats naturels à même affaissement. Les mêmes causes expliquent pourquoi les bétons de GBR peuvent aussi afficher des retraits importants, pouvant être le double de ceux observés sur les bétons de granulats naturels ([Dao, 2012]), et un fluage plus important (voir chapitre 11).

Ces propriétés peuvent constituer des critères/spécifications importants de la formulation, comme par exemple la résistance à la traction pour les chaussées en béton ou les phases de manutention et d'entreposage de pièces préfabriquées, les déformations élastiques et différées pour les structures en béton précontraint, le retrait pour les risques de fissuration dans des conditions empêchées (planchers...). Dans ces cas, une attention particulière doit être apportée si des GBR sont utilisés.

15.3.3. Définition du rapport E_{eff}/C

En général, la première étape de la méthode de formulation est la détermination du rapport E_{eff}/C permettant d'atteindre la résistance à la compression visée.

De nombreux modèles de la littérature prédisent la résistance à la compression selon une équation du type :

$$f_{cm} = k_g \cdot Rc_{28}^c \cdot f\left(\frac{E_{eff}}{C}\right) \quad (15.1)$$

où

- k_g est un paramètre mécanique tenant compte de l'influence du granulats, dépendant de sa résistance propre et de la qualité de sa liaison avec la pâte de ciment. k_g dépend également de la fonction $f()$ choisie ;
- Rc_{28}^c est la classe de résistance à la compression du ciment à 28 jours, mesurée selon la norme [NF EN 197-1, 2012] ;
- $f()$ une fonction décroissante du rapport E_{eff}/C .

Par exemple, l'équation de Bolomey utilisée dans les méthodes Dreux-Gorisse ou Baron-Lesage est donnée par la relation (15.2), et celle de Féret par la relation (15.3)

$$f_{cm} = k_g \cdot Rc_{28}^c \cdot \left(\frac{C}{E_{eff}} - 0,5\right) \quad (15.2)$$

$$f_{cm} = k_g \cdot Rc_{28}^c \cdot \left(\frac{1}{1 + 3,1 \frac{E_{eff}}{C}} \right)^2 \quad (15.3)$$

Une équation plus sophistiquée, tenant compte de la teneur en air et de la compacité du squelette granulaire, est proposée dans le paragraphe 10.2.1 (voir aussi le chapitre 03.4).

Le rapport E_{eff}/C visé peut donc être déduit de ce type d'équation si la classe du ciment et les performances mécaniques des granulats sont connues, et si la résistance à la compression du béton est fixée. La classe de ciment est généralement donnée par le cimentier, et le terme k_g est déduit de mesures expérimentales de résistance à la compression sur des bétons antérieurs réalisés avec le même squelette.

Dans le sous-chapitre 10.2.1, il est montré que ces équations sont toujours valides lorsque des GBR sont introduits dans le béton, en supposant que le paramètre mécanique k_g du squelette granulaire composé est pris en compte par l'équation (15.4), où $k_{g,j}$ est le paramètre du granulat j et VF_j sa proportion volumique dans le squelette total.

$$k_g = \sum_j VF_j \cdot k_{g,j} \quad (15.4)$$

En conclusion, pour les bétons incorporant des GBR, une fois que les termes $k_{g,j}$ du sable et des gravillons de GBR sont connus, il est possible de choisir le rapport E_{eff}/C visé. Ces termes peuvent être calibrés, comme pour les granulats naturels, sur des bétons spécifiques réalisés au préalable. Ce travail a été fait pour les mélanges de référence du Projet National RECYBETON (voir Tableau 10.2 et [Sedran, 2013]). Ces termes peuvent aussi être estimés à partir de la Figure 10.2 adaptée de [Silva *et al.*, 2014a], sur la base de la masse volumique sèche et de l'absorption d'eau des GBR, ou bien encore par le biais de l'équation (15.7) (voir aussi l'équation (3.11)) basée sur la valeur Micro-Deval du GBR.

Dans une seconde étape, comme indiqué § 15.3.1, les exigences de durabilité imposent aussi un rapport E_{eff}/C maximum, défini dans la norme EN 206 par exemple ou par le biais d'essais performantiels, compte tenu du fait que la durabilité est généralement améliorée lorsque le rapport E_{eff}/C diminue. Pour les bétons de GBR, les seuils ne sont pas clairement définis, mais un certain nombre d'informations peuvent être trouvées chapitre 12.

Au final, la valeur minimale du rapport E_{eff}/C permet de garantir les exigences de durabilité et de résistance à la compression.

15.3.4. Optimisation de la compacité

Dans la méthode Dreux-Gorisse, la valeur de Y (voir Figure 15.2) est calculée selon l'équation (15.5). X est égale à $D_{\max}/2$. D_{\max} est la taille maximale du granulat (en mm), M_f est le module de finesse de sable et K une valeur tabulée qui dépend de la nature du granulat (roulé ou concassé, sans distinguer le sable des gravillons), de la teneur en ciment et de l'énergie de vibration. Lorsque la courbe granulaire de référence est tracée, il est facile de trouver les proportions de sable et gravillons qui donnent le mélange qui s'en rapproche le plus.

$$Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + (6M_f - 15) \quad (15.5)$$

Les bétons de référence du Projet National RECYBETON, développés dans [Sedran, 2017]) et présentés en annexe, ont été formulés avec le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) implémenté dans le logiciel BetonlabPro ([de Larrard, 2000 ; de Larrard et Sedran, 2007]). L'intérêt de cette approche est discuté § 15.4, mais elle est supposée fournir une optimisation granulaire précise, tenant compte de la compacité propre et de la granularité de chaque matériau.

Quatre squelettes granulaires ont été optimisés avec cette méthode (voir Tableau A.8 et A.9 en annexe) : un premier avec sable et gravillons naturels (0S0G), un deuxième avec sable de GBR et gravillons naturels (100S0G), un troisième avec sable naturel et gravillons de GBR (0S100G) et un quatrième avec sable et gravillons de GBR (100S100G). Les courbes granulaires de ces bétons sont présentées Figure 15.3 et Figure 15.4, avec, pour chacune, la courbe granulaire de référence de type « Dreux-Gorisse » ajustée au mieux à la courbe du mélange (point de brisure à $d = 9$ mm).

Parallèlement, les courbes granulaires de référence issues de la méthode Dreux-Gorisse ont été calculées avec l'équation (15.5), en considérant les paramètres suivants : $D_{\max}/2 = 9$ mm, $K = 4$ (béton à base de granulats concassés dosé à 350 kg/m^3 de liant et mis en place avec une vibration faible), $M_f = 1,9$ pour le sable naturel et $M_f = 2,9$ pour le sable de GBR.

La valeur Y du point de brisure, obtenue par les deux méthodes (ajustement et calcul), est donnée Tableau 15.1.

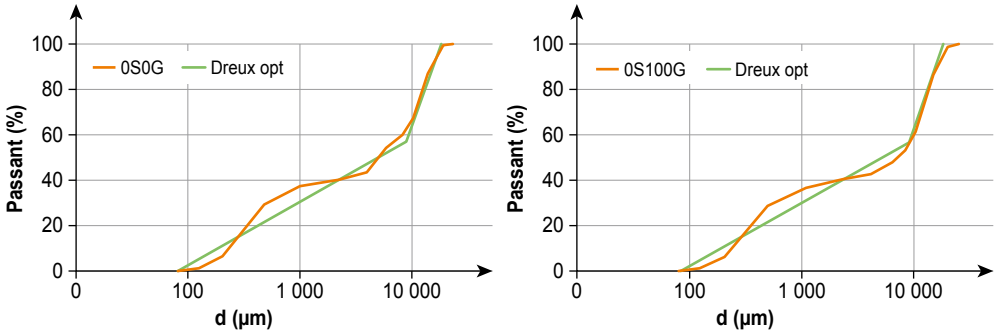
Tableau 15.1

Valeur Y du point de brisure pour les courbes de type « Dreux-Gorisse »

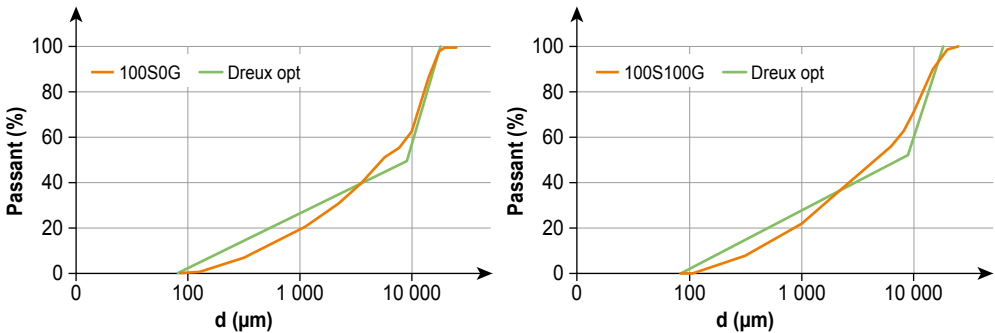
Béton	Par le MEC	Par l'équation 15.5
0S-0G	57	46
0S-100G	57	46
100S-0G	50	52
100S-100G	53	52

Figure 15.3

Courbes granulaires du squelette optimisé des bétons formulés avec le sable naturel et des gravillons naturels ou de GBR, calculées avec le MEC et représentées par une ligne brisée de type « Dreux-Gorisse »

**Figure 15.4**

Courbes granulaires du squelette optimisé des bétons formulés avec le sable de GBR et les gravillons naturels ou de GBR, calculées avec le MEC et représentées par une ligne brisée de type Dreux-Gorisse



Ce tableau montre tout d'abord que, même pour le squelette avec les sables naturels (0S0G et 0S100G), la méthode Dreux-Gorisse n'est pas très précise et tend à sous-évaluer le dosage optimum en sable. Dans ces bétons, le volume élevé de sable s'explique par la forme avantageuse des grains, qui leur procure une compacité virtuelle très élevée (voir Tableau A.7 en annexe). Rappelons que la méthode Dreux-Gorisse ne tient pas compte des propriétés de compacité réelle des granulats (c'est d'ailleurs une critique fondamentale qui lui est faite). Toutefois, elle donne une meilleure estimation de la valeur de Y pour les mélanges avec le sable de GBR (100S0G, 100S100G), sans doute parce que la nature concassée de ce dernier correspond mieux aux hypothèses de la méthode.

Le Tableau 15.1 montre également que l'introduction de gravillons de GBR n'a presque aucune influence sur la valeur de Y . Cela s'explique par le fait que les gravillons naturels et les gravillons de GBR ont des compacités très similaires.

En conclusion, la méthode Dreux-Gorisse paraît suffisante pour définir la courbe granulaire optimisée d'un béton contenant 100 % de GBR, du moment que le calcul de la valeur Y est fait en considérant des granulats concassés.

Dans ce cas, à partir de la valeur optimale de Y_{BGN} calibrée selon l'expérience locale pour un béton de granulats naturels, et de la valeur de Y_{BGBR} calculée selon la méthode Dreux-Gorisse pour un béton à 100 % de GBR, il est suggéré de calculer la valeur Y pour des taux intermédiaires de GBR comme suit :

- pas de modification de Y quel que soit $\Gamma_{m,g}$, le pourcentage massique de gravillons de GBR dans la masse totale des gravillons ;
- $Y = Y_{\text{BGN}} (1 - \Gamma_{m,s}) + Y_{\text{BGBR}} \Gamma_{m,s}$, avec $\Gamma_{m,s}$ le pourcentage massique de sable de GBR dans la masse totale des sables.

La méthode de formulation Baron-Lesage [Baron-Lesage, 1976] est comparable à celle de Dreux-Gorisse, excepté pour la recherche de la granularité optimale du mélange, qui est basée sur des essais d'écoulement du béton au maniabilimètre LCL (même principe de mesure que dans la norme [NF P18-452, 2017], mais avec un matériel plus grand). Elle consiste à fabriquer des bétons ayant même quantité de ciment et d'eau efficace (choisies par expérience), mais avec des proportions de sables et de gravillons variables. Selon les théories granulaires, le rapport sable/gravillons donnant la meilleure maniabilité correspond à l'optimum de compacité (la maniabilité peut aussi être mesurée par l'essai d'affaissement). L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de déterminer finement l'optimum granulaire. En revanche, elle nécessite de nombreux essais.

Elle peut être appliquée telle qu'elle pour les bétons contenant des GBR, mais uniquement si le taux de substitution du sable et des gravillons est prédéfini, car la méthode ne permet d'optimiser que deux composants à la fois. Par conséquent, il serait nécessaire de répéter la procédure si le taux de recyclage était modifié, ce qui peut devenir rapidement rédhibitoire.

15.3.5. Ajustement de l'eau

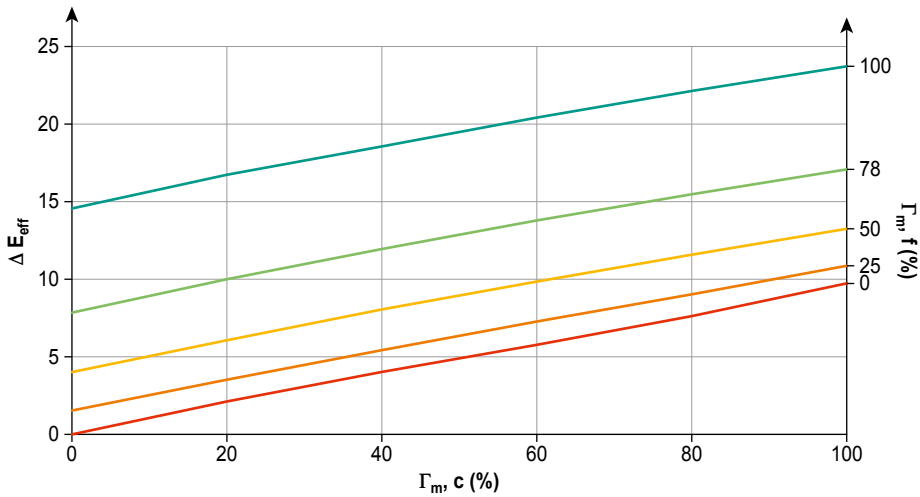
L'étape suivante consiste à fixer la quantité d'eau efficace nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité désirée. La méthode Dreux-Gorisse fournit un abaque pour estimer cette quantité, pour un affaissement et un rapport E_{eff}/C donnés.

Cette étape est le point le plus critique de la méthode car elle ne tient pas explicitement compte de la compacité optimisée du squelette granulaire, ni de la présence de superplastifiant, et elle ne concerne que les affaissements inférieurs à 12 cm. Cette approche n'est donc pas satisfaisante pour la formulation des bétons modernes, et les fabricants de béton ont généralement adapté leur propre abaque à leurs granulats naturels pour calculer la teneur en eau efficace idoine. De toute évidence, l'introduction de GBR, réputés augmenter la demande en eau du béton, ne contribue pas à améliorer la précision de la méthode. À ce stade, il devient alors nécessaire de passer par des essais d'affaissement en laboratoire.

Des essais ont donc été entrepris pour estimer l'ampleur des variations de la demande en eau efficace induites par l'augmentation de la teneur en sable et gravillons de GBR, pour un affaissement et pour un dosage en superplastifiant donnés. Pour ce faire, les compositions théoriques des bétons réalisés avec les constituants du Projet National RECYBETON ont été comparées (le ciment était un CEM II/A). Les mélanges ont été calculés avec le logiciel BetonlabPro ([de Larrard, 2000 ; de Larrard et Sedran, 2007]). Toutes les données nécessaires sont données dans l'annexe. Dans les simulations, le ciment, le filler calcaire et le superplastifiant ont été maintenus constants, aux dosages de 300 kg/m^3 , 50 kg/m^3 et $0,15 \%$ (extrait sec par rapport au poids du ciment) respectivement. Pour chaque taux de recyclage, le squelette granulaire a été tout d'abord optimisé pour atteindre la meilleure compacité, puis la teneur en eau efficace a été ajustée pour atteindre un affaissement de 15 cm . La Figure 15.5 a ainsi été construite. Elle décrit l'augmentation théorique de l'eau efficace nécessaire lorsque la teneur en sable et gravillons de GBR augmente.

Figure 15.5

Augmentation de la teneur en eau efficace pour un béton d'affaissement 15 cm lorsque le taux de gravillons de GBR augmente, à différents taux de sable de GBR. $\Gamma_{m,s}$ est le pourcentage massique de sable GBR par rapport au sable total. $\Gamma_{m,g}$ est le pourcentage massique de gravillons de GBR par rapport aux gravillons totaux.



Les résultats peuvent être modélisés par l'équation suivante :

$$\Delta E_{eff} = 10,2 \Gamma_{m,g} + 14,6 \Gamma_{m,s}^2 \quad (15.6)$$

avec $\Gamma_{m,s}$ le pourcentage massique de sable de GBR dans le sable total, et $\Gamma_{m,g}$ le pourcentage massique de gravillons de GBR dans les gravillons totaux.

Cette équation indique qu'un supplément de 24,8 kg/m³ d'eau efficace est nécessaire si tous les granulats naturels sont substitués par des GBR (du moins, dans le cadre des travaux du Projet National RECYBETON). Ce résultat est théorique car les bétons ont été formulés avec le logiciel BetonlabPro. Toutefois, certains bétons ont été fabriqués en laboratoire avec les mêmes constituants, toujours dans le cadre du Projet National RECYBETON (voir annexes, Tableaux A-8 et A-9, et [Sedran, 2013]). Ils ont montré que l'équation surestimait légèrement l'augmentation de la demande en eau, et qu'un maximum de 18 kg/m³ d'eau efficace supplémentaire suffisait pour un recyclage total. L'équation a alors été réajustée à partir des paramètres de ces mélanges expérimentaux, tout en gardant sa forme.

En outre, dans ce projet, la compacité virtuelle des granulats naturels (voir annexes, Tableau A-7) est proche de celle de grains ronds, c'est-à-dire la valeur supérieure de la fourchette généralement observée. Ainsi, l'effet négatif du recyclage calculé dans ce cas est sans doute maximum. En effet, lorsque les granulats naturels sont concassés, ils peuvent avoir des compacités virtuelles très proches de celles des GBR (Figure 15.1) et donc le recyclage devrait avoir alors une influence moindre sur l'augmentation de la demande d'eau.

En conclusion, ces résultats peuvent être modélisés par le jeu suivant d'équations, illustrant les configurations extrêmes de granulats naturels. Elles peuvent constituer un guide utile pour anticiper l'augmentation de la demande en eau selon le taux de recyclage, lorsque la demande en eau du béton de granulats naturels de référence est déjà connue.

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{eff}} &= 8 \Gamma_{m,g} + 10 \Gamma_{m,s}^2 \text{ lorsque les granulats naturels sont roulés} \\ \Delta E_{\text{eff}} &= 10 \Gamma_{m,s}^2 \text{ lorsque les sables naturels sont roulés et les gravillons} \\ &\text{naturels sont concassés} \\ \Delta E_{\text{eff}} &= 8 \Gamma_{m,g}^2 \text{ lorsque les sables naturels sont concassés et les} \\ &\text{gravillons naturels sont roulés} \end{aligned} \quad (15.7)$$

avec $\Gamma_{m,s}$ le pourcentage massique de sable de GBR dans le sable total, et $\Gamma_{m,g}$ le pourcentage massique de gravillons de GBR dans les gravillons totaux.

Pour un taux de recyclage et une teneur en plastifiant donnés (fixés selon l'expérience), un premier dosage de l'eau efficace est choisi. La masse de ciment est alors déduite du rapport E_{eff}/C défini à la première étape. Connaissant la masse volumique de l'eau et du ciment, le volume de granulats est alors calculé. Connaissant les proportions volumiques de sable et de gravillons, définies précédemment, les masses de chaque coupure granulaire peuvent alors être déduites. Il est rappelé qu'il faut tenir compte ici de la masse volumique réelle pondérée de chaque coupure formant le squelette granulaire (mélange granulats naturels + GBR). L'eau à ajouter au mélange, en supposant que les granulats sont secs, est ensuite calculée, en tenant compte de l'absorption d'eau des granulats. À titre d'exemple, considérons que les calculs précédents aient conduit aux masses suivantes :

- $E_{\text{eff}} = 190 \text{ l/m}^3$;
- Sable de GBR = 670 kg/m^3 , à l'état sec. L'absorption d'eau du sable est supposée de 9 % ;
- Gravillons de GBR = 740 kg/m^3 , à l'état sec. L'absorption d'eau des gravillons supposée de 6 % ;
- Superplastifiant = 4 kg/m^3 . Son extrait sec est supposé de 30 %.

Dans ce cas, une partie de l'eau efficace nécessaire est apportée par le superplastifiant ($0,7 \times 4 = 2,8 \text{ kg/m}^3$), et l'eau nécessaire pour satisfaire l'absorption des granulats vaut ($670 \times 0,09 + 740 \times 0,06 = 104,7 \text{ l/m}^3$). Il faut donc apporter $291,9 \text{ l/m}^3$ d'eau au mélange sec.

Cependant, pour éviter les aléas d'affaissement au début du procédé, à cause de l'absorption d'eau différée des granulats, il est fortement conseillé de saturer préalablement les granulats. Dans ce cas, les masses à peser sont les suivantes :

- sable de GBR = $730,3 \text{ kg/m}^3$, à l'état saturé surface sèche, dont $60,3 \text{ kg}$ d'eau absorbée ;
- gravillons de GBR = $784,4 \text{ kg/m}^3$, à l'état saturé surface sèche, dont $44,4 \text{ kg}$ d'eau absorbée ;
- superplastifiant = 4 kg ;
- eau à ajouter au mélange = $187,2 \text{ l/m}^3$.

L'eau efficace est ainsi ajustée (et donc aussi la masse des autres constituants) sur différentes combinaisons pour atteindre l'affaissement désiré. Toutefois, si l'eau efficace n'est pas suffisante pour atteindre l'affaissement requis, alors le dosage en superplastifiant doit être augmenté.

Une solution pour compenser l'augmentation de la demande en eau efficace est de garder la quantité d'eau efficace constante (même si de l'eau supplémentaire doit être ajoutée pour compenser l'absorption d'eau des GBR), et d'augmenter radicalement le taux de superplastifiant. Dans ce cas, la viscosité plastique du béton peut atteindre des valeurs inacceptables, et il convient de vérifier si cette solution est économique. Mais la teneur en ciment peut ainsi être maintenue constante, si des raisons environnementales le réclament (voir chapitres 30 et 33).

15.3.6. Autres ajustements

Comme observé lors de la formulation des bétons de référence du Projet National RECYBETON ([Sedran, 2013] et annexe), et aussi dans l'étude spécifique sur leur comportement à l'état frais (chapitre 7), l'introduction d'un sable de GBR, même à faibles doses, induit une perte importante d'affaissement en fonction du temps, alors qu'elle est plutôt modérée quand des gravillons de GBR sont introduits. Plus le taux de sable recyclé est grand, plus la perte d'affaissement est importante. Cet effet n'est pas dû à l'absorption d'eau, puisque le phénomène se produit aussi quand les granulats sont introduits dans le malaxeur à l'état saturé. C'est en fait une conséquence des interactions avec le superplastifiant, et l'utilisation d'un retardateur devient alors généralement nécessaire dès que des granulats de GBR sont utilisés. Parfois même, le dosage du retardateur

peut atteindre la valeur maximale recommandée par le fabricant, pour les taux élevés de substitution du sable naturel par du sable de GBR.

Pour simplifier les essais, le dosage du retardateur peut être réalisé sur le mortier extrait du béton étudié, en ne conservant que la fraction inférieure à 2 mm. La méthode MBE classique [Schwartzentruber et Catherine, 2000] ou la méthode AFREM des coulis [de Larrard *et al.*, 1997] peuvent alors être utilisées, en gardant à l'esprit qu'il est conseillé d'utiliser le sable de GBR à l'état saturé, le cas échéant.

Pour un volume élevé de sable de GBR, le chapitre 7 montre que la teneur en air peut atteindre 4 %, en présence de superplastifiant. Ce fait peut conduire à une diminution supplémentaire de la résistance à la compression et, le cas échéant, un agent « antimoussage » peut alors être utilisé.

Enfin, si le retrait est trop important à cause d'une quantité élevée de GBR, l'utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait (SRA) peut permettre de diminuer le retrait jusqu'à 30 % [Dao, 2012].

15.4. Optimisation du taux de recyclage

15.4.1. Apport d'un modèle scientifique de formulation

Le paragraphe précédent a montré qu'il était possible de formuler un béton de GBR en adaptant la méthode empirique de Dreux-Gorisse. Le processus est lourd, car il nécessite de nombreux essais d'étalonnage sur gâchées de laboratoire, mais il peut néanmoins s'avérer suffisant pour concevoir un béton lorsque le taux de recyclage est fixé *a priori*.

Comme déjà mentionné, un outil scientifique de formulation des bétons a été développé et implémenté dans un logiciel [de Larrard et Sedran, 2007]. La méthode est basée sur une série d'équations permettant d'optimiser d'une part le squelette granulaire en utilisant le Modèle d'Empilement Compressible (MEC), et d'autre part de calculer un certain nombre de propriétés d'usage des bétons, comme l'affaissement, le seuil de cisaillement, la viscosité plastique, la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité.

Le Modèle d'Empilement Compressible s'applique aussi aux GBR ([Dao, 2012 ; Dao *et al.*, 2014 ; Pepe, 2015 ; Sedran, 2013]). Le caractère frottant des GBR est pris en compte directement par le biais de la mesure de la compacité granulaire, qui est une donnée d'entrée du modèle. De même, les équations utilisées pour prédire l'affaissement ou la rhéologie du béton peuvent être utilisées directement car l'impact négatif des GBR sur ces propriétés est aussi pris en compte *via* la compacité. Pour prédire la résistance à la compression, à la traction par fendage ou le module d'élasticité du béton, les modèles restent valables, du moment que certaines propriétés (kg, kt, Eg) des granulats recyclés sont définies en amont (voir chapitre 10). Cet ensemble d'équations est donc adapté à la

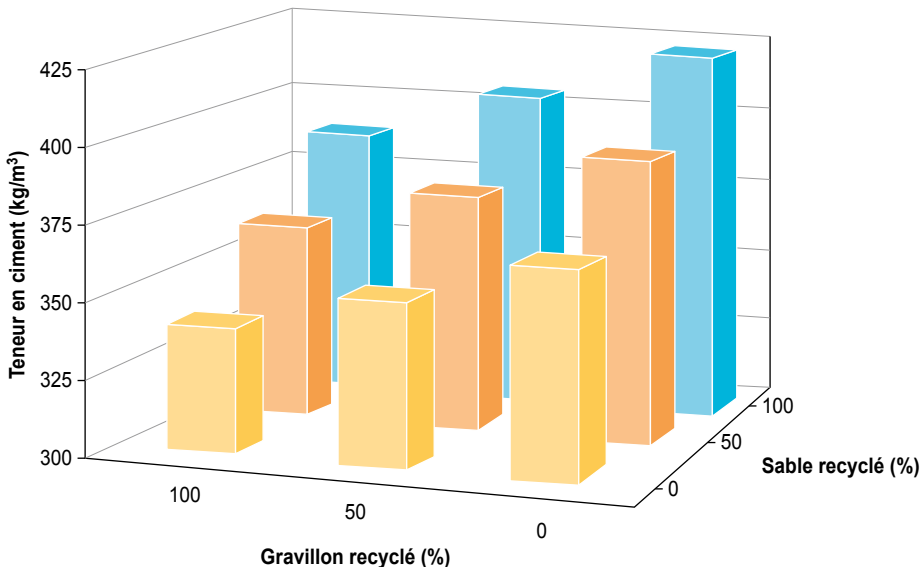
formulation des bétons de GBR. Même s'il est toujours nécessaire de valider les mélanges en laboratoire, il rend la conception des bétons plus rapide et plus précise qu'avec les méthodes empiriques, car il prend en compte les propriétés réelles des constituants (notamment leur compacité). Il fournit également un dimensionnement plus complet du béton, puisqu'il ne prédit pas que l'affaissement et à la résistance à la compression (...), et il est conçu pour intégrer des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, fillers calcaires, etc.).

Ce type d'approche devient nécessaire lorsqu'il s'agit non seulement d'optimiser un béton ayant un taux de recyclage donné, mais surtout pour optimiser le taux de recyclage afin que le bénéfice, économique ou environnemental, soit maximisé. C'est d'ailleurs l'objectif fondateur du Projet National RECYBETON, et il est clair que cet optimum ne correspond pas nécessairement au maximum du recyclage puisque, par exemple, pour des taux élevés, l'augmentation induite de la teneur en ciment neutralise le gain sur les granulats naturels. Pour répondre à cette problématique avec la méthode empirique de Dreux-Gorisse, il faut multiplier les essais pour formuler des bétons avec des taux variables de GBR, ce qui est prohibitif. La méthode scientifique parvient très vite à la solution, à l'aide d'un « solveur ».

Par exemple, la Figure 15.6 montre la consommation en ciment calculée avec la méthode scientifique pour différents taux de recyclage, pour un

Figure 15.6

Dosage en ciment calculé pour différents taux volumiques de substitution en GBR, pour un béton d'affaissement 10 cm et de résistance à la compression 35 MPa (selon [Dao, 2012]). À noter que, dans ce cas, le remplacement des gravillons naturels par des GBR diminue la demande en ciment



béton d'affaissement 10 cm et de résistance à la compression 35 MPa ([Dao, 2012]). Les calculs fournissent de la même façon les quantités nécessaires de chaque constituant. Il devient alors facile, en intégrant le coût financier ou environnemental de chaque constituant, de trouver le dosage optimal en granulats recyclés. Ainsi, si les granulats naturels sont localement rares ou chers, la tendance sera de mettre plus de GBR. De même, la teneur optimale en GBR sera influencée par la nature des granulats naturels qu'il remplace. Si les granulats naturels sont localement de moindre qualité (faible compacité et/ou moindres propriétés mécaniques), l'augmentation de la quantité de ciment liée à présence des GBR sera minimisée et le taux de recyclage optimum sera plus important.

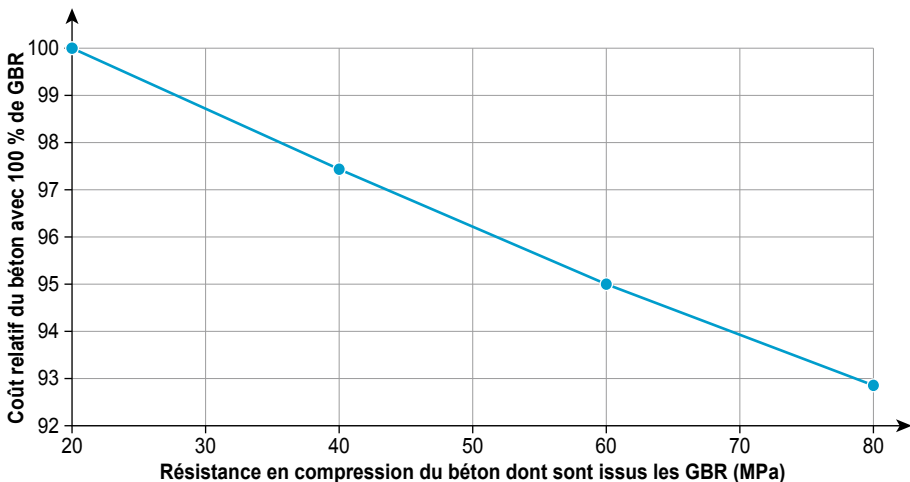
En conclusion, l'utilisation d'un modèle scientifique, tel que celui présenté dans ce chapitre, permet explicitement de prendre en compte les conditions locales afin d'optimiser le recyclage des GBR dans le béton.

15.4.2. Intérêt du tri sélectif

Lorsque la résistance du béton parent augmente, les propriétés mécaniques des GBR sont aussi améliorées, notamment le coefficient k_g impliqué dans le calcul de la résistance à la compression des bétons de GBR (voir chapitre 10). Des bétons de différentes origines sont généralement mélangés sur les plateformes de recyclage pour produire un GBR de « moyenne qualité », mais la question

Figure 15.7

Coût théorique relatif pour les bétons incorporant 100 % de GBR, d'affaissement de 10 cm et de résistance moyenne à la compression de 35 MPa, en fonction de la résistance à la compression du béton parent d'où sont issus les GBR (selon [Dao, 2012]). Le béton de GBR pris comme référence est réalisé avec des GBR issus d'un béton de 20 MPa.



de l'intérêt d'un tri sélectif peut se poser. La méthode scientifique de formulation peut alors servir pour évaluer rapidement ce scénario, en termes d'économie sur la production des GBR quand des GBR de haute qualité sont utilisés. La Figure 15.7 résume les simulations effectuées par [Dao, 2012] pour un béton d'affaissement 10 cm et de résistance à la compression 35 MPa. Le taux de recyclage était de 100 %, mais un remplacement partiel peut également être considéré. Les termes k_g du GBR ont été déduits de leur coefficient Micro-Deval (voir Équation 10.7). La Figure montre des différences de coûts significatifs, qui peuvent justifier une sélection des déchets de béton de démolition lors d'un projet de réhabilitation important.

Une fois de plus, l'approche rationnelle s'avère utile pour affiner le scénario de recyclage.

14.5. Conclusion

Tout d'abord, l'expérience montre qu'il est possible de formuler des bétons avec des taux élevés de GBR, tout en gardant des dosages en ciment raisonnables (voir chapitres 22 et suivants).

La faible compacité des GBR, en particulier celle des sables, liée au processus de concassage inhérent à leur mode de production, et leur caractère frottant hérité de la pâte de ciment résiduelle, conduit à augmenter la teneur en eau efficace des bétons de GBR. Le dosage en eau totale augmente donc en raison de l'augmentation de l'eau efficace, mais en grande partie aussi pour compenser l'absorption d'eau des GBR, qui est généralement beaucoup plus élevée que celle des granulats naturels (surtout pour les sables). Il est important de faire la différence entre ces deux effets et d'identifier clairement la teneur en eau efficace pour contrôler la formulation du béton. Cela est vrai pour les bétons de granulats naturels, mais plus encore pour les bétons de GBR.

Pour des spécifications élémentaires, i.e. la résistance à la compression et l'affaissement, la méthode empirique de Dreux-Gorisse classiquement utilisée en France peut être adaptée pour formuler des bétons de GBR courants, ayant un taux de recyclage défini *a priori*. Une des précautions à respecter, parmi d'autres, est de prendre une marge de sécurité plus grande sur la résistance à la compression moyenne, pour garantir la résistance caractéristique requise. Ceci est lié au fait que les GBR sont plus variables par nature que les granulats naturels d'une origine donnée.

Cependant, l'objectif principal n'est généralement pas de formuler un béton avec un taux de recyclage donné, mais plutôt d'optimiser le taux de recyclage afin que le bénéfice, qu'il soit économique ou environnemental, soit maximisé. C'est l'objectif fondateur du Projet National RECYBETON, et il est clair que cet optimum ne correspond pas nécessairement au maximum du recyclage puisque, par exemple, pour des taux élevés, l'augmentation nécessaire de la

quantité de ciment, pour garantir la durabilité, contrebalance le gain sur les granulats naturels.

Dans ce cas, les méthodes expérimentales sont trop fastidieuses et trop imprécises. Des modèles plus scientifiques pour prédire la compacité optimale [de Larrard, 1999] et les propriétés mécaniques associées (voir chapitre 10), implantés dans des logiciels comme BetonlabPro [de Larrard et Sedran, 2007] sont essentiels pour optimiser le taux de GBR et pour proposer des scénarii de recyclage optimisés.

Dans un processus de formulation, il y a toujours un aspect durabilité. C'est aujourd'hui la principale raison qui empêche les forts taux de recyclage, en raison d'un manque de recul à long terme. Une approche prescriptive (normative) peut être utilisée pour assurer cette durabilité, mais elle limite le taux de recyclage. Une approche axée sur la performance est alors préférable. Les recherches présentées dans le chapitre 12 devraient aider à mieux identifier dans le futur les critères et les seuils adaptés à la durabilité des bétons de GBR.

Chapitre 16.

Développement, production et contrôle de bétons recyclés à taux élevé de substitution

S. Favre¹, G. Noworyta², T. Sedran³

Résumé – En 2005, une usine de traitement des eaux, située à Saint-Cloud en région parisienne, a été partiellement démantelée, puis reconstruite. À cette occasion, 6 000 tonnes de granulats de béton recyclé (GBR), de granulométrie 0/20 mm, ont été fabriquées sur place. Dans un souci d'éco-conception, le Maître de l'Ouvrage public, propriétaire de l'usine, a souhaité que tous les GBR soient recyclés dans le nouvel ouvrage, afin notamment d'économiser les ressources naturelles. Avec l'entrepreneur, ils se sont basés sur le corpus des normes disponibles à l'époque, qui permettaient l'utilisation des GBR à des taux élevés dans le béton, pour recycler entièrement ces GBR. Ce chapitre décrit les normes contemporaines au chantier, la caractérisation des granulats, la formulation d'un béton C25/30 contenant entre 90 et 100 % de GBR, et les résultats du contrôle qualité. Sept ans avant le début du Projet National RECYBETON, ce chantier a été manifestement un précurseur dans le paysage français, en démontrant la faisabilité d'un recyclage complet et localisé.

16.1. Introduction

En 2005, une usine de traitement des eaux en béton, située à Saint-Cloud en région parisienne, a été partiellement déconstruite, puis reconstruite. À cette occasion, la démolition du toit d'un réservoir d'eau a généré des déchets de béton qui ont été concassés sur place pour former une grave 0/80 mm. Un concassage secondaire et un criblage ont alors permis d'obtenir environ 6 000 tonnes de GBR 0/20 mm, stockées à l'air libre, sur le chantier (voir Figure 16.1).

1. Léon Grosse, Paris.

2. CTG-Calcia, Paris.

3. IFSTTAR, Nantes.

Figure 16.1

Démolition de l'usine de traitement des eaux et stock de GBR 0/20 mm



Crédit photo : Léon Grosse.

Le propriétaire public de l'installation a tenu à ce que tous ces matériaux soient recyclés sur place afin d'économiser les ressources naturelles et, plus généralement, dans un souci d'éco-conception. Une solution pour atteindre cet objectif était d'utiliser massivement les GBR dans le nouveau béton, lorsque cela était possible.

Dans ce contexte, l'entreprise mandataire (Léon-Grosse) a analysé les normes et documents disponibles en 2005, concernant l'utilisation des GBR dans le béton (voir chapitre 14 « Spécification des bétons de GBR »). Il s'agit de :

- NF EN 206-1 (2004) ;
- NF EN 12 620 ;
- XP P 18 545 ;
- Fascicule 65 A ;
- Fascicule 74 ;
- BAEL 92 révisé 99 (à cette époque, ce document fixait les règles de dimensionnement des ouvrages en béton armé ; depuis lors, il a été remplacé par l'Eurocode 2).

En 2005, la norme « béton » NF EN 206-1 indiquait que les granulats conformes aux spécifications des normes XP P 18 545 et NF EN 12 620 étaient adaptés à une utilisation dans le béton. En effet, ces deux normes intégraient les GBR dans leur champ d'application ; dans la norme NF EN 12 620, il y était indiqué qu'un « GBR » « est un granulat issu de la transformation de matériaux inorganiques précédemment utilisés dans la construction » ; dans la norme XP P 18 545, on trouvait « un granulat est un matériau granulaire naturel, artificiel ou recyclé ». Ainsi, en 2005, le Maître d'Ouvrage public et l'entrepreneur en ont conclu que les GBR étaient autorisés, même à un taux de substitution élevé, à condition de respecter leur classification selon les indices de la norme XP P 18 545 (subsidaire à la norme NF EN 12 620).

Selon la norme XP P 18 545, des granulats indexés A étaient exigés pour les bétons de résistance à la compression supérieure à 35 MPa, dédiés à la fois aux infrastructures et aux bâtiments. Certaines caractéristiques pouvaient cependant être indexées B et, au plus deux d'entre elles C ou D, si des études et références antérieures existaient cependant. Pour les bétons ordinaires (item 10.7.3.), les granulats indexés C pouvaient convenir, ainsi que ceux qui avaient au plus deux caractéristiques indexées D, si des études et des références antérieures montraient la faisabilité.

Selon le Fascicule 65 A, les granulats devaient être indexés B. Pour les bétons dont la résistance à la compression était inférieure à 35 MPa, certaines caractéristiques pouvaient même être indexées C, en fonction de l'expérience locale, des études et des expériences antérieures.

Selon le chapitre V 7 du Fascicule 74 (réservoir en béton), la fabrication du béton devait être conforme au Fascicule 65 A et selon le chapitre XIV « Essais et évaluation », les exigences du Fascicule 65 A pouvaient être appliquées.

Enfin, selon le BAEL 92, le béton était composé de granulats réguliers avec un dosage en ciment au moins égal à 300 kg/m³.

En l'absence d'une interdiction normative concernant le recyclage des GBR dans le béton, l'entrepreneur a alors procédé à la caractérisation du stock de GBR. Dans ce but, un échantillon du GBR 0/20 mm a été séparé en un sable 0/4 mm et un gravillon 4/20 mm, bien que le GBR brut (0/20) ait été utilisé tel quel pour produire le béton de GBR. Les résultats sont présentés dans les Tableaux suivants. Pour informations, l'absorption d'eau du GBR 0/20 mm était de 8,9 % et sa masse volumique de 2,29 kg/dm³. L'absorption d'eau du sable 0/4 mm et du gravillon 4/20 mm était de 12 % et 7,3 %, respectivement.

Le Tableau 16.1 montre que le rapport gravillon/sable (G/S) au sein du GBR 0/20 est d'environ 1,7, valeur qui révèle que sa teneur en sable est plutôt faible. De plus, ce rapport, mesuré sur différents échantillons, présente une forte dispersion. Les conséquences de ces particularités sur la formulation du béton seront discutées plus loin.

Le Tableau 16.4 montre que les caractéristiques des GBR sont principalement indexées A, à l'exception du coefficient Los Angeles, indexé B pour le gravillon 4/20 mm, et de l'absorption d'eau, indexée D pour la sable 0/4 mm. Compte tenu de ces résultats, l'entrepreneur et le Maître de l'Ouvrage ont considéré que le stock de GBR pouvait être utilisé pour produire les bétons attendus. Cependant, par précaution, ils ont décidé de limiter l'utilisation des GBR au béton C25/30 destiné à l'immeuble de bureaux associé au projet, et de les exclure du béton destiné aux parties « hydrauliques » de la réhabilitation, dont les bassins de stockage et de traitement. Le paragraphe suivant décrit le processus de formulation des bétons, notamment celui de GBR.

Tableau 16.1

Courbe granulométrique de plusieurs échantillons de GBR 0/20 prélevés dans le stock

Tamis (mm)\Échantillon #	05 135 Passants (%)	05 136 Passants (%)	05 00462 Passants (%)
25		100	100
20	100	99	98
16	95	86	89
14	90,1	78,2	83
12,5	84,1	70,2	76
10	77,7	57,8	65
8	69,1	47,8	55
6,3	60,1	38,5	47
5,6	43,2	34,7	43
4	31,5	28,9	35
2	20,3	19,6	24
1	12,4	13,3	16
0,500	5,7	8	9
0,250	2,3	4,1	4
0,125	1,1	1,8	2
0,063	0,4	0,9	1,7

Tableau 16.2

Courbe granulaire du gravillon de GBR de classe 4/20 mm

Taille (mm)	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25
Passants (%)	8	16,4	26,3	33,3	53,7	66,7	85,4	96,8	100

Tableau 16.3

Courbe granulaire du sable de GBR de classe 0/4 mm

Taille (mm)	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8
Passants (%)	6,0	9,4	17,6	33,3	52,7	75,5	99,6	100

Tableau 16.4

Résumé des caractéristiques physiques et chimiques des GBR

Essai	Valeur		Catégorie selon NF EN 12620	Indice selon NF XP P 18-545
4/20 mm				
Los Angeles (NF EN 1097-2)	LA	40	LA ₄₀	B
Aplatissement (NF EN 933-3)	A	10	FL ₁₅ (A ≤ 15)	A
Granularité 4/20 mm (NF EN 933-1)	Passant à 0,063 mm	1,4 %	f _{1,5} G _C 90/15	A
0/4 mm				
Propreté (équivalent de sable) (NF EN 933-8)	SE	67	Déclaration	A
Granularité 0/4 mm (NF EN 933-1)	Passant à 0,063 mm	6 %	f ₁₀ G _f 85	A
Masse volumique réelle et absorption d'eau (NF EN 1097-6)	MVr	2,03 t/m ³	Déclaration	–
	Ab	11,9 %		D
Chlorures solubles dans l'eau (NF EN 1744-1)	%	8.10 ⁻⁴ %	Déclaration, à la demande du client	Déclaration si > 0,01
Sulfates solubles dans l'eau (NF EN 1744-1)	%	5.10 ⁻⁵ %	–	A
Polluants organiques affectant la prise du ciment (NF EN 1744-1)	–	Pas de coloration	–	Résultats à déclarer
Impuretés prohibées (NF EN 1744-1)	ImP	11.10 ⁻⁵ %	–	A

16.2. Formulation du béton

16.2.1. Bétons préliminaires

Environ 6 000 tonnes de GBR 0/20 mm étaient disponibles, alors que le volume total de béton C25/30 à produire pour le projet était d'environ 3 500 m³. Un taux de recyclage élevé de 90 à 100 % était donc nécessaire pour consommer tout le stock de GBR au sein de la construction.

L'ensemble des spécifications pour le béton C25/30 étaient les suivantes :

- classe d'exposition : XF1 (selon EN 206 – voir chapitre 14 « Spécifications des bétons de GBR ») ;
- affaissement après 30 min : supérieur à 160 mm (S4) ;
- résistance à la compression au jeune âge (1 jour) : environ 6-7 MPa pour pouvoir décoffrer après 16 h, pour une rotation quotidienne des coffrages ;
- résistance à la compression caractéristique à 28 jours : supérieure à 25 MPa.

Les GBR ayant une forte demande en eau, il a été décidé de les pré-humidifier à une teneur en eau de 12 %, pour s'assurer que même le sable 0/4 mm était saturé. L'objectif était d'éviter tout raidissement prématuré du béton juste après le malaxage, en raison de l'absorption d'eau des GBR.

Trois ciments différents ont été testés afin de trouver le meilleur compromis entre coût et évolution de la résistance à la compression (entre 1 et 28 jours) : un CEM III 32,5, un CEM II 32,5 contenant du laitier de haut fourneau et un CEM I 52,5 (selon EN 197-1). Quatre adjuvants de types polycarboxylates ont également été testés afin de vérifier leur comportement en termes d'affaissement initial sans ségrégation et de maintien de l'affaissement pendant 30 minutes. La ségrégation était une préoccupation majeure, compte tenu du rapport G/S élevé et de sa fluctuation. De plus, l'absence de particules fines dans les GBR entraîne une faible compacité du squelette granulaire, et donc une forte demande en eau du béton. Par conséquent, l'introduction d'un sable naturel 0/2 mm, correcteur de la granularité des GBR, a aussi été testée à ce stade.

Ainsi, 11 gâchées préliminaires ont été réalisées (dont quelques gâchées d'ajustement), selon les données du Tableau 16.5.

En comparant l'affaissement du béton n° 1 (A = 0) et celui du béton n° 3 (A = 200 mm), pour une même quantité d'eau, il est apparu que l'adjuvant n° 1 n'était pas compatible avec le ciment CEM III. De même, en comparant les bétons n° 10 et n° 11, il est apparu que les adjuvants n° 2 et n° 3 avait la même efficacité à court terme (affaissement à 5 minutes), mais que l'adjuvant n° 2 était un peu moins efficace pour le maintien de l'affaissement à 30'. Le même constat sur le maintien de l'affaissement a été fait pour l'adjuvant n° 4, au regard du comportement des bétons n° 7 et n° 7b.

Les bétons à base du ciment CEM III n'ont présenté aucune résistance à la compression (f_c) à 1 jour, alors que ceux à base du ciment CEM II présentaient une marge de sécurité trop faible pour permettre le décoffrage à 16 h, probablement en raison de la présence du laitier dans ces deux ciments. De plus, le ciment CEM II a montré une augmentation insuffisante de la résistance à la compression entre 7 et 28 jours.

Selon le Fascicule 65A, il est nécessaire que le béton atteigne une résistance moyenne à 28 jours conforme aux spécifications suivantes, pour garantir la résistance caractéristique à la compression de 25 MPa : $f_c \geq 25 + (C_E - C_{\min})$ et $f_c \geq 1,1 \cdot 25$, avec C_E la classe vraie du ciment à 28 jours (valeur moyenne) et C_{\min}

Tableau 16.5

 Résumé des bétons préliminaires (en kg/m³)

Type de ciment	CEM III 32,5				CEM II 32,5			CEM I 52,5				
n° du béton	01	02	03	04	09	10	11	07	07b	08	19	
Ciment (kg)	295	331	371	334	361	343	337	345	334	362	335	
Gravillons de GBR 0/20 (kg)	1 631	1 553	1 571	1 544	1 530	1 542	1 558	1 586	1 536	1 534	1 550	
Sable naturel 0/2 (kg)									85			
Type d'adjuvant	n° 1	n° 2	n° 2	n° 2	n° 2	n° 2	n° 3	n° 4	n° 2	n° 2	n° 2	
Taux d'adjuvant (%)	2	1	1,5	1	0,9	1,2	1,0	2	1	1	1	
Eau efficace (kg)	177	199	178	202	198	198	194	182	176	199	201	
Affaissement à 5' (mm)	0	220	200	220	200	210	210	210	220	220	220	
Affaissement à 30' (mm)	0	190	80	160	140	120	80	130	160	170	160	
f _c 1 jour (MPa)				0	7	7			23	25	21	24
f _c 2 jours (MPa)				6,5	18	19			32	33	28	
f _c 7 jours (MPa)				22	23	23			42	42	38	40
f _c 28 jours (MPa)								48	47			45

la valeur minimale de la classe du ciment (valeur minimale garantie ou valeur caractéristique). La différence entre la valeur moyenne et la valeur caractéristique sert à couvrir les variations inévitables dans la composition du béton pendant la phase de construction. Pour le CEM I 52,5, $C_E = 64,4$ MPa (Tableau 16.6), et $C_{min} = 52,5$ MPa. Cela conduit à une valeur cible de f_c égale à 36,9 MPa. Ainsi, on peut constater que les deux exigences en termes de résistance f_c à 1 jour et à 28 jours étaient bien satisfaites en utilisant le ciment CEM I.

Tableau 16.6

Propriétés du ciment CEM I

Masse volumique (kg/dm ³)	3,15
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	4 100
R _c à 1 jour (MPa)	23
R _c à 2 jours (MPa)	36
R _c à 7 jours (MPa)	51,5
R _c à 28 jours (MPa)	64,4

En conclusion, à l'issue de cette étape préliminaire, l'adjuvant n° 2, le ciment CEM I 52,5 et le béton n° 19 ont été sélectionnés pour une étude plus approfondie.

16.2.2. Béton dérivé

Afin d'assurer la robustesse d'une formule de béton durant la période de construction, le Fascicule 65A recommande de vérifier qu'elle respecte bien les exigences requises, après variations de $\pm 10 \text{ l/m}^3$ de l'eau efficace. Cet essai a été réalisé sur le béton n° 19 sélectionné à l'issue de l'étape précédente, mais seulement avec 10 litres d'eau en plus (par manque de temps). Le Tableau 16.7 montre que même le béton dérivé satisfait à l'essai, en conservant bien la classe de résistance C 25/30 (voire même C30/37).

Tableau 16.7

Propriétés du béton n° 19 (voir Tableau 16.5) nominal et dérivé

Béton n°	19 (nominal)	20 (n° 19 + 10 l)
Affaissement à 5' (mm)	220	240
Affaissement à 30' (mm)	160	210
f_c 1 jour (MPa)	24	19,5
f_c 7 jours (MPa)	40	36,5
f_c 28 jours (MPa)	45	42

16.2.3. Évaluations supplémentaires

La Figure 16.2 confirme que, comme attendu (voir chapitre 11 « Propriétés mécaniques différées »), l'introduction d'un taux élevé de GBR conduit à un retrait total important, ce qui augmente le risque de fissuration par retrait empêché (bien qu'il ait été constaté sur un chantier postérieur qu'un retrait aussi élevé n'a pas entraîné de fissurations particulières – voir chapitre 22 « Dallage : Chaponost »). Dans ce cas, une attention particulière doit être portée à la cure du béton, du moins lorsque cela est possible (sur des parties horizontales, par exemple).

L'élévation de la température du béton n° 19 a été mesurée dans une cellule quasi-adiabatique censée représenter des pièces d'épaisseur comprise entre 20 à 60 cm telles que celles coulées sur le chantier. La Figure 16.3 montre que même en utilisant le ciment CEM I 52,5, l'élévation de la température reste modérée dans la structure. Il n'y avait donc pas de risque de formation d'ettringite différée interne (réaction sulfatique interne RSI) car la température maximale du béton ne dépassait pas 60 °C [IFSTTAR, 2017]. Le risque de fissuration dû aux gradients thermiques ou au retrait thermique était donc aussi limité.

Figure 16.2

Retrait libre total moyen et perte de masse mesurés sur trois éprouvettes $7 \times 7 \times 28$ cm du béton n° 20 (voir Tableau 16.7, ce béton dérivé a été sélectionné car il correspondait au « pire » cas rencontré)

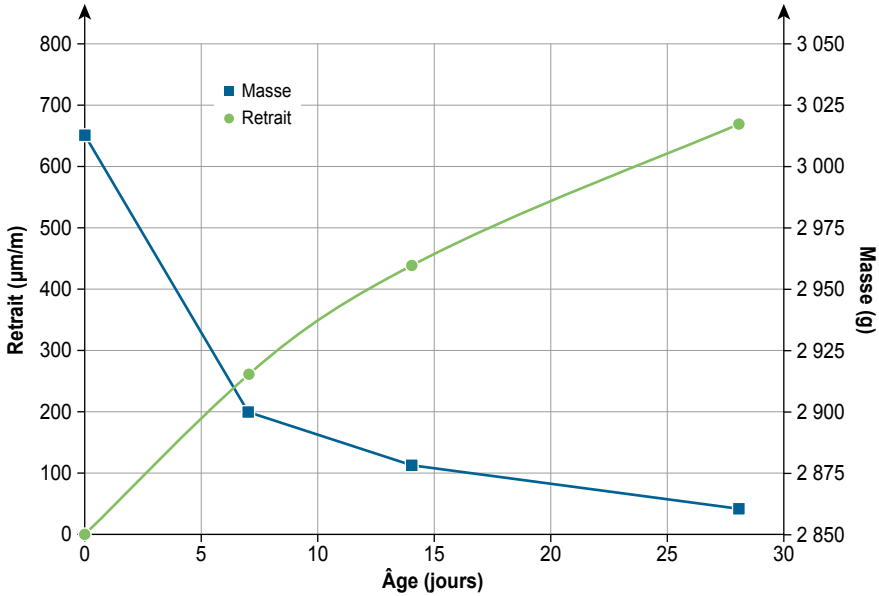
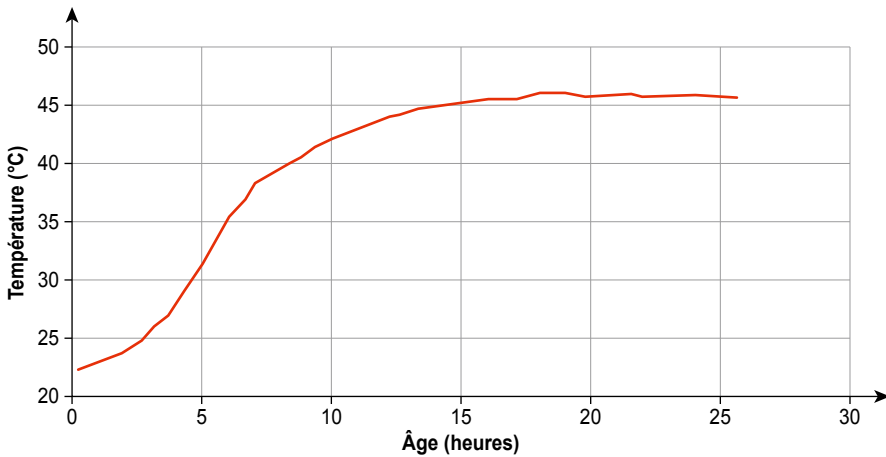


Figure 16.3

Élévation de la température du béton n° 19 (voir Tableau 16.5) dans une cellule quasi-adiabatique. L'essai a été arrêté lorsque la température a atteint sa valeur maximale.



Enfin, le risque de réaction alcali-silice (RAS) du béton n° 19 a été évalué selon le protocole de la norme FD P 18-464. Pour le projet, le niveau de prévention B a été retenu, correspondant à la catégorie d'ouvrage II où les risques de désordres sont peu tolérables, et à la classe d'exposition XAR2 (hygrométrie supérieure à 80 % ou en contact avec l'eau).

Dans un premier temps, suite à un essai microbar réalisé selon la norme NF P 18-594, les GBR 0/20 mm se sont révélés potentiellement réactifs (PR). Le bilan en alcalins actifs équivalents $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ du béton a alors été calculé (Tableau 16.8). Sa valeur était de 2,58 kg/m^3 . Selon la norme FD P 18-464, c'est une condition suffisante pour exclure tout risque de réaction alcalis-granat, compte tenu du fait que cette teneur est inférieure à $T_m = 3,5/(1+2V_c)$, où V_c est le coefficient de variation de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ actifs dans le ciment. Avec $V_c = 6,8\%$ pour le CEM I utilisé, T_m est égal à 3,08 kg/m^3 , ce qui exclut bien un risque de RAS pour le béton retenu. Néanmoins, pour garantir ce résultat, et compte tenu du manque d'expérience avec les GBR, il a été décidé d'effectuer une vérification supplémentaire par un essai d'expansion sur béton, selon la norme NF P18 454. Après 2 semaines, l'expansion moyenne mesurée sur 3 éprouvettes était de 0,01 %, c'est-à-dire une valeur bien inférieure au seuil habituellement retenu de 0,02 %, et aucune valeur individuelle ne dépassait 0,025 %. La norme FD P 18-456 stipule dans ce cas que le béton peut être déclaré non réactif.

Tableau 16.8

Bilan des alcalins dans le béton n° 19

	Dosage (kg/m^3)	Alcalins actifs $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (%)	Alcalins actifs $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (kg/m^3)
GBR 0/20	1 550	0,0099*	0,15
CEM I 52,5	335	0,54**	1,81
Teneur en adjuvant	3,51	< 3,2**	< 0,11
Eau totale	339	< 0,15***	< 0,51
Eau efficace	201		

* mesuré ; ** à partir de la FTP ; *** à partir de la norme EN 1008.

16.3. Fabrication et essais du béton de GBR sur chantier

16.3.1. Contrôle de la teneur en eau des GBR sur chantier

Comme expliqué précédemment, les GBR présentent une forte absorption d'eau. Il a alors été décidé de les pré-humidifier à une teneur en eau d'environ 13 %, pour que le sable 0/4 mm soit saturé au maximum. L'objectif était d'éviter tout raidissement du béton juste après le malaxage, et de limiter la variation de l'ouvrabilité sur le chantier.

Pour ce faire, un système de type arrosage de jardin a été installé sur les stocks situés à proximité de la centrale à béton. Ce système intermittent fonctionnait quelques minutes par heure, de la mi-journée jusqu'au soir, pour maintenir l'humidité presque constante, y compris dans les 10- 15 premiers cm de la surface sujets à l'évaporation. Ce dispositif simple s'est avéré efficace. Pour s'assurer que la teneur en eau restait dans la plage de 13 % \pm 0,5 %, un contrôle journalier a été effectué directement sur le stock avec un capteur micro-ondes, calibré chaque semaine par un essai de teneur en eau par dessiccation d'échantillons de GBR. De plus, durant le malaxage, la maniabilité a été systématiquement contrôlée avec le wattmètre du malaxeur (la valeur de 30 était visée) comme garantie supplémentaire que l'eau efficace était maintenue constante.

16.3.2. Ajustements finaux de la formule pendant la mise en œuvre du béton

À la suite des étapes de formulation précédentes, un essai de convenance sur chantier a été effectué en conditions réelles, avec le béton n° 19, en début de travaux. Cet essai a montré que le béton n'était pas satisfaisant (ségrégation et aspect non concluant à l'état frais). Il a alors été décidé de tester le béton A (voir Tableau 16.9), dérivé du béton n° 19, en augmentant le volume de pâte (avec presque le même rapport eau efficace/ciment) et en diminuant la teneur en adjuvant. Cette formule a été utilisée pour réaliser les premiers murs (environ 600 m³). Mais ce béton avait un dosage en ciment (trop) élevé, et il présentait encore une légère tendance à la ségrégation, avec apparition aléatoire de nids de cailloux.

Comme évoqué dans l'étude préliminaire de formulation du béton, ce comportement pouvait provenir de l'absence de fines dans le GBR. Il a alors été décidé de corriger la partie inférieure de la granularité du GBR en y introduisant le sable naturel 0/2 mm utilisé dans le béton 7b (voir Tableau 16.5). Le béton B a ainsi été obtenu, en ajoutant 10 % de sable naturel 0/2 mm. Il a donné des résultats satisfaisants en termes de maniabilité (voir Figure 16.4) et de qualité de parement (voir Figure 16.5). Il a alors été utilisé pour la suite des travaux.

Tableau 16.9

Formules finales et résultats des essais de convenueance

	Béton A	Béton B
Date de fabrication	20/04/2005	06/05/2005
CEM I 52,5 N (kg)	389	320
GBR 0/20 mm (kg)	1456	1480
Sable naturel 0/2 mm (kg)	–	150
Adjuvant n° 2 (kg)	2.5	3.5
Eau efficace (kg)	228	185
E_{eff}/C	0,59	0,58
Eau totale	358	324
Température béton/extérieure	24 °C/17 °C	25 °C/19 °C
Teneur en eau des GBR (%)	13 %	13 %
Valeur du wattmètre	30	30
Air (%)	1,1 %	1,4 %
Affaissement à 5'	200	205
f_c 1 jour (MPa)	–	–
f_c 2 jours (MPa)	26	24
f_c 7 jours (MPa)	32	32,1
f_c 28 jours (MPa)	39	40,4
f_c 90 jours (MPa)	–	48,2

Figure 16.4

Aspect du béton frais



Crédit photo : Léon Grosse.

Figure 16.5

Aspect des surfaces en béton durci



Crédit photo : Léon Grosse.

16.3.3. Suivi de la résistance du béton

Pendant les travaux, des éprouvettes ont été coulées tous les 250 m³ pour mesurer la résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours. Les résultats sont résumés dans le Tableau 16.10. À 28 jours, la résistance à la compression

Tableau 16.10

Suivi de la résistance à la compression pendant les travaux de bétonnage

Dates	Référence de l'essai	f _c moyenne (MPa)		
		7 jours	28 jours	90 jours
29/04	1 309	32,4	36,8	39,8
25/05	1 399	29,0	33,7	38,4
02/06	1 423	–	34,5	–
02/06	1 422/1 423	30,6	34,3	–
16/06	1 468	27,9	32,7	37,6
04/07	1 531	32,1	40,4	41,7
19/07	1 555	31,1	36,6	41,8
29/08	1 645	25,9	31,7	32,9
19/09	1 709	24,6	31,0	34,0
26/09	1 745	27,4	31,1	34,0
21/10	1 860	32,4	35,4	39,8
10/11	1 980	25,9	30,1	32,8
13/11	2 023	27,6	34,0	48,2

était comprise entre 30,1 et 40,4 MPa, avec une valeur moyenne de 34 MPa et un écart-type de 3 MPa. Ainsi, la classe de résistance requise C25/30 était satisfaite, même si sa variabilité était quelque peu élevée.

16.4. Conclusion

En 2005, après la démolition d'une usine de traitement des eaux, 6 000 tonnes de granulats de béton recyclé (GBR) de granularité 0/20 mm ont été produites sur place. Le Maître d'Ouvrage public a tenu à ce que tous ces matériaux soient recyclés sur le chantier pour économiser les ressources naturelles et, plus généralement, par souci d'éco-conception. La solution adoptée par l'entrepreneur a été de recycler les GBR à un taux élevé dans les 3 500 m³ de béton C25/30 destinés à l'immeuble de bureaux associé à la réhabilitation. Ce projet a conduit aux conclusions suivantes :

- en 2005, le corpus des normes de l'époque a permis cette réalisation. Aujourd'hui, les normes, notamment la norme NF EN 206/CN, sont plus restrictives (voir chapitre 14 « Spécifications ») ;
- les GBR ont présenté une absorption d'eau élevée qui a nécessité la pré-humidification des stocks à l'aide d'un système d'arrosage, afin de saturer au maximum les granulats. Ainsi, durant et après le malaxage, l'absorption d'eau par les GBR et le changement de maniabilité associé ont pu être évités. Une teneur en eau de 13 % a été visée afin d'assurer une saturation maximale de toutes les classes granulaires du GBR ;
- les GBR ont été produits en une seule coupure et d'importantes variations en leur sein du rapport gravillons/sable (G/S) ont été constatées. De plus, ils comportaient peu de fines (G/S = 1,7 environ). Il est alors apparu nécessaire de corriger leur granularité avec l'apport d'au moins 10 % de sable naturel 0/2 mm, afin d'éviter la ségrégation et d'améliorer le comportement du béton à l'état frais ;
- même si un béton C25/30 était visé, un ciment CEM I 52,5 a dû être utilisé suite aux essais préliminaires qui ont montré qu'un CEM III 32,5 ou un CEM II 32,5 contenant du laitier de haut fourneau donnaient une résistance à la compression insuffisante à 1 jour, incompatible avec un décoffrage à 16 h ;
- il aurait été possible de produire un béton C30/37 ou C35/45 en ayant un meilleur contrôle de la granularité des GBR (avec deux coupures par exemple) et de la teneur en eau du béton ;
- aujourd'hui, après plus de 12 ans, le béton se comporte normalement, sans désordres ou pathologies particulières.

Ce chantier est le premier chantier documenté où un béton (presque) entièrement recyclé a été utilisé en France. C'est un exemple précurseur et réussi de l'application des concepts actuels de « circuit-court » et de « reconstruction de la ville dans la ville » (voir chapitre 33 « Discussion : conditions d'un processus durable »).

Partie VI.

Béton recyclé armé

Bernard Fouré¹

Ce chapitre compare le comportement d'éléments structuraux armés en bétons de GBR et en bétons de granulats naturels, bétons de même classe de résistance à la compression.

Le chapitre 17 traite de l'adhérence entre le béton de GBR et les armatures. Les essais montrent qu'il n'y a pas de différence significative de résistance d'adhérence ultime entre bétons de GBR et bétons de granulats naturels. Le rapport entre adhérence et résistance à la traction peut être toutefois plus élevé pour le béton de GBR, en raison de sa plus faible résistance à la traction, comparativement au béton de granulats naturels.

En ce qui concerne les pièces en compression, le chapitre 18 s'intéresse aux poteaux armés peu élancés. Leur résistance à l'état limite ultime (ELU) n'est pas affectée par l'utilisation du béton de GBR, malgré son module d'élasticité plus faible et son fluage plus élevé. Il n'en est pas de même pour les poteaux élancés (chapitre 19), car le module d'élasticité et le fluage du béton de GBR peuvent affecter de manière significative la charge de flambement à l'ELU, et aussi modifier la longueur conventionnelle d'élançement en dessous de laquelle le moment de second ordre peut être négligé dans les calculs.

Pour les poutres en flexion (chapitre 20), la substitution des granulats naturels par des GBR n'affecte pas la résistance à l'ELU. Mais, à l'état limite de service (ELS), le module plus faible et le taux de fluage plus élevé du béton de GBR conduisent à des flèches plus importantes. La largeur et l'espacement des fissures diffèrent peu entre poutres en béton de granulats naturels et en béton de GBR.

1. Consultant, Bougival.

Pour les éléments structuraux où la flèche ou les déformations sont des paramètres sensibles (par exemple à l'ELS ou pour le flambement à l'ELU), il peut être utile de mesurer le module d'élasticité et le fluage du béton de GBR utilisé.

Lorsque l'effort tranchant est la sollicitation principale (chapitre 21), et que les poutres sont dépourvues de cadres, la résistance ultime dépend principalement de la résistance à la traction du béton. Dans le cas d'une rupture fragile, le rapport entre la résistance à l'effort tranchant du béton de GBR et du béton de granulats naturels est globalement proportionnel au rapport entre la résistance à la traction des deux types de béton. Dans le cas d'une rupture non fragile (poutres fortement armées en flexion), le mécanisme ultime implique non seulement la résistance à la traction du béton, mais aussi l'engrènement des granulats entre les parois de la fracture, qui est moins prépondérant pour le béton de GBR ; le rapport entre résistance au cisaillement des deux types de béton est de l'ordre de grandeur de la racine carrée du rapport des résistances à la traction. Lorsque les poutres comportent des cadres, le mécanisme ultime de treillis se développe aussi bien en présence du béton de GBR que du béton de granulats naturels. La résistance ultime ne dépend pas du type de béton (granulats naturels ou GBR), à l'exception peut-être de la résistance limite du béton des bielles de compression.

Chapitre 17.

Adhérence entre armatures et bétons de GBR

E. Ghorbel¹, G. Wardeh¹, B. Fouré²

Résumé – L'objectif de cette recherche a été d'étudier l'adhérence entre armatures et bétons de GBR (granulats de béton recyclé), ainsi que la fissuration associée. Six formules de bétons de GBR et deux formules de béton de granulats naturels (GN), de classe de résistance C25/30 et C35/45 et de même classe de maniabilité S4 ont été retenues. Les bétons ont été fabriqués avec différents taux de sable et de gravillons de GBR, ou avec uniquement des gravillons de GBR.

96 éprouvettes cylindriques en béton ont été préparées pour l'essai d'arrachement direct (pull-out test) avec en leur centre une barre d'acier haute adhérence (HA) de diamètre 10 ou 12 mm, ancrée sur une longueur de cinq ou de dix fois leur diamètre. Pour étudier le comportement à la fissuration, quatre poutres en béton de dimensions 200 × 300 × 3 000 mm, armées de deux barres HA de diamètre 12 mm, ont été fabriquées. Les propriétés mécaniques des bétons ont été caractérisées par leur résistance à la compression et à la traction par fendage, et par leur module d'élasticité. Pour les éléments armés, l'essai de traction directe sur éprouvettes d'arrachement et l'essai de flexion 4 points sur poutres ont été réalisés.

Les résultats des essais d'arrachement ont montré que, pour une même classe de résistance, l'adhérence et les mécanismes de ruine associés demeurent quasi-identiques entre bétons de GBR et bétons de granulats naturels, et que les valeurs obtenues sont au moins cinq fois supérieures à celles retenues par l'Eurocode2 lorsque les coefficients de sécurité sont appliqués.

Pour les essais de flexion sur poutres, les bétons de GBR ont montré une fissuration un peu plus dense, avec des fissures moins espacées, que les bétons de granulats naturels. Cependant, l'ouverture des fissures pour les deux types de béton est du même ordre de grandeur, quelle que soit la classe de résistance à la compression du béton (C25/30 ou C35/45).

1. Université de Cergy-Pontoise, Neuville-sur-Oise, France.

2. Consultant, Bougival, France.

Les modestes différences observées entre bétons sont attribuées à la résistance à la traction des bétons de GBR, un peu plus faible que celle des bétons de granulats naturels. Mais les nombreuses similitudes de comportement permettent de conclure que les prédictions de l'Eurocode2 (EC2) restent valables pour les bétons de GBR étudiés, tant en matière d'adhérence acier/béton que de fissuration, et qu'elles ne remettent pas en cause le niveau de sécurité garanti par ce règlement.

17.1. Introduction

L'adhérence acier/béton est une propriété importante qui contrôle les performances des ouvrages armés. Les premières recherches concernant l'effet des granulats de béton recyclé (GBR) sur l'adhérence acier/béton ont été publiées par Xiao et Falkner [Xiao et Falkner, 2007]. À l'aide d'essais d'arrachement direct, les auteurs ont étudié deux types d'armatures (lisses ou HA) et trois taux de substitution des gravillons naturels par des gravillons de GBR (0 %, 50 % et 100 %, ce qui équivaut à des taux de substitution effectifs (voir définition § 17.2.2) de 0 %, 34 % et 70 %). Ils ont constaté qu'à mêmes quantités de ciment et de sable, et à même rapport eau/ciment, l'adhérence entre armatures lisses et bétons de GBR diminue lorsque le pourcentage de substitution en gravillons augmente, alors qu'il est invariant pour les armatures HA, malgré la plus faible résistance à la compression des bétons de GBR.

[Butler *et al.*, 2011] ont aussi étudié l'influence de la substitution des gravillons naturels par des gravillons de GBR sur l'adhérence acier-béton. Comme précédemment, ils ont conclu qu'il n'y a pas de différence significative d'adhérence entre bétons traditionnels et bétons de GBR.

[Prince et Singh, 2013 ; Prince et Singh, 2014] ont étudié l'adhérence à l'aide de 90 essais d'arrachement direct réalisés avec des barres d'acier crénelées de diamètre 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm, 20 mm et 25 mm, encastrées au centre d'éprouvettes de béton de GBR. Les mêmes formules de béton ont été utilisées avec des taux de substitution en gravillons de GBR de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 % (soit des taux équivalents de 0 %, 13 %, 26 %, 39 % et 52 %, selon la définition donnée au § 17.2.2), en gardant constantes les quantités de sable naturel et de ciment, ainsi que le rapport eau/ciment. Cette méthode de formulation a conduit à une diminution de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution. La longueur d'ancrage, égale à cinq fois le diamètre des barres, a été choisie pour ne pas dépasser la limite élastique de l'acier sous l'effort d'arrachement. Les auteurs ont observé une légère augmentation de l'adhérence, proportionnelle au taux de substitution, en expliquant que ce résultat pouvait être dû à une cure interne apportée par les GBR. Ils ont proposé que la longueur d'ancrage des barres crénelées soit la même, tant pour les bétons de GBR que pour les bétons de granulats naturels.

[Seara-Paz *et al.*, 2013] ont étudié l'adhérence acier/béton à partir de bétons de GBR pour lesquels différents pourcentages de gravillons naturels ont été remplacés par des gravillons de GBR (20 %, 50 % et 100 %). Ils ont réalisé des essais d'arrachement direct avec des barres crénelées de diamètre 10 mm ancrées sur cinq fois le diamètre. Ils ont trouvé que la résistance à la compression et la contrainte d'adhérence diminuaient lorsque le pourcentage de gravillons de GBR augmentait. La diminution de l'adhérence est de 13 % pour un taux de substitution de 100 %.

Les résultats obtenus par [Breccolotti et Materazzi, 2013 ; Kim et Yun, 2013 ; Kim et Yun, 2014 ; Guerra *et al.*, 2014] n'ont montré aucun effet négatif significatif des GBR sur les propriétés d'adhérence acier/béton. On peut toutefois noter que ces différentes études ont été réalisées en n'utilisant à chaque fois qu'un seul type de GBR, généralement un gravillon.

Les essais du programme WRAP [WRAP, 2007a] (programme d'action « déchets et ressources ») ont été basés sur un béton de classe C35/45 contenant soit uniquement des granulats naturels, soit 60 % de gravillons de GBR (c'est-à-dire un taux effectif de substitution d'environ 30 %) ; la résistance à la compression des deux bétons était pratiquement identique, i.e. environ 42 MPa. En réalité, la résistance moyenne f_{bm} du béton de GBR était supérieure de 5 % à celle du béton de granulats naturels, et la résistance moyenne à la traction par fendage $f_{ctm,sp}$ du béton de GBR était environ 6 % inférieure à celle du béton de granulats naturels. Des aciers HA Ø 16 mm ont été utilisés, avec un faible recouvrement de $1,6 \varnothing$ et une grande longueur d'ancrage de $14 \varnothing$. Dans cette configuration, il est probable que l'adhérence ultime f_{bm} ait été contrôlée par le faible recouvrement, et donc que la limite élastique des aciers n'ait pas été atteinte malgré l'ancrage assez long. En supposant que les éprouvettes d'arrachement direct en béton de GBR et en béton de GN aient la même résistance à la compression f_c et au fendage $f_{ctm,sp}$, comme dans l'étude spécifique présentée ci-après, le rapport $f_{bm}/f_{ctm,sp}$ serait alors supérieur d'environ 10 % pour le béton de GBR à celui au béton de granulats naturels.

La présente étude a pour but de caractériser l'adhérence acier/béton de six bétons de GBR ayant deux classes de résistance à la compression C25/30 et C35/45 [Sedran, 2013]. Ces bétons, utilisés dans les différentes études du Projet National RECYBETON, correspondent à des formules où les granulats naturels ont été substitués partiellement ou complètement par des GBR, tout en conservant la même classe de résistance à la compression et la même classe de maniabilité S4 (voir les annexes de ce livre). Par conséquent, les dosages des bétons ont varié au sein de chaque série, contrairement aux études publiées dans la littérature où le volume de liant a toujours été maintenu constant [Gomez-Soberon, 2002a ; Evangelista et de Brito, 2007b].

17.2. Programme expérimental

17.2.1. Matières premières

Les matières premières utilisées dans cette étude ont été sélectionnées et fournies par le Projet National RECYBETON [Sedran, 2013]. Il s'agit des matériaux suivants :

- un ciment Portland CEM II/A-L 42,5 de masse volumique 3,09 kg/m³ et de résistance à la compression à 28 jours, mesurée conformément à la norme NF EN 196-1 [NF EN 196-1, 2006], de 53 MPa ;
- un fillers calcaire Betocarb HP-OG, produit par OMYA SAS, de masse volumique 2,7 kg/dm³ (mesurée selon la norme NF EN 1097-7), de surface spécifique Blaine 500 m²/kg ;
- un superplastifiant MC PowerFlow 3140 ;
- trois granulats naturels et trois GBR (1 sable et 2 gravillons pour chaque origine).

Pour les éprouvettes d'arrachement direct, des aciers HA de diamètre 10 mm et 12 mm ont été utilisés. Ils sont référencés HA10 et HA12 respectivement (Figure 17.1). La limite élastique nominale de ces deux armatures est 500 MPa.

17.2.2. Formulation des bétons

Deux bétons C25/30 et C35/45 du Projet National RECYBETON [Sedran, 2013] ont été retenus pour cette étude. Afin de comparer les résultats à ceux de la littérature, un coefficient de substitution équivalent, Γ , a été introduit. Il est égal au rapport entre la masse des granulats recyclés et la masse totale des granulats dans le béton, soit :

$$\Gamma = \frac{\sum M_{\text{GBR}}}{\sum M_{\text{GN+GBR}}} \quad \text{Équation 17.1}$$

où M_{GBR} et $M_{\text{GN+GBR}}$ sont respectivement la masse de GBR et la masse totale des granulats naturels et de GBR. $\Gamma = 1$ lorsque sable et gravillons sont tous des GBR. Le taux de substitution équivalent pour tous les bétons est donné dans le Tableau 17.1.

Tableau 17.1

Taux de substitution équivalent des bétons de l'étude

Constituants (kg/m ³)	C25/30-0S0G	C25/30-30S30G	C25/30-0S100G	C25/30-100S100G	C35/45-0S0G	C35/45-30S30G	C35/45-0S100G	C35/45-100S100G
Γ (%)	0	30	52	100	0	30	50	100

17.2.3. Matériaux et méthodes

Des éprouvettes cylindriques de chaque formule de béton, de hauteur 220 mm et de diamètre 110 mm, ont été coulées et conservées 28 jours dans l'eau à température ambiante, afin de mesurer les propriétés mécaniques effectives des bétons réalisés. Les essais de compression et de traction par fendage ont été effectués sur une presse servo-hydraulique de 3 500 kN, à contrainte imposée de 0,5 MPa/s pour la compression et de 0,05 MPa/s pour le fendage. Par ailleurs, le module d'élasticité dynamique des bétons a été mesuré avec un testeur de fréquence de résonance E-Meter MK II™. Chaque essai a été répété trois fois. La moyenne des valeurs est donnée au § 17.3.

Pour caractériser le comportement mécanique de l'acier, des essais de traction ont été effectués avec une machine de 250 kN. La limite élastique, f_y , est de 550 MPa environ, l'allongement ultime est d'environ 10 %, et la résistance à la traction ultime est supérieure à 650 MPa.

17.2.4. Éprouvette pour l'essai d'adhérence

Les éprouvettes d'arrachement direct ont été coulées dans des moules cylindriques 110 × 150 mm, la barre d'acier étant positionnée et maintenue verticale en leur centre grâce à une table de moulage conçue spécifiquement.

Pour caractériser l'influence de la longueur d'ancrage sur le mode de rupture, les paramètres suivants ont été adoptés :

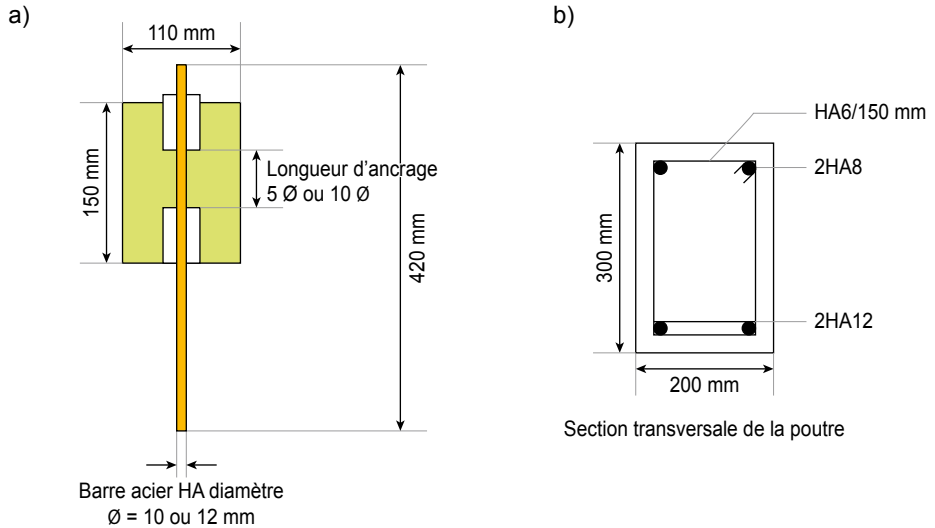
- deux diamètres (\emptyset) de barres HA, 10 mm et 12 mm. Ces barres sont repérées HA10 et HA12 respectivement ;
- deux longueurs d'ancrage, $l_b = 5 \emptyset$ et $l_b = 10 \emptyset$.

Pour chaque configuration, trois éprouvettes ont été fabriquées. Les barres d'acier ont été tronçonnées à 42 cm de longueur et partiellement isolées du béton avec des tubes PVC obturés de silicone, de sorte à avoir la longueur d'ancrage acier/béton souhaitée. Ces barres ont ensuite été placées dans les moules en s'assurant que la longueur d'ancrage effective était bien située à mi-hauteur du cylindre de béton (Figure 17.1.a).

Par ailleurs, deux poutres de 200 × 300 × 3 000 mm de chaque béton (C25/30 et C35/45) ont également été préparées. L'armature principale était constituée de deux HA 12 mm. Les cadres et l'armature secondaire étaient respectivement des HA 6 mm et deux HA 8 mm (Figure 17.1.b).

Figure 17.1

a) Détails de l'essai d'arrachement direct ; b) coupe de la poutre



17.2.5. Réalisation des essais

Les essais d'arrachement direct ont été réalisés sur une presse Perrier de 250 kN, à l'aide d'un porte-éprouvette rigide relié à la machine. L'essai a été effectué en tirant sur la barre ancrée dans le béton, vers le bas, selon le protocole suivant :

- pour la première partie de l'essai (précharge), la presse a été pilotée à vitesse de charge constante de 0,11 kN/s ;
- après la phase de la précharge, la presse a été pilotée à vitesse de déplacement constante de 0,05 mm/s.

Le glissement de la barre par rapport au béton a été mesuré à l'aide d'un capteur de déplacement linéaire (LVDT) tandis que le déplacement de l'extrémité libre a été suivi avec une caméra couplée au logiciel d'analyse d'images DEFTAC.

Les poutres ont été testées sur un banc hydraulique 3R de capacité 350 kN. L'essai de flexion quatre points a été effectué à une vitesse de déplacement constante de 1 mm/min. Deux charges centrées ont été appliquées symétriquement à 250 mm de la mi-portée, en partie supérieure. La flèche a été mesurée à mi-portée à l'aide d'un capteur de déplacement (LVDT) placé sous la poutre.

17.3. Propriétés mécaniques des bétons

La résistance moyenne et l'écart-type associé, obtenus sur les trois éprouvettes testées à 28 jours, pour les huit différents bétons, sont donnés dans le Tableau 17.2.

Les bétons atteignent tous les classes de résistance C25/30 et C35/45 visées, telles que définies dans le Projet National RECYBETON [PNRECYBETON, 2011]. On notera que la résistance à la traction par fendage est assez constante dans une même classe de résistance à la compression, seule une légère baisse est enregistrée lorsque le squelette granulaire est entièrement en GBR (C25/30-100S100G et C35/45-100S100G). Concernant le module d'élasticité, on constate qu'il diminue lorsque le taux de substitution augmente, pour les deux séries C25/30 et C35/45.

Tableau 17.2

Propriétés mécaniques des bétons à 28 jours

Bétons	Résistance à la compression f_{cm} (MPa)	Résistance à la traction par fendage f_{ctm} (MPa)	Module élastique dynamique E_d (GPa)
C25/30-0S0G	30,8 ± 1,3	3,1* ± 0,9	40,8 ± 0,6
C25/30-0S100G	30,3 ± 0,4	3,4 ± 0,2	32,9 ± 0,3
C25/30-30S30G	30,8 ± 1,1	3,3 ± 0,2	34,4 ± 0,4
C25/30-100S100G	29,9 ± 1,4	2,8 ± 0,3	30,1 ± 0,2
C35/45-0S0G	41,5 ± 1,2	3,6 ± 0,2	42,1 ± 0,7
C35/45-0S100G	38,1 ± 2,2	3,4 ± 0,4	31,8 ± 0,4
C35/45-30S30G	40,3 ± 1,4	3,7 ± 0,2	35,7 ± 0,9
C35/45-100S100G	37,3 ± 1,3	3,4 ± 0,1	30,7 ± 0,5

* probablement sous-estimée.

Pour la même résistance à la compression f_{cm} , la variation relative de la résistance au fendage est donnée ci-dessous :

Tableau 17.3

Variation relative de la résistance au fendage avec le taux de substitution

Taux de GBR	30 %	52 %	100 %
C25/30	+ 7 %	+ 11 %	- 8 %
C35/45	+ 4 %	0 %	+ 1 %

La relation reliant la résistance à la traction $f_{ctm} = 0,9 f_{ctm,sp}$ et la résistance à la compression est : $f_{ctm} \approx k f_{cm}^{2/3}$, avec $k = 0,29$ pour C25/30 et $k = 0,27$ pour C35/45. Elle surestime légèrement la résistance à la traction donnée par l'Eurocode 2 ($0,275 f_{cm}^{2/3}$). On peut remarquer que les autres études réalisées dans le cadre du Projet National RECYBETON montrent généralement une diminution de $f_{ctm,sp}$, pour la même résistance f_{cm} , lorsque le taux de GBR augmente.

17.4. Résultats de l'essai d'arrachement direct

17.4.1. Courbes de chargement versus déplacement

Les courbes de déplacement de l'extrémité chargée, obtenues expérimentalement pour les deux séries C25/30 et C35/45, sont représentées Figure 17.2 et Figure 17.3, où chaque courbe correspond à la moyenne des trois essais d'arrachement. Leur analyse montre que le comportement du glissement d'adhérence des bétons de GBR est semblable à celui du béton de référence. Au début du chargement, la relation force-déplacement est linéaire jusqu'à atteindre une force critique (environ 60 % de la force maximale). Durant cette phase, des micro-glissements se produisent entre l'armature et le béton, et des microfissures apparaissent à l'interface acier/béton ; lorsque la charge augmente et atteint sa valeur maximale, le glissement augmente et le comportement devient non linéaire. Au-delà de la charge maximale, on peut distinguer deux types de comportement post-pic selon le diamètre de barre et la longueur d'ancrage :

Figure 17.2

Courbe force-déplacement de la série C25/30 pour les différents diamètres de barre et les différentes longueurs d'ancrage

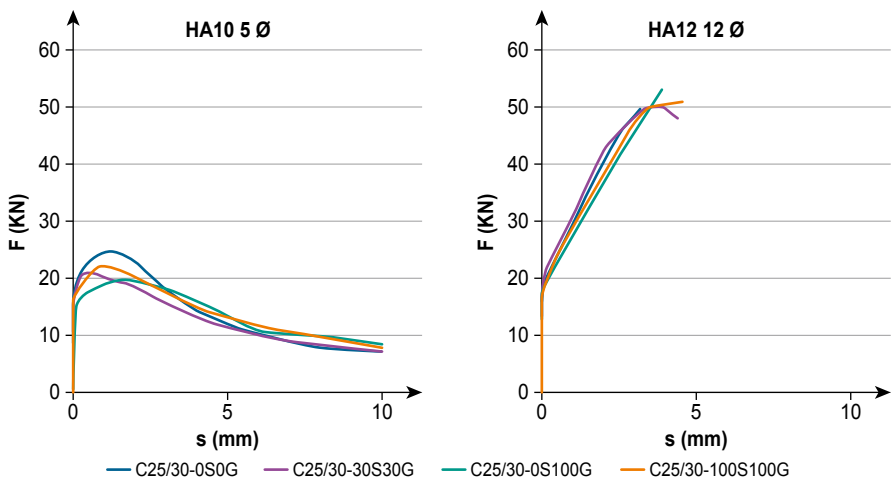
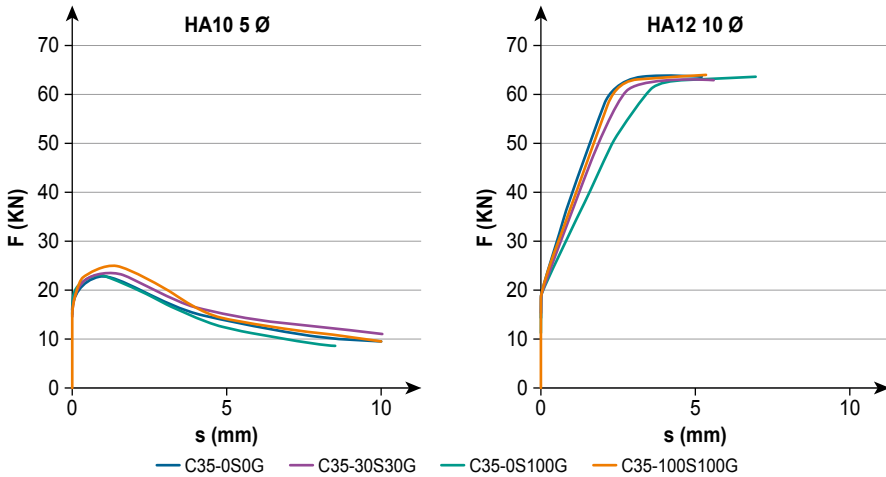


Figure 17.3

Courbe force-déplacement de la série C35/45 pour les différents diamètres de barre et les différentes longueurs d'ancrage



- pour le plus petit diamètre de barre et/ou la longueur d'ancrage la plus courte ; comportement adoucissant avec une adhérence résiduelle d'environ 40 % de la valeur de la contrainte d'adhérence maximale enregistrée durant l'essai ;
- pour le plus long ancrage ; une plastification de la barre d'armature.

Les résultats montrent également que :

- les deux éprouvettes C25/30-30S30G HA12 10 Ø ont un comportement adoucissant ;
- les éprouvettes C35/45 ont un comportement adoucissant pour la longueur d'ancrage 5 Ø, quel que soit le diamètre de barre, alors qu'elles ont un comportement plastifiant pour la longueur d'ancrage 10 Ø ;
- l'adhérence ultime ne semble ne pas varier significativement avec le taux de GBR.

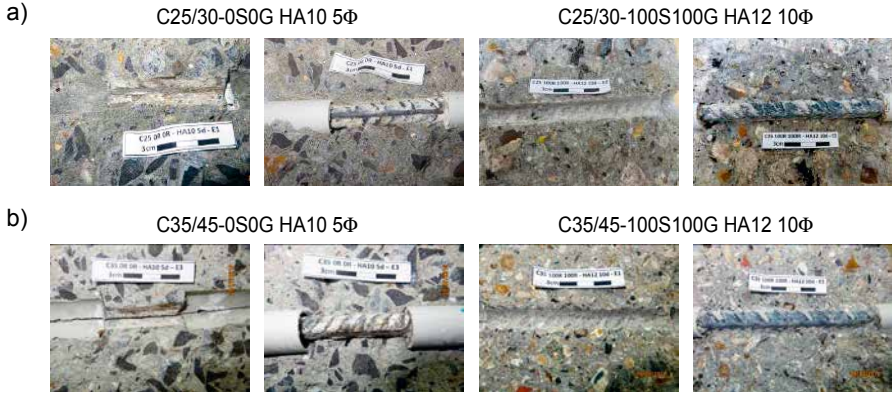
17.4.2. Observations macroscopiques

À l'issue de chaque essai d'arrachement direct, l'éprouvette a été fendue afin d'observer l'interface armature/béton. La Figure 17.4 présente les images de l'interface pour chaque configuration. Elles montrent que lorsque la longueur d'ancrage est de 5 Ø, le mode de rupture dominant est le cisaillement complet du béton au niveau des nervures de surface, quel que soit le type de béton et la classe de résistance. Ce résultat est corroboré par le comportement adoucissant qui apparaît sur les courbes force-déplacement. Pour la configuration HA12 10 Ø, les empreintes de barre sont clairement visibles sur le béton. Pour la configuration HA10 10 Ø, la situation est intermédiaire entre les deux précédentes.

Figure 17.4

Surface fendue des éprouvettes des séries C25/30 et C35/45.

a) Interface acier/béton pour la série C25/30 ; b) Interface acier/béton pour la série C35/45



Crédit photo : Univ Cergy-Pontoise.

17.4.3. Adhérence

Compte tenu de la variation de f_{cm} , l'adhérence du béton de GBR par rapport à celle du béton de granulats naturels environ 10 % plus faible pour les bétons C25/30 et légèrement plus élevée pour les bétons C35/45. Pour le taux de substitution le plus élevé (100 %) et comparativement aux bétons de granulats naturels, le rapport entre l'adhérence f_{bm} et la résistance à la traction f_{ctm} est plutôt constant pour les bétons de GBR C25/30, et il augmente légèrement pour les bétons de GBR C35/45. En outre, pour un diamètre de barre donné, l'adhérence ultime diminue si la longueur encastrée augmente, car la force ultime est répartie sur une longueur inférieure à l_b ; dans ce cas, la contrainte calculée f_{bd} sur la longueur totale est sous-estimée.

17.4.4. Comparaison avec les prévisions de l'EC2

L'Eurocode 2 (EC2) [NF EN-1992-1-1, 2004] propose un modèle général pour l'adhérence, qui comprend tous les paramètres pertinents devant être considérés. Avant de comparer les résultats des essais aux calculs de ce modèle, il est nécessaire de transcrire les paramètres dans le format requis. L'EC2 considère une valeur conventionnelle de la contrainte ultime d'adhérence, f_{bd} , en ne prenant en compte qu'un nombre limité de paramètres (EC2, équation 8.2) :

$$f_{bd} = \eta_0 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad (17.2)$$

Pour les barres HA, $\eta_0 = 2,25$; si les conditions d'adhérence sont bonnes $\eta_1 = 1$, sinon $\eta_1 = 0,7$. Selon le diamètre \emptyset , l'effet d'échelle η_2 est égal à :

$$\eta_2 = 1,32 - \frac{\emptyset}{100} \leq 1,0$$

Le calcul selon l'EC2 tient compte d'un coefficient de sécurité $\gamma_c = 1,5$ et d'un coefficient α_{ct} lié aux effets à long terme sur la résistance à la traction (valeur recommandée $\alpha_{ct} = 1$), avec $f_{ctk,0,05} = 0,7f_{ctm}$ et $f_{ctm} = 0,3(f_{ck})^{2/3}$ pour $f_{ck} \leq C50/60$ et $f_{ck} = f_{cm} - 8$ MPa.

Ainsi, une valeur conventionnelle, appelée longueur d'ancrage requise, est définie pour une contrainte d'acier σ_{sd} (équation 17.3) :

$$l_{bd,rqd} = \frac{\emptyset \sigma_{sd}}{4f_{bd}} \quad (17.3)$$

Le dimensionnement de la longueur d'ancrage est défini comme suit (EC2, équation 17.4) :

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{bd,rqd} \quad (17.4)$$

Dans le cas présent, les paramètres sont les suivants : barre droite, $\alpha_1 = 1$; effet du recouvrement c , $\alpha_2 = 1 - 0,15 \left(\frac{c}{\emptyset} - 1 \right)$ entre 0,7 et 1 ; pas d'armature transversale, $\alpha_3 = 1$; pas de treillis soudé, $\alpha_4 = 1$; pas d'effet de confinement apporté par une compression transversale, $\alpha_5 = 1$.

Donc :

$$l_{bd} = \left[\frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5}{\eta_0 \eta_1 \eta_2} \right] \left(\frac{\emptyset \sigma_{sd}}{4f_{bd}} \right) = \frac{1}{\Psi_k} \left(\frac{\emptyset \sigma_{sd}}{4f_{bd}} \right) \quad (17.5)$$

Pour la comparaison aux essais, la contrainte d'adhérence effective f_{bd}^* , correspondant à l_{bd}^* est définie par :

$$l_{bd}^* = \frac{\emptyset \sigma_{sd}}{4f_{bd}} \quad (17.6)$$

i.e. :

$$l_{bd}^* = \left[\frac{\eta_0 \eta_1 \eta_2}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5} \right] f_{ctd} = \Psi_k f_{ctd} \quad (17.7)$$

Il est nécessaire aussi de ne pas tenir compte du coefficient de sécurité γ_c et de remplacer la résistance caractéristique du béton par sa résistance moyenne : $f_{ctd} = f_{ctk}/\gamma_c$; donc f_{ctk} est remplacé par f_{ctm} et $\gamma_c = 1$. De plus, il faut supprimer un facteur caché γ_R qui prend en compte la dispersion des résultats expérimentaux utilisés pour établir la formule de l'EC2, pour passer de la valeur moyenne f_{bm}^* à la valeur caractéristique f_{bk}^* . En utilisant le terme global Ψ_k de l'équation 17.7, sa valeur moyenne est : $\Psi_m = \gamma_R \Psi_k$. D'après les résultats des essais réalisés dans la référence [Eligehausen et Balazs, 1993], une valeur $\gamma_R \approx 1,4$ peut être utilisée. Enfin :

$$f_{bm}^* = \Psi_k f_{ctm} = \left[\gamma_R \left(\frac{\eta_0 \eta_1 \eta_2}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5} \right) \right] f_{ctm} \quad (17.8)$$

La comparaison avec les présents essais s'effectue à partir de la contrainte de traction par fendage mesurée $f_{ctm,sp} = \frac{f_{ctm}}{0,9}$, utilisée à la place de celle déduite de la résistance à la compression mesurée f_{cm} , selon la relation $f_{ctm} = 0,3f_{cm}^{2/3}$. La comparaison est effectuée avec $\eta_2 = 1$, $\alpha_2 = 0,7$. Donc :

$$f_{bm}^* = 4,5f_{ctm} = 4,0f_{ctm,sp} \quad (17.9)$$

$$\text{ou encore } f_{bm}^* = 1,35f_{cm}^{2/3} \quad (17.10)$$

En négligeant la sous-estimation marginale de f_{bm} en raison du comportement adoucissant de certaines barres, la moyenne générale des résultats expérimentaux f_{bm} et leur comparaison avec les formules (17.9) ou (17.10) sont affichées dans le Tableau 17.4.

Les prédictions de la formule de l'EC2 sans facteurs de sécurité sont satisfaisantes pour l'ensemble des bétons, qu'ils contiennent ou non des GBR, résultat qui s'explique par la faible variation de f_{ctm} avec le type de béton. La dispersion est plus petite pour l'équation (17.10) basée sur f_{cm} que pour l'équation (17.9) basé sur f_{ctm} , ce qui est probablement dû à une plus grande incertitude sur f_{ctm} . La différence en valeur moyenne entre les équation (17.9) et (17.10) est due à l'écart entre le facteur numérique de la formule donnant f_{ctm} en fonction de $f_{cm}^{2/3}$ dans l'EC2, et les valeurs expérimentales.

Tableau 17.4

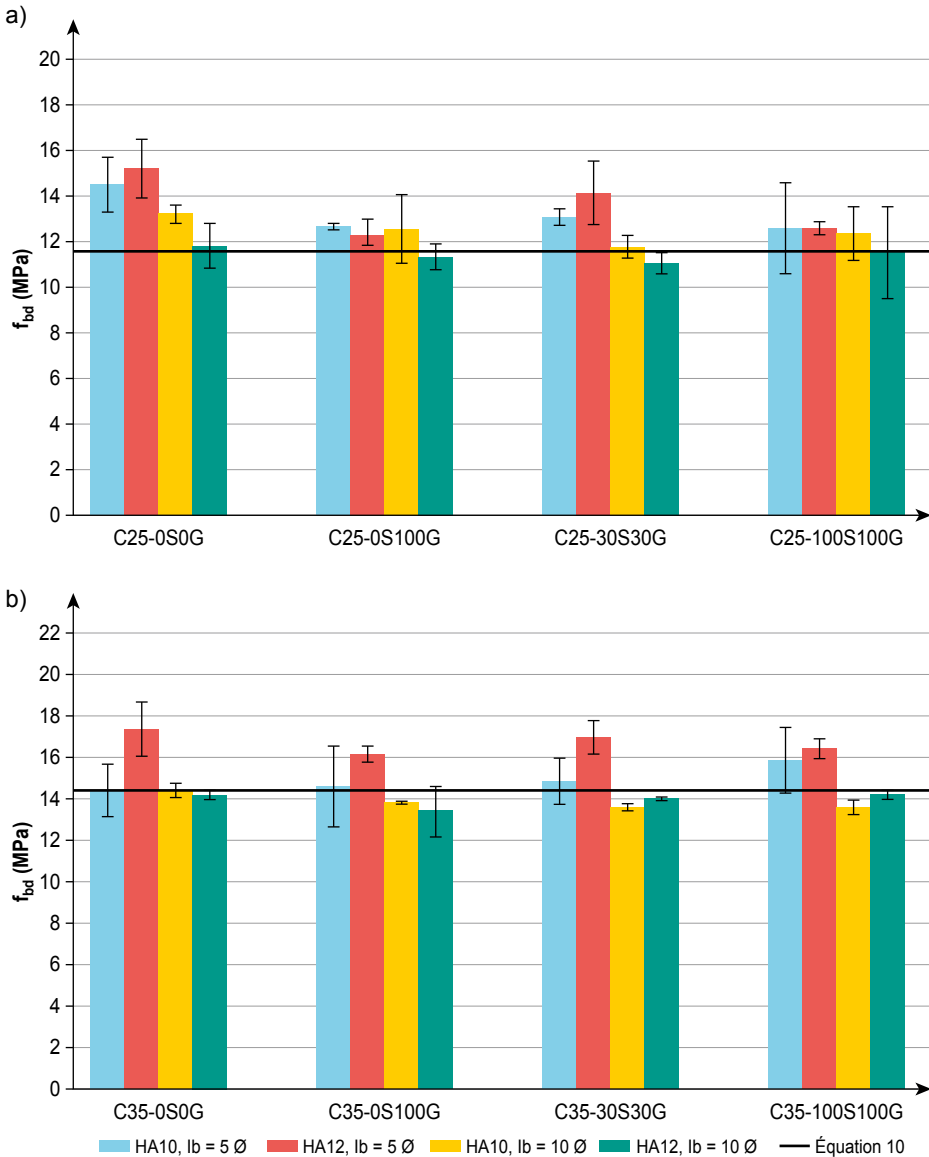
Comparaison entre les résultats expérimentaux et les prévisions de l'EC2 sans facteurs de sécurité

Classe	Béton	Adhérence f_{bm} (MPa)	Moyenne essais/ Équation 17.9	Variation relative	Moyenne essais/ Équation 17.10	Variation relative
C25/30	0S0G	13,7	1,10	–	1,03	–
	30S30G	12,2	0,92	– 16 %	0,92	– 11 %
	0S100G	12,6	0,93	– 15 %	0,96	– 7 %
	100S100G	12,3	1,10	0 %	0,94	– 9 %
	Moyenne (écart)		1,01 (11,7 %)		0,96 (8,7 %)	
C35/45	0S0G	15,1	1,05	–	0,93	–
	30S30G	14,5	0,98	– 7 %	0,91	– 2%
	0S100G	14,8	1,09	+ 4 %	0,97	+ 4%
	100S100G	15,0	1,10	+ 5 %	0,99	+ 6%
	Moyenne (écart)		1,06 (9,6 %)		0,95 (8,9 %)	

Les valeurs calculées pour tous les bétons sont également présentées Figure 17.5. On constate que les valeurs expérimentales d'adhérence sont proches des valeurs calculées selon l'équation 17.10.

Figure 17.5

Adhérence moyenne pour les bétons étudiés ; a) Contrainte d'adhérence pour la série C25/30 ; b) Contrainte d'adhérence pour la série C35/45.

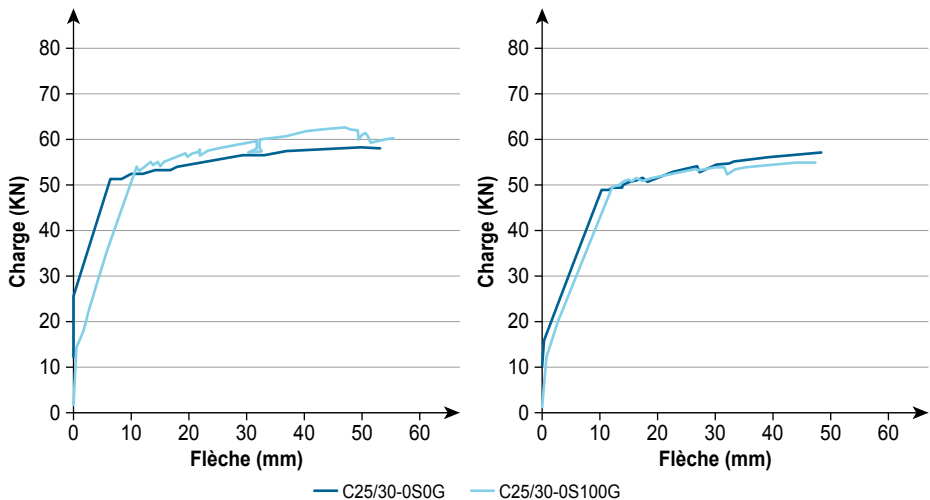


17.5. Résultats des poutres en flexion

Les courbes expérimentales décrivant la flèche au milieu des poutres en fonction de la charge sont tracées Figure 17.6. Elles présentent trois domaines caractérisés par des droites de pentes différentes. Elles montrent que la capacité portante est quasi-identique pour les poutres en béton de granulats naturels et de GBR. Cependant, la rigidité des poutres en béton de granulats naturels est légèrement plus élevée. La perte de rigidité des bétons de GBR peut s'expliquer par la diminution du module d'élasticité de ces bétons, et par un état de fissuration plus prononcé.

Figure 17.6

Courbes force-flèche



Le mode de ruine des poutres est relié à la plastification des aciers. Passé ce stade, la déstructuration du béton se produit sous les points de charge supérieurs. À la fin de l'essai, des fissures inclinées, dues au cisaillement, sont apparues près des supports. Pour les poutres en béton de GBR, la fissuration apparaît sous une charge plus faible que pour les bétons de granulats naturels. De plus, les fissures sont en plus grand nombre, moins espacées, sur un domaine plus étendu, et elles ont une plus grande hauteur (Tableau 17.5).

Pendant l'essai des poutres C25/30, un système d'acquisition d'image (caméra + logiciel) a permis de suivre l'apparition de la première fissure verticale en flexion (voir Figure 17.7). On constate que pour chaque poutre, l'ouverture de la fissure est presque identique au cours du chargement. Des jauges de contrainte placées dans la fibre comprimée supérieure des poutres, à mi-portée, ont montré que, pour une charge donnée, la contrainte du béton de

GBR est légèrement supérieure à celle du béton de granulats naturels. Enfin, on peut conclure que les dispositions de l'EC2 pour l'analyse de la fissuration sont transposables aux bétons de GBR.

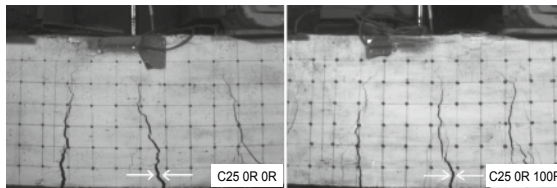
Tableau 17.5

État de fissuration à la fin des essais sur poutre

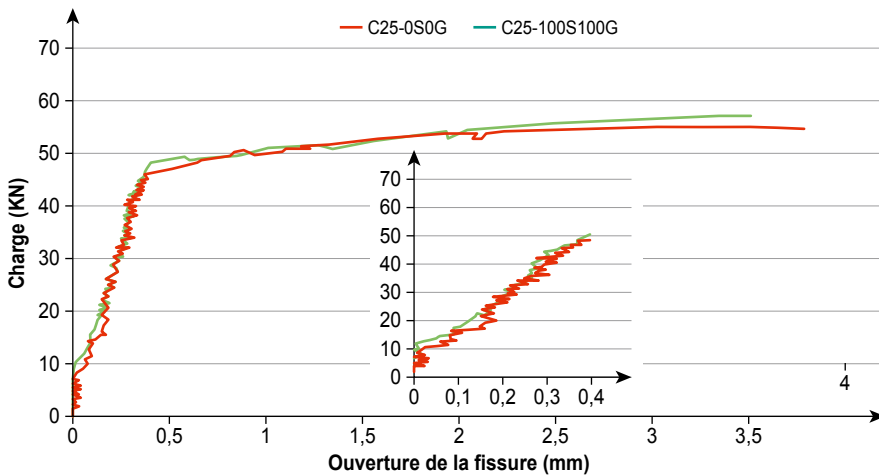
Poutre	Nombre de fissures	Largeur de la zone fissurée (cm)	Espacement de fissure (cm)
C25/30-0S0G	13	150	11,5
C25/30-0S100G	18	180	10,0
C35/45-0S0G	10	100	10,0
C35/45-0S100G	14	125	9,0

Figure 17.7

Ouverture des fissures de flexion pendant le chargement



Crédit photo : Univ Cergy-Pontoise.



17.6. Conclusion

Dans ce travail, les résultats expérimentaux relatifs à l'adhérence acier/béton et au comportement à la fissuration des bétons de GBR sont présentés. Huit bétons de classe de résistance C25/30 et C35/45 et de classe de consistance S4 ont été étudiés. Les principales conclusions sont les suivantes :

- la contrainte d'adhérence mesurée sur bétons de GBR reste du même ordre de grandeur que celle des bétons de granulats naturels témoins, du moins si leur résistance à la traction n'est pas inférieure de plus de 10 % à celle des bétons témoins. Le comportement à l'arrachement et les mécanismes de rupture associés sont comparables entre bétons de GBR et bétons de granulats naturels ;
- dans tous les cas, les valeurs mesurées sont égales aux valeurs calculées par les formules de l'EC2, en ne tenant pas compte du facteur de sécurité et en multipliant la résistance caractéristique par 1,4 pour obtenir la résistance moyenne. Elles sont toutefois au moins cinq fois plus élevées que les valeurs calculées ;
- les poutres en béton de GBR ont montré une fissuration un peu plus dense que les poutres en béton de granulats naturels, avec un plus petit espacement des fissures ;
- les ouvertures de fissures sont du même ordre de grandeur que celles des bétons de granulats naturels.

Ce travail n'a concerné que des aciers de diamètres relativement faibles (10 et 12 mm) et il serait utile d'élargir l'étude aux diamètres plus grands. Les résultats obtenus constituent une base de données conséquente sur le comportement d'adhérence acier/bétons de GBR, qui pourra être exploitée pour des travaux de modélisation.

Chapitre 18.

Pièces comprimées.

a) Poteaux faiblement élancés

R. Boissière¹, F. Al-Mahmoud¹, A. Hamaidia², B. Fouré³

Résumé – La présente étude porte sur le comportement mécanique de poteaux en béton armé faiblement élancés, chargés en compression statique excentrée. Quatre poteaux ont été testés : l'un avec un béton de référence (témoin) ne comportant que des granulats naturels (GN), les trois autres avec du sable et des gravillons de béton recyclé (GBR) substitués aux granulats naturels à des taux différents, conformément aux formules du Projet National RECYBETON. Les bétons avaient tous la même classe de résistance à la compression. Le programme expérimental a été accompagné d'une étude analytique. Les poteaux ont été instrumentés de capteurs LVDT et de jauges de contrainte collées sur le béton et sur l'acier. Les résultats montrent qu'un faible taux de substitution ne modifie pratiquement pas la résistance à la rupture des deux types de poteaux (béton de GBR ou béton de GN). En revanche, la substitution à 100 % des granulats naturels induit un comportement mécanique légèrement différent. Enfin, l'étude analytique confirme que l'Eurocode 2 est pertinent pour dimensionner en toute sécurité les poteaux peu élancés, quelle que soit la nature des granulats utilisés (naturels ou de béton recyclé).

18.1. Introduction et bibliographie

L'étude des propriétés des GBR et des bétons de GBR remonte à plusieurs décennies [Yagishita *et al.*, 1994 ; Kikucki *et al.*, 1988 ; Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2002 ; Otsuki *et al.*, 2003 ; Domingo-Cabo *et al.*, 2009 ; Fathifazl *et al.*, 2011 ; Kou *et al.*, 2012 ; Kou et Poon, 2012]. Ces travaux ont montré que la substitution partielle ou intégrale des granulats naturels (GN) par des granulats de béton recyclé (GBR) était une option réaliste, qui a conduit certains pays à établir des recommandations et des normes autorisant leur utilisation.

1. Institut Jean Lamour, Université de Lorraine.

2. Laboratoire des essais non-Destructifs par Ultrasons, Université de Jijel.

3. Consultant, Bougival.

Cependant, peu de recherches se sont intéressées au comportement structurel de ces bétons (flexion, cisaillement, compression, torsion, etc.).

La première recherche en la matière a été publiée au Japon [Yagishita *et al.*, 1994]. Cette étude portait sur le cisaillement de poutres en béton armé avec GBR.

[Zhuang, 2007] a analysé l'influence de différents taux de GBR sur l'allure de la courbe contrainte-déformation (contrainte maximale, déformation au pic, module d'élasticité, résistance à la compression). Il a constaté que la courbe contrainte-déformation des bétons de GBR présente la même allure que celle du béton traditionnel. Néanmoins, malgré un rapport entre résistance à la compression et pic de déformation plus important, le module d'élasticité des bétons de GBR est plus faible.

Le comportement en compression de poteaux en béton armé utilisant des GBR de différentes qualités et à des taux différents a été étudié par [Choi et Yun, 2012]. Les auteurs constatent que lorsque le pourcentage de GBR augmente, la charge axiale maximale diminue d'environ 6-8 %, comparativement à des poteaux témoins ayant des quantités équivalentes de granulats naturels. La différence serait due à la baisse de la résistance à la compression f_c . Les auteurs concluent qu'en règle générale, le comportement axial des poteaux en béton de GBR est comparable à celui des poteaux en béton de granulats naturels.

[Liu *et al.*, 2010] ont réalisé une étude sur le comportement et les performances mécaniques de poteaux très courts (élanement 4) en béton de GBR, ayant tous la même classe de résistance à la compression (45/50 MPa). Les essais ont été réalisés sur six bétons de GBR et de granulats naturels, avec des taux de substitution de 0 ou de 100 %, et des excentricités de 60 et 150 mm. Les résultats montrent là encore que le comportement et les mécanismes de rupture des poteaux en béton de GBR sont comparables à ceux des poteaux en béton de granulats naturels. La capacité portante des poteaux en béton de granulats naturels est cependant plus élevée que celle des poteaux de béton de GBR, en raison probablement d'une résistance effective plus élevée du béton de granulats naturels. Les auteurs signalent aussi une certaine variabilité de la charge ultime en raison d'incertitudes sur la résistance à la compression et d'aléas sur l'excentricité.

[Zhou *et al.*, 2010] ont étudié le comportement de poteaux assez courts (élanement 9) sous charges fortement excentrées, avec des taux de substitution de GBR différents. Ils ont constaté que plus la charge appliquée sur un poteau en béton de GBR est faible, plus les GBR peuvent être utilisés sans que le comportement mécanique des poteaux ne soit modifié, le taux de substitution de GBR pouvant atteindre 80 %. Toutefois, la ductilité des poteaux en béton de GBR est légèrement plus élevée que celle des poteaux en béton de granulats naturels, ce qui les a conduits à proposer que seules les structures en béton contenant moins de 50 % de GBR aient des applications pratiques en ingénierie.

La revue de la littérature montre que l'utilisation des bétons de GBR est très récente et que peu de recherches ont été menées à ce jour sur le sujet. Les études publiées sont encore insuffisantes pour décrire de façon exhaustive le comportement mécanique des éléments structuraux, et pour établir des méthodes de dimensionnement fiables. En particulier, peu de résultats concernent les bétons incorporant des sables de GBR, et très peu d'essais ont été réalisés sur des poteaux peu élancés en béton de GBR et sous chargement excentré.

La présente étude a pour objectif d'améliorer les connaissances en la matière. Elle a consisté à réaliser des essais mécaniques sur poteaux faiblement élancés en béton armé, incorporant des sables et des gravillons de GBR. La comparaison des résultats expérimentaux aux prévisions des règlements a aussi été faite, afin de vérifier l'applicabilité des dispositions actuelles au dimensionnement des poteaux en béton de GBR.

18.2. Programme expérimental

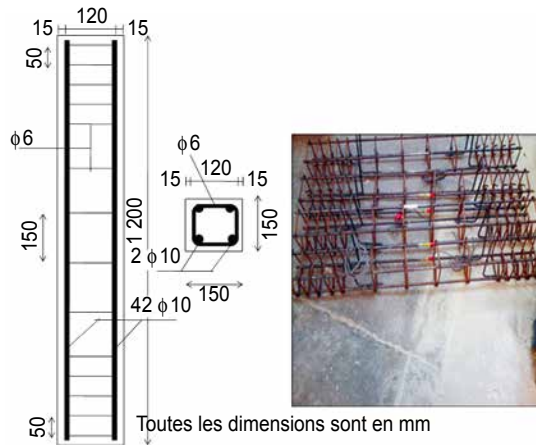
Un programme expérimental accompagné d'une étude analytique a été élaboré. Les poteaux ont été chargés en compression statique excentrée. Les bétons, de même classe de résistance à la compression, ont été formulés avec différents taux de substitution du sable et des gravillons. Quatre poteaux ont été testés : un poteau de référence avec uniquement des granulats naturels et trois poteaux avec des GBR à différents taux de substitution (sable et gravillons), selon les formules du Projet National RECYBETON (voir annexes).

18.2.1. Géométrie des poteaux

Les poteaux, de section 150×150 mm et de hauteur 1 200 mm, ont été soumis à un chargement excentré. Leur ferrailage était constitué de 4 barres longitudinales HA 10 mm, de limite élastique 560 MPa, et de cadres de diamètre 6 mm ayant un espacement constant de 150 mm. Afin d'éviter la ruine prématurée des appuis, l'espacement des cadres a été réduit à 50 mm aux deux extrémités. L'enrobage des armatures était de 15 mm. Tous les poteaux ont été chargés sous appuis articulés avec une excentricité de charge de 15 mm. Les dimensions et les détails du ferrailage sont donnés Figure 18.1.

Figure 18.1

Disposition des armatures sur la hauteur des poteaux



Crédit photo : A. Hamaidia, Jijel.

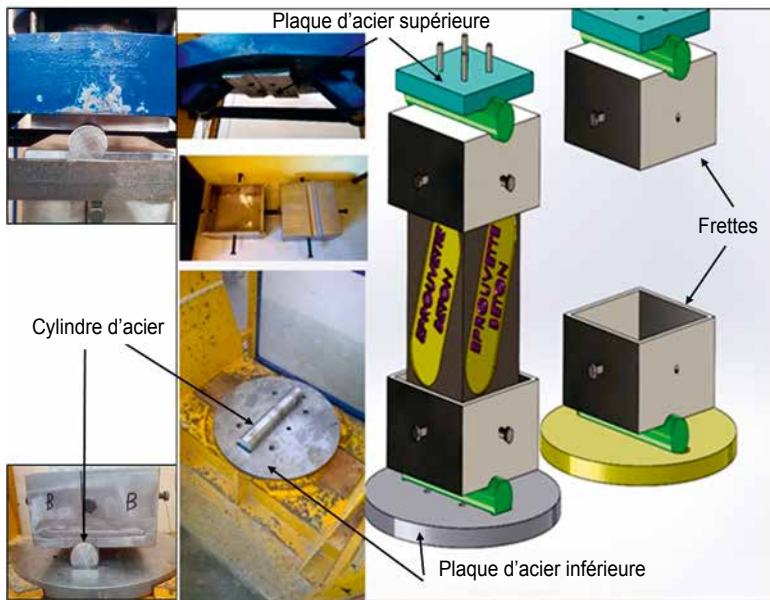
18.2.2. Appareils de chargement excentré

Les essais de compression excentrée ont été réalisés sur un bâti hydraulique de 2000 kN de capacité.

Pour assurer une répartition homogène de la charge au sein des poteaux et pour éviter la ruine prématurée des appuis, leurs deux extrémités ont été confinées dans des frettes métalliques de section 200×200 mm et de hauteur 150 mm (Figure 18.2). Ces frettes ont été réalisées en tôle acier d'épaisseur 10 mm. Une plaque carrée en acier a été fixée sur la partie supérieure de la machine (vérin) afin de transmettre l'effort au poteau *via* un cylindre en acier positionné à l'excentricité souhaitée (marquée par deux gorges cylindriques préalablement creusées sur ladite plaque et sur la frette). Une autre plaque circulaire en acier a été fixée à la base de la machine, et le contact avec la frette métallique inférieure a été assuré par un autre cylindre excentré ; ce montage constitue alors un système simplement appuyé (poteau articulé). L'excentricité choisie était égale à un dixième du côté du poteau, soit 15 mm. Le but de cet excentrement était de minimiser l'effet relatif de l'incertitude de centrage, en imposant un décalage contrôlé qui permet d'étudier subsidiairement l'effet d'un moment fléchissant. La Figure 18.2 présente le système conçu pour réaliser le chargement excentré. La distance entre articulations était $l_0 = 1\,280$ mm, soit un élancement de 8,5.

Figure 18.2

Appareils de chargement excentré utilisés



Crédit photo : A. Hamaidia, Jijel.

18.2.3. Coulage et durcissement

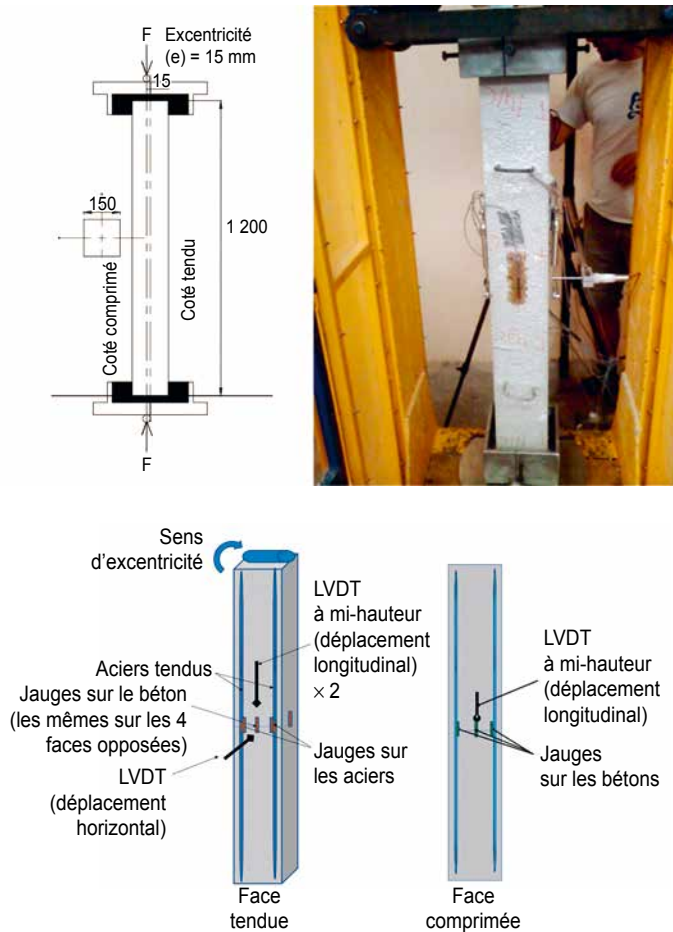
Tous les poteaux ont été coulés en laboratoire et vibrés avec une aiguille électrique. Après coulage, pour assurer la cure du béton, les moules ont été recouverts d'une toile de jute humidifiée et d'une bâche plastique. Les poteaux ont été démoulés à 24 heures, mais leur cure humide a été poursuivie jusqu'à 7 jours. Ils ont ensuite été conservés dans les conditions du laboratoire.

18.2.4. Instrumentation

Des jauges de contrainte et des capteurs LVDT ont été utilisés pour contrôler les contraintes, les déformations et les déplacements des poteaux. Six jauges ont été collées directement sur le béton, au milieu des poteaux ; trois sur la face tendue, trois sur la face comprimée. Deux jauges ont été collées sur les armatures principales à mi-hauteur. Deux capteurs LVDT verticaux ont été installés sur le côté comprimé et sur le côté tendu, à mi-hauteur. Un capteur LVDT horizontal a été placé au milieu du poteau, pour mesurer le déplacement transversal. Les déplacements transversaux aux extrémités ont été négligés. Les poteaux ont été soumis à un chargement en compression quasi-statique. L'effort total a été appliqué en 8-11 minutes, ce qui peut être considéré comme quasi-instantané. La Figure 18.3 montre les détails et l'instrumentation des poteaux testés.

Figure 18.3

Instrumentation expérimentale, LVDT et jauges



Crédit photo : A. Hamaidia, Jijel.

18.3. Propriétés des matériaux

18.3.1. Bétons

Quatre bétons C25/30 ont été réalisés. Il s'agit d'un béton de référence à base de granulats naturels et de trois bétons incorporant des GBR. Leur classe de consistance était S4 (affaissement compris entre 160 et 210 mm). La désignation de chaque formule est la suivante ; Poteau xSyG :

- x est le taux de substitution du sable naturel par du sable de GBR, S ;
- y est le taux de substitution des gravillons naturels par des gravillons GBR, G.

Les quatre formules étaient les suivantes : 0S0G, 0S100G, 30S30G, 100S100G.

Les GBR ont été utilisés à une teneur en eau égale à leur absorption d'eau plus 1 %, soit 9,9 % pour le sable de GBR 0/4, 6,6 % pour le gravillon de GBR 4/10 et 6,8 % pour le gravillon de GBR 10/20. Après humidification, les GBR ont été stockés dans des fûts hermétiques, homogénéisés par rotation et conservés ainsi pendant au moins 2 heures avant utilisation. La composition des bétons est donnée dans les annexes de l'ouvrage. On notera que les proportions des constituants varient d'un mélange à l'autre, notamment le dosage en ciment qui a augmenté avec le taux de substitution, pour conserver la résistance à la compression visée à 28 jours.

18.3.2. Résistances des bétons

Des éprouvettes cylindriques normalisées (diamètre 160 mm, hauteur 320 mm) ont été coulées en même temps que les poteaux. Elles ont servi à mesurer les propriétés des bétons à 28 jours (résistance à la compression et à la traction, module d'élasticité instantané). Les éprouvettes ont été démoulées à 24 heures et conservées pendant 28 jours dans les conditions du laboratoire ($T = 20\text{ °C}$, $HR = 60\%$). La résistance à la traction a été mesurée par fendage. Les variations dimensionnelles au cours du chargement des éprouvettes ont été mesurées avec un extensomètre équipé de trois capteurs LVDT disposés à 120° . Ils ont permis de calculer le module d'élasticité statique sécant de chaque béton. Le Tableau 18.1 donne les propriétés mécaniques mesurées à 28 jours sur tous les bétons. Dans ce tableau, k et ψ sont les coefficients qui permettent de prédire la résistance à la traction ($f_{ctm} = \psi f_{cm}^{2/3}$) et le module d'élasticité ($E_{cm} = k f_{cm}^{1/3}$) à partir de la résistance à la compression. On constate que, pour la même résistance à la compression f_{cm} , la résistance à la traction f_{ctm} et le module E_{cm} diminuent lorsque le taux de GBR augmente, comme déjà constaté par d'autres partenaires du Projet National RECYBETON. La résistance à la traction et le module d'élasticité sont significativement plus faibles que prédits à partir de la résistance à la compression.

Tableau 18.1

Propriétés mécaniques des bétons des poteaux

Mélange	Résistance à la compression f_{cm} (MPa)	Résistance à la traction par fendage f_{ctm} (MPa)	Y	Module d'élasticité dynamique E_{cm} (GPa)	k
0S0G	28,4	2,9	0,276	24,3	8 000
30S30G	27,9	2,9	0,274	22	7 200
0S100G	28,7	2,7	0,264	21,5	7 100
100S100G	29,0	2,5	0,238	17,2	5 600

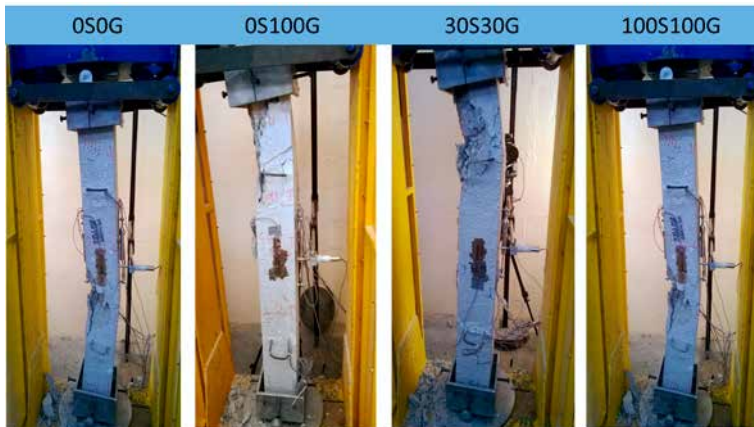
18.4. Résultats des essais

18.4.1. Modes de fissuration et de rupture

La Figure 18.4 présente les poteaux après rupture. Comme le chargement était excentré, ils sont restés dans un état comprimé, avec une dissymétrie entre la face la moins comprimée (droite) et la face la plus comprimée (gauche).

Figure 18.4

Poteaux après rupture



Crédit photo : A. Hamaidia, Jijel.

Jusqu'à environ 65 % de la charge ultime, aucune fissure n'a été observée à la surface des poteaux. Au-delà, des fissures verticales sont apparues dans tous les poteaux, dans la partie supérieure et du côté le plus comprimé. Pendant le chargement, le déplacement latéral le plus important a été enregistré pour le poteau à base du béton entièrement recyclé (100S100G). Quand la charge maximale a été atteinte, des fissures transversales sont apparues du côté le moins comprimé, dans la zone centrale pour 100S100G et vers le tiers supérieur pour les autres poteaux. Une « charnière plastique » est apparue du côté le moins comprimé, résultat de la forte déformation des poteaux. Des fissures se sont aussi propagées du côté le plus comprimé et les déformations plastiques ont provoqué le départ brusque du béton d'enrobage. Sur la Figure 18.4, les poteaux ont dépassé leur résistance ultime et ils présentent tous un délitement du béton du côté le plus comprimé. La ruine se traduit par l'écrasement du béton et le flambement des barres d'acier. Ce phénomène est apparu au tiers supérieur pour les poteaux 0S0G, 30S30G et 0S100G, et vers le milieu pour le poteau 100S100G. Dans tous les cas, les deux barres principales sont coudées vers le côté externe du poteau.

18.4.2. Stade ultime

Pour les différents poteaux, la charge ultime et le déplacement horizontal médian associé (déviation ultime) sont donnés dans le Tableau 18.2.

Tableau 18.2

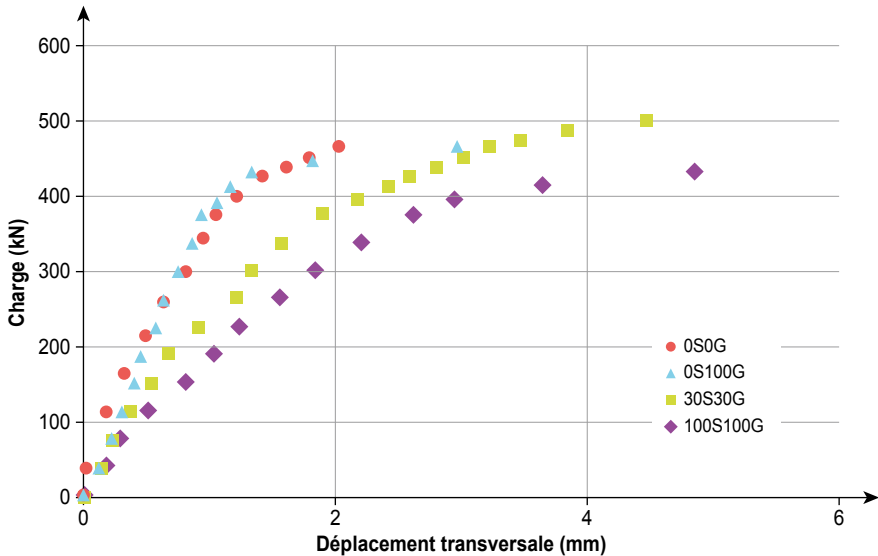
Charges ultimes pour tous les poteaux

Poteau	0S0G	0S100G	30S30G	100S100G
Charge ultime Nu (kN)	502	475	514	444
Déviation ultime (mm)	2,0	3,0	4,5	4,8

Ce tableau montre que la capacité portante des poteaux se situe entre 514 kN (30S30G) et 444 kN (100S100G). L'écart maximum est de 15 % et il dépend du taux de substitution. Un faible taux de substitution des granulats naturels par des GBR (< 50 %) induit une diminution limitée de la capacité portante (inférieure à 10 %). Pour le poteau ne contenant que des GBR (100S100G), la diminution est plus significative, mais elle reste encore acceptable. Ces différences entre poteaux ne permettent pas de tirer des conclusions avérées car seul un poteau de chaque type de béton a été testé. Mais la faible diminution de la capacité portante des poteaux en béton incorporant des GBR tend à indiquer que la substitution n'affecte pas réellement les performances, ni ne modifie donc les dispositions et les exigences attendues en matière de dimensionnement. Cette conclusion sera discutée au § 18.5. Les déplacements horizontaux latéraux mesurés au milieu des poteaux sont présentés Figure 18.5, en fonction de la charge appliquée pendant l'essai. Deux phases peuvent être distinguées : au début, le déplacement est presque linéaire ; il augmente ensuite rapidement en raison de la déformation plastique du béton et des barres comprimées, du moins pour les poteaux 30S30G et 100S100 G (voir § 18.4.3). La Figure 18.5 montre que, globalement, les poteaux 30S30G, 0S100G et 100S100G présentent un déplacement latéral plus important que le poteau témoin 0S0G. À 400 kN, les déplacements sont respectivement de 1,1, 2,25, 1,2 et 3,3 mm pour les poteaux 0S0G, 30S30G, 0S100G et 100S100G. Ce résultat est en accord avec la conclusion de [Zhou *et al.*, 2010]. En effet, leurs essais ont aussi montré un déplacement transversal plus important pour les poteaux en béton de GBR (y compris avec sables de GBR) que pour les poteaux en béton de granulats naturels.

Figure 18.5

Déplacement transversal à mi-hauteur pour les poteaux 0S0G, 0S100G, 30S30G et 100S100G



Les déplacements ultimes, donnés dans le Tableau 18.2, sont respectivement de 2, 4,48, 2,96 et 4,85 mm pour les poteaux 0S0G, 30S30G, 0S100G et 100S100G. Ces valeurs correspondent à une augmentation de + 124 %, + 48 % et + 143 % par rapport au poteau en béton de granulats naturels. Ces déplacements conduisent à un moment fléchissant supplémentaire, en raison des effets de second ordre. L'excentricité initiale est de 15 mm et le déplacement horizontal est au maximum de 4,85 mm. Par conséquent, le moment fléchissant a augmenté logiquement de 30 % lors de l'essai, en raison de l'excentricité de second ordre. Toutefois, l'effet sur la charge de rupture est bien inférieur à 30 %.

18.4.3. Déformations du béton

La Figure 18.6.a présente les déformations du béton mesurées sur le côté le plus comprimé, en fonction de la charge appliquée (50 % de la charge ultime, 400 kN, et charge ultime) pour les poteaux 0S0G, 30S30G, 0S100G et 100S100 G. On peut remarquer que les mesures de déformation suivent la même tendance que celles observées pour les déplacements transversaux. Les déformations mesurées sur les poteaux 0S0G et 0S100G sont proches l'une de l'autre. Le poteau 100S100G montre une différence importante par rapport aux autres poteaux, aux mêmes charges. Les déformations mesurées à 400 kN sont 1150, 1500, 1 250 et 2 150 microdéformations pour les poteaux 0S0G, 30S30G, 0S0G et 100S100G respectivement. Ces valeurs correspondent à une différence de + 30 %, + 7 % et + 87 % par rapport au poteau 0S0G.

La Figure 18.6b présente les déformations du béton mesurées sur le côté le moins comprimé des poteaux testés, en fonction de la charge appliquée (50 % de la charge ultime, 400 kN, et charge ultime). Cette Figure montre

Figure 18.6 a)

Déformation du côté le plus comprimé du béton des poteaux 0S0G, 0S100G, 30S30G et 100S100G à 50 % de la charge ultime (Nu), à 400 kN et à la charge ultime (Nu)

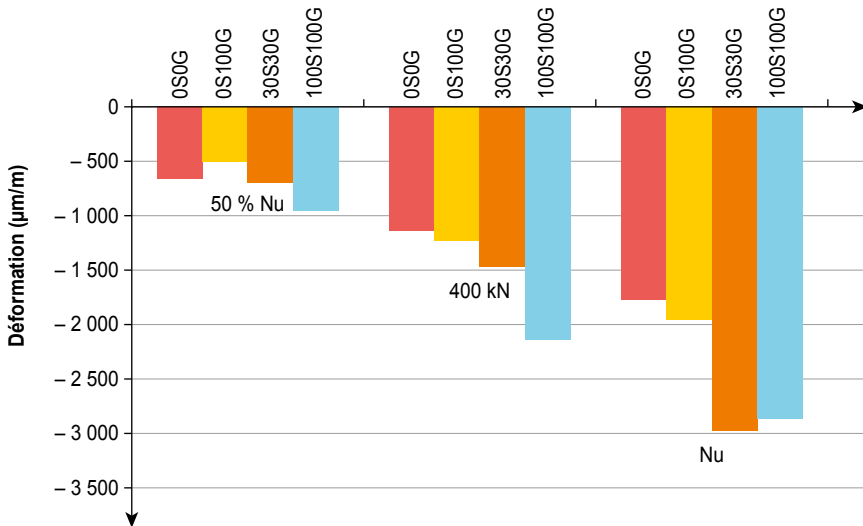
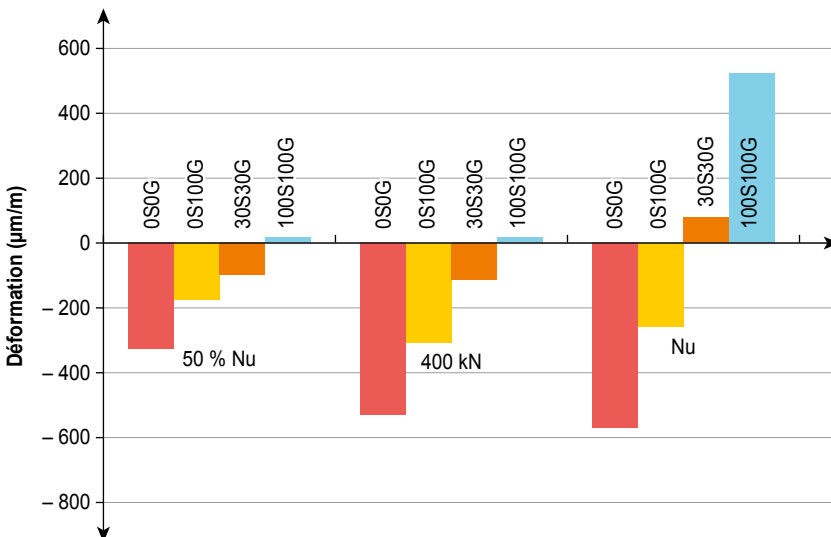


Figure 18.6. b)

Déformation du côté le moins comprimé du béton des poteaux 0S0G, 0S100G, 30S30G et 100S100G à 50 % de la charge ultime (Nu), à 400 kN et à la charge ultime (Nu)



que, pour les poteaux 0S0G, 30S30G et 0S100G, ce côté est comprimé lors de l'essai alors que pour le poteau 100S100G, il est en légère tendu, à 50 % de la charge ultime (200 kN). Cette différence peut provenir d'une plus grande excentricité qu'attendue, probablement induite par la position imparfaite du poteau à l'intérieur des frettes d'extrémité. Cette plus grande excentricité a été confirmée par simulations numériques. On notera également que les poteaux 30S30G et 100S100G présentent une augmentation rapide de leur déplacement en « tension » vers la fin de l'essai, entre 400 kN et la ruine. Ces observations montrent que les déplacements et les déformations mesurées sont différents, selon le taux de substitution. Le comportement mécanique des poteaux avec au moins 30 % de sable de GBR (30S30G, 100S100G) présente une plus faible rigidité que le poteau avec granulats naturels (poteau 0S0G) en raison d'un module plus faible et d'une déformation de pic supérieure de leur béton. D'après les courbes charge-déplacement, le déplacement ultime est hiérarchisé dans l'ordre suivant : 0S0G, 0S100G, 30S30G et 100S100G.

18.5. Analyse structurelle

Dans cette partie, une comparaison est faite avec les calculs de dimensionnement de l'Eurocode 2 EN 1992-1-1 (EC2), pour vérifier si l'utilisation du béton de GBR répond toujours aux exigences de ce règlement. Même si les effets de second ordre sont faibles, le calcul est effectué par la méthode dite de Faessel [Robinson et Modjabi, 1968] qui est équivalente à la méthode générale de l'EC2 (§ 5.8.6).

L'excentricité de conception doit être déterminée. Elle contient trois termes : l'excentricité due aux charges extérieures, l'imperfection géométrique et l'excentricité de second ordre égale au déplacement à mi-hauteur :

- la première, donnée par le dispositif de chargement, est connue : $e_0 = 15 \text{ mm}$;
- la seconde e_1 est égale au maximum de deux valeurs ; 20 mm (EC2, annexe nationale) ou $L_0/400$ (EC2, § 5.2.7a). Ici : $e_1 = 20 \text{ mm}$. L'excentricité de premier ordre est donc de 35 mm ;
- la troisième est l'excentricité de second ordre qui concerne les structures élancées. La formule de l'EC2 (§ 5.8.3.1 (1)) utilisée pour savoir si le deuxième ordre peut être négligé permet de vérifier la condition suivante sur

l'élancement : $\lambda = \frac{l_0}{i} < \lambda_{\text{lim}} = \frac{20ABC}{\sqrt{n}}$, avec :

– l_0 la longueur de flambement = 1,28 m car les conditions aux limites sont des articulations,

– $i = \sqrt{\frac{I}{S}} = 0,15 \text{ m} \rightarrow$ Élancement réel $\lambda = 29,6$,

– $A = \frac{1}{1 + 0,2\phi_{\text{ef}}} \rightarrow$ pas de fluage $\phi_{\text{ef}} = 0$, alors $A = 1$,

$$- B = \sqrt{1 + 2\omega} ; \text{ sans coefficient de sécurité } \omega = \frac{A_s f_y}{A_c f_c} \approx 0,28 \rightarrow B = 1,25,$$

$$- C = 1,7 - r_m \rightarrow \text{ rapport des moments d'extrémité } r_m = 1, \text{ alors } C = 0,7$$

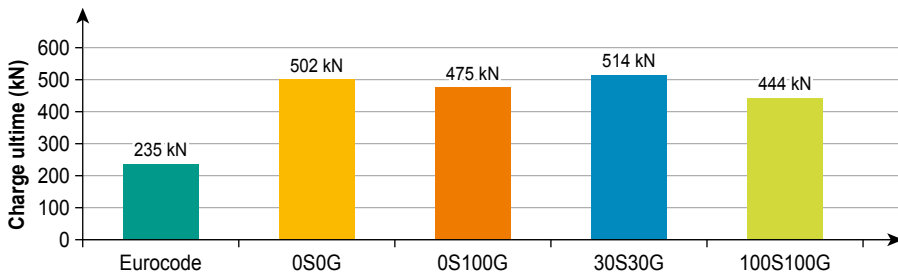
$$\text{Effort axial relative : } n = \frac{N_{Ed}}{A_c f_c}.$$

Ici, la charge expérimentale ultime N_u est d'environ 500 kN, avec $f_c \approx 28$ MPa, c'est-à-dire $n_u \approx 0,79$. L'élanement limite correspondant est calculé comme suit : $\lambda_{lim} = \frac{20ABC}{\sqrt{n}} \approx 24$. L'élanement réel est légèrement plus élevé. Alors, l'effet de second ordre inclus dans N_u n'est pas négligeable, même s'il est assez petit.

L'excentricité prise en compte pour le dimensionnement selon l'EC2 est donc égal à : $e = e_0 + e_1 + e_2$, avec e_2 qui dépend du chargement. Par conséquent, l'utilisation d'un logiciel de calcul est nécessaire pour résoudre ce problème. Pour le cas étudié, celui développé par Thonier a été utilisé. Il donne une charge critique $N_{Rd} = 235$ kN, en tenant compte des facteurs de sécurité.

Figure 18.7

Charge de rupture pour chaque poteau testé comparée aux prévisions de l'EC 2



La Figure 18.7 compare les différentes charges ultimes mesurées à la valeur donnée par l'EC2. Le rapport entre N_{Rd} et N_u évolue entre 1,9 et 2,2. Il est intéressant de remarquer que la diminution de la charge ultime N_u provoquée par le moment de deuxième ordre est bien inférieure à l'augmentation induite par le moment lui-même. Le facteur de sécurité des matériaux $\gamma_c = 1,5$, $\gamma_s = 1,15$ et l'imperfection géométrique e_1 étant introduite dans le calcul de N_{Rd} , la marge de sécurité entre N_{Rd} et N_u (supposée être une valeur moyenne) devrait alors intégrer un facteur de charge $\gamma_F = 1,5$ et un facteur γ_R qui pénalise la valeur moyenne de la charge ultime N_u , pour obtenir la charge caractéristique. En considérant le plus petit rapport $N_u/N_{Rd} = 1,9$, on en déduit que γ_R doit être supérieur à environ 1,3, ce qui paraît réaliste. Ces résultats confirment ceux de [Zhou *et al.* 2010] qui soulignent le fait que le comportement mécanique des poteaux peu élancés n'est pas influencé par l'ajout de GBR jusqu'à un taux de 50 %.

18.6. Conclusion

Cette étude porte sur le comportement mécanique de quatre bétons de GBR de même classe de résistance à la compression f_{c28} (il existe toutefois de légères nuances entre f_{c28} des quatre mélanges).

Les premières observations montrent qu'un faible taux de substitution (30S30G) change peu la charge de rupture par rapport au poteau témoin sans GBR. De même, un taux élevé de substitution des gravillons, en ne substituant pas le sable naturel (0S100G), ne modifie pas fondamentalement la charge ultime N_u du poteau (baisse de 5 % par rapport au poteau témoin). Dans ces deux cas, les déformations mesurées sont plus grandes que celles du poteau témoin et elles diffèrent selon le taux de substitution. Mais il est difficile de tirer une conclusion définitive à partir des seuls résultats obtenus.

En revanche, une substitution totale des granulats naturels par des GBR, en particulier du sable, réduit significativement la rigidité structurelle. On constate une baisse du module d'élasticité, avec des déformations et des déplacements plus grands, qui peuvent induire un moment de deuxième ordre plus élevé pour les poteaux de GBR, et donc provoquer une (légère) diminution de la charge ultime. Ces conclusions doivent être encore confirmées car un seul poteau a été testé pour chaque formulation (incertitude sur la valeur caractéristique N_u). De même, il existe des incertitudes sur l'excentricité qui peuvent mener à de plus grands changements.

Le calcul de la charge ultime N_{Ed} selon l'EN 1992-1-1 (EC2) montre que les incertitudes à la fois sur les matériaux, l'excentricité et la valeur caractéristique de N_u sont bien prises en compte par les facteurs de sécurité γ_c , γ_s et l'imperfection géométrique e_i , quelle que soit la nature des granulats (naturels ou de GBR). Cette conclusion s'applique à l'état limite ultime (ELU) des poteaux faiblement élancés. En outre, leur état limite de service (ELS) n'est pas concerné par l'utilisation de GBR, même si leur module, et donc leur fluage est plus élevé que celui des bétons de granulats naturels. *A contrario*, le comportement de poteaux élancés mérite une attention particulière, du moins à l'ELU, ce qui fait l'objet du chapitre 19.

Chapitre 19.

Pièces comprimées.

b) Poteaux élancés

B. Fouré¹

Résumé – Ce chapitre montre que le comportement au flambement de poteaux élancés en béton de GBR diffère significativement de celui de poteaux en béton de granulats naturels, contrairement au cas des poteaux faiblement élancés (chapitre 18). Les principaux paramètres influents sont : le module d'élasticité, plus faible pour le béton de GBR ; la loi contrainte-déformation en compression (un modèle valable pour les bétons de GBR et les bétons de granulats naturels, qui ne nécessite que la connaissance de la résistance et du module, est proposé) ; le fluage, plus élevé pour le béton de GBR. Compte tenu de l'absence d'essais sur les poteaux élancés en béton de GBR, une analogie est faite avec les poteaux en béton de granulats légers (BGL), en comparant leur comportement expérimental à celui de poteaux en béton de granulats naturels, uniquement pour le chargement à court terme. Par ailleurs, des calculs paramétriques selon la méthode de la « colonne modèle » ont été effectués. Ils montrent que la diminution de la charge de flambement des poteaux élancés en béton de GBR, par rapport au béton de granulats naturels, reste modérée lorsqu'un chargement à court terme est appliqué (effet du module), alors qu'elle est plus conséquente pour un chargement à long terme (effets cumulés du module et du fluage). Enfin, les modifications des règles de calcul de l'EC2 aux ELU, qui seraient nécessaires pour les bétons de GBR, sont analysées, notamment la valeur de l'élançement limite en dessous duquel les effets de second ordre peuvent être négligés.

19.1. Introduction

Comme indiqué chapitre 18, les poteaux courts en béton de GBR et en béton de granulats naturels ne présente pas de comportement significativement différent entre eux, de sorte que les règles de calcul aux ELU peuvent être conservées.

1. Consultant, Bougival.

A contrario, les poteaux élancés ont un comportement différent, qui oblige à devoir adapter les règles de calcul établies pour les bétons de granulats naturels. Les différences proviennent principalement du module d'élasticité, plus faible pour le béton de GBR, et donc de la modification incidente de la loi contrainte-déformation, et du fluage plus élevé. Les conséquences sont une flèche et un moment de second ordre plus importants, et une charge ultime de flambement plus faible. Enfin, la limite plus ou moins conventionnelle d'élancement, entre poteaux courts et élancés, doit aussi être remise en cause.

À la connaissance de l'auteur, et après examen de la bibliographie, aucun essai sur poteaux élancé en béton de GBR n'a encore été effectué. Cependant, dans une certaine mesure, une analogie peut être faite avec les poteaux en bétons de granulats légers, pour lesquels des essais de flambement ont été rapportés. L'analyse qui suit doit donc être encore confortée, avant que les dispositions proposées pour les bétons de GBR ne soient validées.

19.2. Paramètres déterminants

19.2.1. Module d'élasticité

Comme indiqué chapitre 10 (« Propriétés mécaniques instantanées »), le module d'élasticité E_c du béton de GBR est toujours inférieur à celui du béton de granulats naturels. Sa diminution peut atteindre 30 % lorsque la substitution des granulats naturels par des GBR atteint 100 %, du moins pour les bétons de GBR testés dans le cadre du Projet National RECYBETON, mais aussi pour d'autres bétons testés par ailleurs.

19.2.2. Loi contrainte-déformation en compression

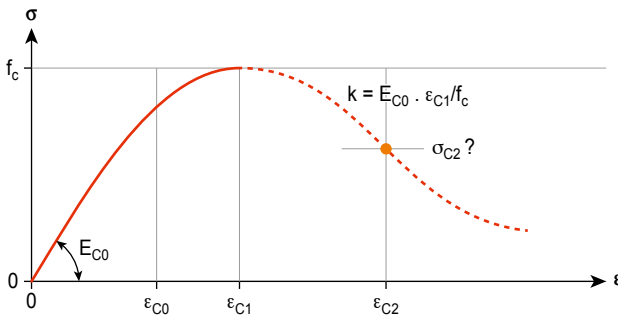
Elle est utilisée pour calculer la charge de flambement ultime par la méthode générale (§ 5.8.6 de la norme [NF EN 1992-1, 2005], désignée EC2 par la suite).

Cette loi (Figure 19.1) est caractérisée par au moins quatre paramètres : la contrainte de compression f_c , le module tangent E_{c0} , la déformation au pic ε_{c1} , et un point sur la branche descendante (par exemple, la contrainte ε_{cu} correspondant à 0,6 ou 0,7 f_c). Pour une résistance à la compression f_c donnée, il est évident que plus le module E_{c0} est faible, plus la déformation au pic ε_{c1} est importante. La valeur de ε_{c1} ne dépend donc pas que de f_c (comme spécifié dans l'EC2 et dans d'autres codes ou modèles de calcul), mais aussi du module. Un modèle modifié a été proposé par Fouré [Fouré, 1996 ; Fouré *et al.*, 1996 ; Fouré, 2005]. Il s'applique aux bétons de granulats naturels, aux bétons de GBR (voir chapitre 10 où ce modèle n'a malheureusement pas été utilisé de façon totalement adéquate), aux bétons légers, et aux bétons à hautes (BHP) et à très hautes (BTHP) performances. Dans ce dernier cas, le modèle décrit fidèlement le passage de la courbe vers un comportement purement élastique

(linéaire) lorsque la résistance croît jusqu'à des valeurs très élevées, comme par exemple pour les bétons de poudres réactives [Dugat *et al.*, 1996]. Par ailleurs, il est généralement admis que la branche descendante n'a pas de signification physique bien établie, et que son allure dépend fortement de la machine d'essai et de son dispositif d'asservissement. La valeur ϵ_{c2} correspondant à $\sigma_{c2} = 0,7f_c$ a alors été déduite du stade ultime de déformation lors d'essais sur poteaux non armés sous chargement excentré. D'un point de vue pratique, ce modèle évite de devoir calibrer l'ensemble de la courbe contrainte-déformation à partir d'enregistrement difficiles et coûteux.

Figure 19.1

Schéma de la courbe contrainte-déformation en compression et principaux paramètres associés



Pour respecter le lien entre le module E_{cm} et la résistance f_{cm} défini par l'EC2, le modèle a été légèrement modifié pour la déformation au pic, selon les relations suivantes :

$$\epsilon_{c1} = \left[1 + \frac{0,15k_0}{f_c^2 + 800} \right] \left(\frac{f_c^{0,7}}{k_0} \right) \quad (f_c \text{ en MPa}) \quad (19.1)$$

$$k_0 = \frac{1,05E_c}{f_c^{0,3}} \quad \text{ou} \quad k_0 = \frac{E_{c0}}{f_c^{0,3}}$$

$$\epsilon_{c2} = \left(1 + \frac{20}{f_c} \right) \epsilon_{c1} \quad (19.2)$$

Pour les bétons de GBR, comme d'ailleurs pour d'autres types de béton, l'augmentation relative de la déformation au pic est inférieure à la diminution relative du module. À titre d'exemple, les relations (19.1) et (19.2) ont été appliquées aux résultats expérimentaux de l'Université de Cergy-Pontoise (chapitre 10). Le Tableau 19.1 présente les valeurs mesurées de f_{cm} , E_{cm} , ϵ_{c1} et ϵ_{c2} ainsi que la comparaison avec les valeurs calculées pour les deux derniers paramètres (rapport Essai/Calcul).

Tableau 19.1

Essais de compression de Cergy-Pontoise.

Comparaison des déformations ε_{c1} et ε_{c2} mesurées et calculées

Classe/ Béton	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (MPa)	k_0	ε_{c1} (10^{-3})	Essai/ Calcul (1)	ε_{c2} (10^{-3})	Essai/ Calcul (2)
C25/0S0G	33,8	36,9	13 470	1,67	0,94	2,41	0,85
30S30G	33,5	29,5	10 800	1,90	0,95	3,04	0,95
0S100G	32,4	28,1	10 390	1,94	0,96	3,56	1,09
100S100G	28,6	25,3	9 710	1,95	0,95	3,80	1,09
C35/0S0G	38,6	42,3	14 840	1,73	1,01	2,43	0,93
30S30G	40,2	34,9	12 100	1,97	1,03	3,41	1,19
0S100G	39,1	34,0	11 880	2,11	1,09	3,90	1,33
100S100G	35,7	30,7	11 030	2,23	1,12	4,24	1,37
Moyenne/ écart type					1,01/7 %		1,1/17 %

Pour ε_{c1} , le modèle donne des résultats plutôt satisfaisants. Cependant, comme on pouvait s'y attendre, la dispersion est plus grande pour ε_{c2} , en raison de la nature peu fiable des mesures en compression axiale et du caractère très simplifié de la relation (19.2). Mais il apparaît que les bétons de GBR présentent des valeurs plus élevées, comparativement aux bétons de granulats naturels ou, en d'autres termes, que leur ductilité après rupture est un peu plus grande.

19.2.3. Fluage

Comme indiqué chapitre 11 (« Propriétés mécaniques différées »), le fluage du béton de GBR est toujours supérieur à celui du béton de granulats naturels. Mais sa valeur varie d'une étude à l'autre et elle n'est pas nécessairement proportionnelle au taux de substitution en GBR. L'effet du sable de GBR est en particulier différent de celui des gravillons de GBR. Les quelques essais effectués dans le cadre du Projet National RECYBETON et d'autres résultats publiés montrent que la déformation de fluage à long terme peut augmenter de 50 % à 100 %, voire plus, lorsque le taux de GBR atteint 100 %. Mais, pour une augmentation donnée de la déformation de fluage ε_{cc} , l'augmentation du facteur de fluage $\varphi = \varepsilon_{cc}/\varepsilon_i$ est moindre, car la déformation instantanée ε_i à la mise en charge est plus grande pour le béton de GBR que pour le béton de granulats naturels, en raison de son module plus faible.

19.3. Analogie avec les poteaux en béton de granulats légers

19.3.1. Analyse des résultats expérimentaux

Pour compenser l'absence d'essais sur les poteaux élancés en béton de GBR, il est proposé d'utiliser des essais effectués sur des poteaux en bétons de granulats légers (BGL), uniquement en chargement instantané. En effet, par comparaison aux bétons de granulats naturels, les BGL présentent un module plus faible, et aussi une loi contrainte-déformation modifiée, comme pour les bétons de GBR. Leur comportement au flambement est donc modifié de la même façon.

Des essais ont été effectués par [Fouré, 1986] (les détails sont donnés dans un rapport [CEBTP, 1976]). Les poteaux avaient pour section $0,29 \times 0,145$ m et un taux mécanique d'armature d'environ 0,2. Les principales caractéristiques des matériaux sont rappelées dans le Tableau 19.2, pour toutes les formules de béton.

Tableau 19.2

Propriétés mesurées des bétons de granulats naturels (BGN) et des bétons de granulats de granulats légers (BGL)

Poteau	Résistance f_{cm} (MPa)	Flexion $f_{ctm,fl}$ (MPa)	Module $E_{cm,0}$ (GPa)	k_0	Déformation au pic ε_{c1} (10^{-3})	ε_{c1} calculé relation (19.1)	Essai/calcul
IU 1 (BGN)	40,5	2,7	31,3	10 310	2,15	2,11	1,02
IU 51 (BGN)	38,3	2,6	35,0	11 720	2,05	1,94	1,05
IU 2 (BGL)	37,2	2,2	21,4	7 230	2,55	2,62	0,97
IU 3 (BGL)	36,4	2,3	21,6	7 350	2,45	2,56	0,96
IU 4 (BGL)	37,3	2,1	21,7	7 330	2,55	2,58	0,99
IU (BGL)	36,6	2,3	20,7	7 030	2,65	2,64	1,00
IU (BGL)	39,5	2,3	21,6	7 170	2,70	2,66	1,02
IU (BGL)	41,3	2,0	21,4	7 010	2,60	2,74	0,95
Moyenne/ Écart type							0,99/ 3,4 %

Pour une même résistance à la compression f_{cm} , la diminution relative de la résistance à la traction des BGL est d'environ 10 %, par rapport à celle des bétons de granulats naturels. Elle correspond assez bien à la classe 1,8 de l'EC2, section 11, qui donne un facteur de réduction $\eta = 0,4 + 0,6(\rho/200) \approx 0,89$

(pour la valeur limite de la classe $\rho = 1\,800\text{ kg/m}^3$). La diminution du module E_{cm} est d'environ 30 %, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que la diminution la plus forte observée pour les bétons de GBR étudiés dans le cadre du projet national RECYBETON (pour un taux de GBR de 100 %). C'est aussi la valeur prévue par l'EC2, section 11, qui donne un facteur de réduction (pour la valeur limite $\rho = 1\,800$) $\eta_E = (\rho/2\,200)^2 \approx 0,67$. La déformation mesurée au pic ε_{c1} est bien prédite par le modèle mentionné au paragraphe 19.2.2. L'augmentation de ε_{c1} pour les BGL, par rapport au béton de granulats naturels, est d'environ 25 % pour la même résistance f_{cm} .

Seuls deux poteaux présentant un élancement géométrique de 25 (le plus grand) et une excentricité relative de 0,15 ($e_0 = 22\text{ mm}$) ont été considérés ici, l'un en béton de granulats naturels (IU 1, masse volumique du béton $\rho \approx 2\,300\text{ kg/m}^3$), l'autre en BGL (IU 3, $\rho \approx 1\,700\text{ kg/m}^3$). Les principaux résultats de l'essai de flambement (charge ultime N_u et flèche d_u), sont donnés dans le Tableau 19.3.

Tableau 19.3

Principaux résultats des essais des poteaux, et charge N_u calculée

Poteau	Élancement géométrique	Charge N_u (kN)	Flèche d_u (mm)	Déformation au pic pour le calcul (affinité δ)	Charge calculée (kN)	Essai/calcul
IU 1 (BGN)	25	753	29	0,0020 (1,00)	729	1,03
IU 3 (BGL)	25	629	35	0,0023 (1,15)	641	0,98
				0,0026 (1,30)	629	1,00
				0,0029 (1,45)	620	1,01

Pour une même résistance f_{cm} , et par comparaison au poteau en béton de granulats naturels, la diminution de la charge ultime du poteau en BGL n'est que d'environ 14 %, alors que le moment de second ordre est supérieur de près de 30 %. Évidemment, ce résultat n'est valable que pour ces valeurs d'élancement et d'excentricité particulières, mais il indique cependant que l'effet de second ordre ne peut pas être négligé pour les bétons de GBR. Cette conclusion n'est valide que pour un chargement instantané. Toutefois, pour les BGL, l'EC2 n'a pas modifié les spécifications relatives au flambement, en raison probablement du fait que la diminution du module est compensée par la diminution, dans les mêmes proportions, du facteur de fluage (EC2 : même facteur de réduction η_E).

Dans le cas présent, selon la relation de l'EC2 (5.13) – voir chapitre 18 et paragraphe 19.5 ci-après –, mais sans les facteurs de sécurité, la valeur de la limite d'élancement mécanique λ en deçà de laquelle l'effet du second ordre peut être négligé est d'environ 30, c'est-à-dire un élancement géométrique d'environ 8,5. Les poteaux en béton de granulats naturels testés sont bien

au-dessus de cette limite. Une question se pose alors : faut-il modifier cette limite pour les bétons de GBR, et si oui, comment le faire ?

19.3.2. Calcul avec une affinité sur le déplacement ε_c

La charge ultime N_u du poteau en béton de granulats naturels peut être prédite par la méthode de Faessel [Faessel *et al.*, 1971] ou celle de la colonne modèle de l'EC2 (voir aussi le chapitre 18). Elle utilise la loi contrainte-déformation de Sargin, avec $\varepsilon_c = 0,002$ et $E_{c0} = 1\,000 f_c$ pour le chargement à court terme, ce qui est satisfaisant pour le poteau en béton de granulats naturels IU 1. Pour le poteau en BGL IU 3, un facteur d'affinité $\delta > 1$ a été appliqué sur la déformation ($\varepsilon_{c1} = 0,002\delta$), et donc sur l'ensemble de la courbe (E_{c0} divisé par δ). Trois valeurs de δ ont été prises en compte : 1,15 (rapport de la déformation au pic du BGL/BGN), 1,45 (rapport du module du BGL/BGN), 1,30 (valeur intermédiaire). Les résultats pour N_u , donnés dans le Tableau 19.2, montrent que dans ce cas particulier, il n'y a pas de différence importante entre les trois calculs et que l'affinité appliquée au module est la meilleure. Le calcul de N_u , avec un facteur d'affinité $\delta = \text{module du BGN/BGR}$ (béton de GBR), est probablement toujours sécuritaire.

19.4. Étude paramétrique de la diminution de la charge de flambement due au remplacement des granulats naturels par des GBR

Deux phénomènes principaux contrôlent l'accroissement des déformations et, par conséquent, la flèche et le moment de second ordre :

1) la diminution du module, caractérisée par le rapport

$$\alpha = \frac{E_c \text{ Béton de GBR}}{E_c \text{ Béton de GN}} < 1. \text{ Corrélativement, la déformation au pic augmente}$$

d'une valeur relative un peu inférieure à $1/\alpha$;

2) l'augmentation du facteur de fluage φ , caractérisé par le rapport

$$\beta = \frac{\varphi \text{ Béton de GBR}}{\varphi \text{ Béton de GN}} > 1. \text{ Pour les calculs de flambement, } \varphi \text{ est la valeur à}$$

long terme pour un âge de chargement t_0 : $\varphi(\infty ; t_0)$; généralement $t_0 = 28$ jours. L'EC2 modifie la loi contrainte-déformation à l'aide d'un facteur

$$\text{d'affinité : } 1 + \varphi_{\text{ef}} = 1 + \varphi(\infty ; t_0) \frac{M_{0\text{Eqp}}}{M_{0\text{Ed}}}.$$

$\frac{M_{0\text{Eqp}}}{M_{0\text{Ed}}}$ est le rapport des moments dus aux charges quasi-permanentes (qp) et aux charges de service (d). Pour les calculs qui suivent, une valeur 0,7 a été considérée.

Ces calculs ont été réalisés pour comparer la charge de flambement N_u de poteaux rectangulaires en béton de GBR et en béton de granulats naturels, selon la méthode de [Faessel *et al.*, 1971], en considérant différentes valeurs d'élançement géométrique l_0/h , d'excentricité relative e_0/h , de rapport mécanique d'armature ω , et en supposant que la déformation de pic est multipliée par $1/\alpha$ pour le béton de GBR (hypothèse sécuritaire).

Pour un chargement à court terme, les résultats montrent que la diminution de la charge de flambement, due au module plus faible du béton de GBR, ne sera importante que dans le cas d'un grand élançement, d'une petite excentricité et d'un ratio d'armature réduit. Par exemple, la diminution est d'environ 25 % pour $\alpha = 0,7$, $l_0/h = 40$, $e_0/h = 0,1$, $\omega = 0,1$; avec $\omega = 0,6$, la diminution n'est que d'environ 10 %. Cette diminution pourrait donc être souvent négligée.

Pour un chargement à long terme, les résultats ne sont pas toujours fiables en raison de certaines extrapolations hasardeuses. Cependant, il faut savoir qu'en raison des effets combinés du module et du fluage, la diminution peut, dans certains cas, être très importante et qu'il ne faut alors pas la négliger si, simultanément, α est petit et β est grand. Par exemple, avec les paramètres ci-dessus et un facteur de fluage $\beta = 2,5$ important (en se plaçant du côté sécuritaire), la diminution de la charge de flambement n'est que d'environ 25 % pour $\omega = 0,6$, mais beaucoup plus importante pour $\omega = 0,1$.

19.5. Modifications suggérées de l'EC2

19.5.1. Critère d'élançement pour les éléments isolés (§ 5.8.3.1)

La limite d'élançement en dessous de laquelle les effets de second ordre peuvent être négligés est définie par la relation (5.13) :

$$\lambda_{\text{lim}} = \frac{20 A B C}{\sqrt{n}}$$

$$A = \frac{1}{1 + 0,2\varphi_{\text{ef}}}$$

$$B = \sqrt{(1 + 2\omega)} \quad \text{Taux mécanique de l'armature } \omega = \frac{A_s f_{yd}}{A_c f_{cd}}$$

$$C = 1,7 - r_m \quad r_m = \frac{M_{02}}{M_{01}} \quad \text{Rapport des moments finaux}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c f_{cd}}$$

Le facteur A dépend du fluage ; les facteurs B et C ne dépendent pas du type de béton. Ainsi, pour un même facteur de fluage φ_{ef} , mais des modules

différents, les poteaux en béton de GBR et en béton de granulats naturels devraient avoir la même limite d'élancement, ce qui n'est pas le cas et donc pas réellement acceptable. Une solution sécuritaire serait alors de multiplier A par α (voir § 19.4 ci-dessus).

19.5.2. Fluage (5.8.4 (4))

Parmi les trois conditions à remplir pour négliger l'effet du fluage ($\varphi_{ef} = 0$), la seconde portant sur l'élancement pourrait être modifiée en réduisant sa valeur dans le même rapport que celui des limites d'élancement du § 5.8.3.1 :

$$\lambda \leq 75\alpha \frac{1 + 0,2\varphi_{ef}(\text{Béton de GN})}{1 + 0,2\varphi_{ef}(\text{Béton de GBR})}$$

19.5.3. Rigidité nominale (5.8.7.2) et courbure nominale (5.8.8.3)

Des modifications seraient nécessaires, mais difficiles à définir sans études paramétriques fiables.

19.5.4. Instabilité latérale des poutres élancées (5.9)

La limite d'élancement des formules (5.40 a et b) peut être multipliée par le rapport des limites d'élancement, comme indiqué au point 19.5.2 ci-dessus :

$$\frac{l_{ot}}{b} \leq \frac{(50 \text{ ou } 70)}{\left(\frac{h}{b}\right)^{1/3}} \alpha \frac{1 + 0,2\varphi_{ef}(\text{Béton de GN})}{1 + 0,2\varphi_{ef}(\text{Béton de GBR})}$$

Il sera nécessaire de vérifier qu'une telle modification n'est pas trop sécuritaire.

19.6. Conclusion

Les bétons de GBR ont clairement tendance à présenter un module d'élasticité plus faible et un facteur de fluage plus grand que les bétons de granulats naturels. La conséquence est une diminution de la charge de flambement ultime des poteaux élancés en béton de GBR, par rapport aux poteaux en béton de granulats naturels. Pour un chargement instantané, la diminution reste modérée, comme le confirme les résultats d'essais sur des poteaux en béton de granulats légers, analogue par certains égards au béton de GBR (les essais font encore défaut pour les bétons de GBR). Pour un chargement à long terme, la diminution peut être plus importante, mais son ampleur est difficile à quantifier, en raison du manque d'essais et de la fiabilité discutable des calculs simplifiés qui ont été effectués.

Le calcul de la charge de flambement, par la méthode dite générale pour les bétons de granulats naturels dans l'EC2, convient aussi pour les bétons de GBR, dans la mesure où la loi contrainte-déformation en compression et le facteur de fluage du béton sont connus. Un modèle empirique, mais très général, est proposé pour la loi contrainte-déformation, pour lequel il est nécessaire de ne connaître que la résistance et le module, selon le taux de GBR.

D'autres règles de dimensionnement au flambement de l'EC2 (telle la limite d'élanement en dessous de laquelle les calculs du second ordre peuvent être omis) devraient aussi être modifiées pour leur application aux bétons de GBR, dans la mesure où une diminution significative du module et une augmentation du facteur de fluage, par rapport au béton de granulats naturels, sont confirmées.

Chapitre 20

Poutres soumises à la flexion

H. Mercado-Mendoza¹, K. Apedo¹, P. Wolff², B. Fouré²

Résumé – Ce chapitre est consacré à une étude réalisée pour : i) évaluer l'impact de l'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR) sur le comportement en flexion de poutres en béton armé ; ii) évaluer l'applicabilité des paramètres de l'Eurocode 2 utilisés pour le dimensionnement des poutres. Des essais de flexion quatre points ont été effectués sur quatre poutres fabriquées avec des bétons différents. Trois d'entre eux contenaient des GBR, le quatrième était un béton témoin ne contenant que des granulats naturels (GN). Les propriétés mécaniques normalisées des bétons et de l'acier ont tout d'abord été mesurées. La flèche, l'espacement et l'ouverture des fissures ont été suivis durant les essais de flexion des poutres, ainsi que l'effort et le déplacement du vérin d'application de la charge. Ces mesures ont été comparées aux valeurs calculées selon les relations de l'Eurocode 2. Un impact de la présence des GBR a été détecté sur les différents paramètres qui concernent les états limites de service (ELS) étudiés. Il en résulte que l'Eurocode 2 donne une estimation assez précise des flèches expérimentales, indépendamment de la teneur en GBR, du moins si les propriétés mécaniques réelles des matériaux sont bien considérées. Concernant la fissuration, les relations de l'Eurocode 2 surestiment apparemment les valeurs mesurées sur les poutres contenant des GBR. Une analyse théorique du modèle de fissuration dédié a été effectué afin d'expliquer cet écart. Enfin, aucun effet néfaste notoire de l'incorporation des GBR sur la résistance à la flexion et sur le mode de rupture des poutres n'a été démontré. Par conséquent, l'approche de l'Eurocode 2 peut s'appliquer pour prédire la ruine des poutres en béton de GBR, en tout cas pour celles testées dans le cadre de ce travail.

20.1. Introduction

Plusieurs études ont déjà été réalisées sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons de GBR ([Xiao *et al.*, 2006a ; Otsuki *et al.*, 2003 ; Domingo-Cabo

1. Laboratoire ICube, Université de Strasbourg/INSA, Strasbourg.

2. Consultant, Bougival.

et al., 2009 ; Guerra *et al.*, 2014 ; Wardeh *et al.*, 2015a, chapitre 10 de ce livre, etc.). Cependant, les recherches sur les éléments de structure réalisés avec ce type de béton sont encore rares. Peu d'études existent pour les poutres, les premiers travaux étant ceux de [Mukai et Kikuchi, 1988] et de [Yagishita *et al.*, 1994]. Les études recensées (par exemple [Arezoumandi *et al.*, 2015 ; Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007 ; Bai et Sun, 2010 ; Knaack et Kurama, 2015 ; Wardeh et Ghorbel, 2015]) montrent en général que la résistance ultime en flexion des poutres n'est pratiquement pas affectée par l'incorporation des GBR. Par ailleurs, les résultats expérimentaux présentés dans les présents travaux – pour différents taux de ferrailage – montrent que l'incorporation des GBR a bien un impact sur la déformation des poutres considérées. En effet, une augmentation de la flèche, globalement proportionnelle à la teneur en GBR, a été constatée. Néanmoins, la controverse subsiste sur ces dernières observations [Fathifazl *et al.*, 2009 ; Ignjatovic, 2013].

Concernant la fissuration des poutres en béton de GBR, les résultats trouvés sont peu nombreux et contradictoires, d'un point de vue quantitatif notamment. [Arezoumandi *et al.*, 2015 ; Kang *et al.*, 2014 ; Wardeh et Ghorbel, 2015] prétendent que l'espacement des fissures diminue avec le taux de GBR, alors que [Bai et Sun, 2010] montrent *a contrario* que l'incorporation de GBR ne modifie pas significativement cet espacement. [Sato *et al.*, 2007] et [Zhang et Zhao, 2016] sont parmi les rares équipes à avoir réalisé des mesures précises d'ouverture de fissures sur des poutres en béton de GBR soumises à la flexion. Cependant, les résultats des premiers sont très dispersés, et ne montrent aucune tendance évidente de l'influence des GBR, alors que ceux des seconds, exprimés par la somme des ouvertures de plusieurs fissures regroupées, ne contiennent pas d'informations sur les valeurs moyennes et maximales des ouvertures de fissures mesurées.

Par ailleurs, pour pouvoir envisager le dimensionnement normalisé des poutres en bétons de GBR, il faut que les prédictions des codes de calcul normalisés concordent avec les données expérimentales. Là aussi, à notre connaissance, il n'y a eu que peu de tentatives en ce sens. Les comparaisons faites par [Sato *et al.*, 2007] entre leurs mesures expérimentales de fissuration et celles fournies par la norme japonaise [JSCE, 2002] ont montré de grandes divergences. [Arezoumandi *et al.*, 2015] ont comparé leurs mesures expérimentales de flèche et de résistance à la rupture aux valeurs données par l'Eurocode 2 [NF EN 1992-1-1, 2005] et les normes américaines [ACI 318-11, ACI 318R-11, 2011]. De même, l'expérience ne confirme pas les modèles

Le présent chapitre résume une étude réalisée dans le cadre du Projet National RECYBETON sur : i) l'impact de l'utilisation de bétons de GBR sur le comportement de poutres en flexion ; ii) l'applicabilité des dispositions de l'Eurocode 2 afin d'estimer les différents paramètres concernant le comportement de poutres en flexion à base de bétons de GBR. Dans ce but, des essais de flexion à échelle 1 ont été effectués sur des poutres armées. Trois poutres ont été fabriquées avec des bétons à différents taux de GBR,

ainsi qu'une quatrième poutre témoin avec un béton ne contenant que des granulats naturels. Plusieurs paramètres ont été mesurés durant les essais, puis comparés aux valeurs calculées selon l'Eurocode 2.

20.2. Étude expérimentale

20.2.1. Définition des bétons

Quatre bétons différents ont été utilisés dans cette étude. Les principaux critères ayant guidé leur choix sont : avoir un béton de référence ne contenant que des granulats naturels ; dissocier les effets du sable et des gravillons ; tester un béton ne contenant que des GBR. Il s'agissait aussi de travailler avec les mêmes bétons que ceux déjà utilisés dans une autre étude du Projet National RECYBETON (chapitre 16 de cet ouvrage « Adhérence entre armatures et bétons de GBR »). Le Tableau 20.1 présente la teneur en granulats recyclés des quatre bétons retenus. Ces bétons sont tous de la classe de résistance C25/30 de l'Eurocode 2 (bétons couramment utilisés dans les différents domaines du génie civil).

Tableau 20.1

Types de bétons

Désignation (classe C 25/30)	Substitution massique (%)		Substitution massique totale (%)
	Sable de GBR	Gravillons de GBR	
0S0G	0	0	0
30S30G	30	30	30
0S100G	0	100	52
100S100G	100	100	100

20.2.2. Caractéristiques de l'essai de flexion

Les prescriptions de l'Eurocode 2 concernant les poutres fléchies en béton armé sollicitées aux États Limites de Service (ELS) sont établies principalement sur l'hypothèse d'une section soumise à la flexion pure. L'essai de flexion quatre points, qui satisfait cette condition, a donc été retenu dans le cadre de ce travail. Il a été réalisé sur les quatre poutres en béton armé fabriquées avec les bétons susmentionnés.

Afin de se placer à une échelle représentative des ouvrages du génie civil, des poutres de 5 mètres de longueur ont été fabriquées (cf. Figure 20.1). Ces poutres avaient une section de 40 × 15 cm, de sorte à avoir à la fois un élancement et un rapport de forme appropriés, au regard d'une part des

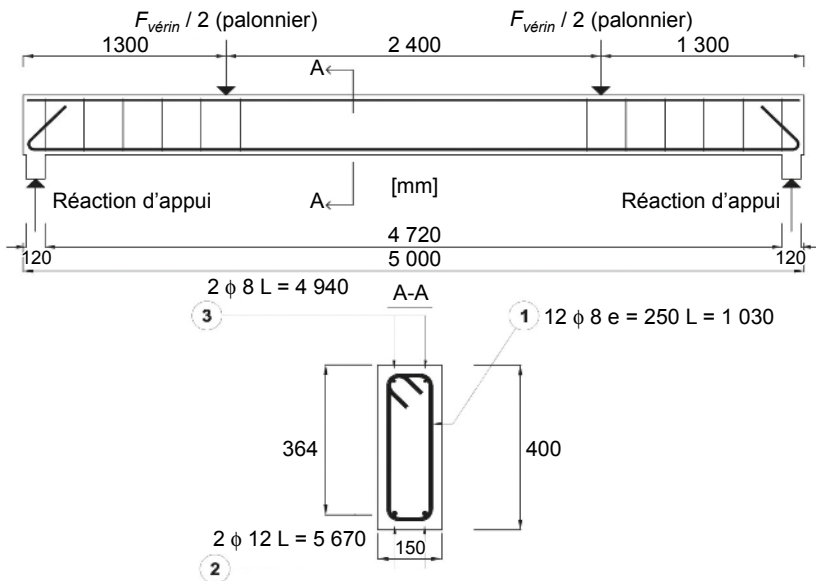
paramètres de fissuration et de flèche attendus, et d'autre part pour éviter tout risque de déversement.

En pratique, l'utilisation de poutres sur-armées (entraînant la rupture fragile du béton comprimé) est plutôt rare car, dans ce type de pièces, l'armature n'est pas sollicitée de façon optimale ([Granju, 2012 ; Ricotier, 2012] par exemple). En outre, l'influence des GBR sur le comportement à la compression du béton est traitée par ailleurs dans les travaux du Projet National RECYBETON (chapitre 18 de ce livre « Pièces comprimées. a) Poteaux faiblement élancés »). Par conséquent, pour le présent travail, des poutres sous-armées ont été utilisées. En outre, ce type de pièces (dont la ruine se produit après la plastification des armatures) a permis d'étudier les paramètres liés aux États Limites de Service (ELS), puisqu'un ratio d'armature modéré a été utilisé.

Concernant les caractéristiques du ferrailage des poutres, deux critères essentiels, selon l'Eurocode 2, ont été retenus : i) le rapport entre le moment fléchissant supposé générer la première fissure dans le béton et le moment fléchissant censé produire une fissure ayant l'ouverture minimale de référence ; ii) le rapport entre le moment fléchissant qui doit provoquer la ruine de la pièce et le moment fléchissant censé produire une fissure ayant l'ouverture maximale de référence. Le renfort longitudinal répondant à ces deux critères a alors consisté en 2 HA 12 mm (Figure 20.1), dont la section satisfait à la fois la condition de non fragilité et le ferrailage minimum assurant la maîtrise de la fissuration.

Figure 20.1

Essai de flexion 4 points et plan de ferrailage



Concernant le ferrailage transversal, les cadres ont été placés à l'extérieur de la zone entre les points de chargement (zone en flexion pure), comme indiqué Figure 20.1, afin que leur présence n'influence pas l'espacement des fissures. Cette armature de cisaillement a été dimensionnée selon les règles de l'Eurocode 2. La résistance dans la zone centrale non ferrillée a été vérifiée, afin de s'assurer que les poutres résistaient bien aux contraintes générées par leur poids propre.

20.2.3. Matériaux

Les quatre bétons utilisés dans cette étude ont été formulés, fabriqués et coulés selon les prescriptions du Projet National RECYBETON, où sont définies les formulations et fixées les procédures de fabrication [Sedran, 2013] (Annexes de ce livre). Le Tableau 20.2 donne les caractéristiques mesurées sur les bétons frais, avec la référence des normes dédiées.

Tableau 20.2

Propriétés des bétons frais

Béton		0S0G	30S30G	0S100G	100S100G
Affaissement [NF EN 12350-2, 2012]	h [mm]	67	113	65	168
Teneur en air [NF EN 12350-7, 2012]	A [%]	1,4	1,7	2,5	3,1

Pour chaque béton et pour chaque essai présenté au Tableau 20.3, au moins trois éprouvettes ont été coulées en même temps que la poutre correspondante, afin de mesurer les propriétés mécaniques des bétons à 28 jours. Ce tableau donne les valeurs obtenues (moyenne des trois mesures et écart-type associé), ainsi que les normes appliquées pour effectuer les essais.

La résistance à la traction directe f_{ct} du béton est un paramètre important faisant partie des spécifications de l'Eurocode 2 sur les poutres en flexion aux ELS. Dans le cas présent, cette résistance a été prise égale à la moyenne des résistances mesurées par flexion ($f_{ct,fl}$) et par fendage ($f_{ct,sp}$), selon les relations de l'Eurocode 2 suivantes : $f_{ct,fl} = \max\{(1,6 - h/1\ 000)f_{ct}; f_{ct}\}$ et $f_{ct} = 0,9f_{ct,sp}$, respectivement. Les valeurs de f_{ct} correspondantes complètent le Tableau 20.3.

Dans le but d'apprécier l'impact de l'utilisation des GBR sur les différentes propriétés mécaniques des bétons, le rapport entre soit la résistance à la traction f_{ct} et résistance à la compression de f_{cm} , soit le module d'élasticité E_{cm} et la résistance à la compression f_{cm} (affectés des exposants de l'Eurocode 2, Tableau 20.3) ont été calculés pour les différents bétons testés (Tableau 20.3). La comparaison de ces rapports montre que l'impact des GBR est plus marqué sur f_{ctm} et E_{cm} que sur la résistance à la compression f_{cm} (voir chapitre 10). Concrètement, dans le cas présent, les deux rapports diminuent sensiblement

avec la teneur totale en GBR. Rappelons qu'à la fois la résistance à la traction et le module d'élasticité sont deux paramètres à considérer pour calculer la fissuration et la déformation aux ELS (cf. § 20.3 de ce chapitre).

Tableau 20.3

Propriétés mécaniques des bétons (entre parenthèses ; écart type)

Béton		0S0G	30S30G	0S100G	100S100G
Masse volumique	ρ_a [kg.m ⁻³]	2 346 (20)	2 251 (8)	2 188 (9)	2 041 (19)
Résistance en compression [NF EN 12390-3, 2012]	f_{cm} [MPa]	30,1 (2,6)	27,6 (0,4)	26,4 (0,2)	23,7 (2,1)
Résistance au fendage [NF EN 12390-6, 2012]	$f_{ctm,sp}$ [MPa]	2,8 (0,3)	2,5 (0,2)	2,2 (0,1)	2,0 (0,1)
Résistance à la flexion [NF EN 12390-5, 2012]	$f_{ctm,fl}$ [MPa]	4,6 (0,2)	3,9 (0,2)	4,1 (0,1)	3,2 (0,2)
Résistance à la traction calculée	f_{ctm} [MPa]	2,8	2,4	2,3	1,9
Module d'élasticité sécant [NF EN 12390-13 2014]	E_{cm} [GPa]	31,8 (1,1)	23,0 (1,3)	24,2 (1,1)	15,3 (1,1)
	$(f_{ctm}/f_{cm}^{2/3})/10^{-1}$	2,9	2,6	2,6	2,3
	$(E_{cm}/f_{cm}^{0.3})/10^4$	1,1	0,9	0,9	0,6

Tableau 20.4

Propriétés des armatures (entre parenthèses ; écart type)

Module d'élasticité	E_s	[GPa]	201 (5)
Limite d'élasticité	$f_{0,2k}$	[MPa]	555 (9)
Résistance à la traction	f_t	[MPa]	624 (12)
$k = f_t/f_{0,2k}$	–	–	1,12 (0,01)
Allongement sous charge maximale	ε_{uk}	[%]	5,44 (0,35)

Des essais de traction directe ont été effectués sur les armatures HA, selon la norme [ISO 6892-1, 2009]. Les résultats sont donnés Tableau 20.4. Il s'agit à chaque fois de la moyenne de trois mesures, avec l'écart-type associé.

20.2.4. Protocole de l'essai de flexion

La charge a été appliquée sur les poutres à l'aide d'un vérin hydraulique de 640 kN de capacité, fixé à un portique pendulaire auto-stable (Figure 20.2). Ce vérin était relié à un palonnier destiné à répartir la charge sur les deux lignes

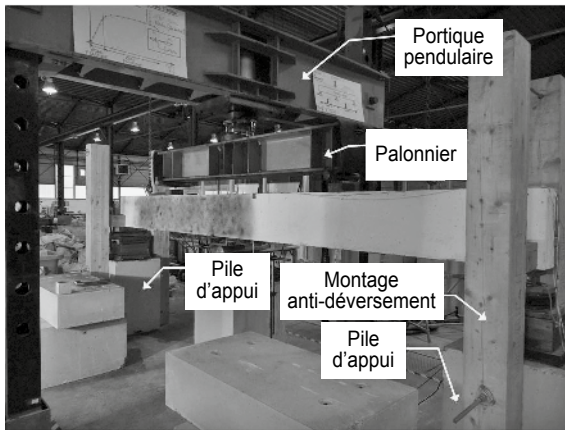
de chargement, selon la configuration habituelle de l'essai de flexion quatre points (Figure 20.1). Les appuis sous la poutre, ainsi que les mécanismes de chargement, étaient de type articulé.

Durant l'essai de flexion, en plus de l'effort et du déplacement du vérin, les paramètres caractérisant la réponse du corps d'épreuve ont été suivis en permanence à l'aide de jauges résistives et de capteurs à induction. Ainsi, la flèche de la poutre et les contraintes dans la fibre supérieure du béton et dans les armatures inférieures principales, à mi-travée, ont été enregistrées. Par ailleurs, l'ouverture des différentes fissures à la base des poutres a également été enregistrée avec des capteurs inductifs à pointes (extensomètres).

Les mesures de flèche et d'ouverture de fissures ont été complétées par la technique de corrélation d'images. En effet, grâce au traitement informatique des images prises lors des essais, cette technique permet de déterminer les champs de contraintes et de déplacements sur toute la zone considérée.

Figure 20.2

Dispositif de l'essai de flexion



Crédit photo : H. Mercado-Mendoza, ICube.

La procédure expérimentale suivie pour réaliser les essais de flexion a comporté plusieurs étapes :

20.2.4.1. Pré-fissuration

Tout d'abord, une faible charge initiale a été appliquée sur les poutres, jusqu'à atteindre un premier état de fissuration (fissures à peine visibles) permettant de repérer l'emplacement des fissures dans la zone en flexion pure. Après relâchement de l'effort, les capteurs inductifs ont été installés au droit des fissures ainsi repérées. Rappelons que ces capteurs ont été utilisés pour mesurer, par la suite, l'ouverture des fissures.

20.2.4.2. Fissuration initiale

Ensuite, deux paliers de chargement ont été appliqués (phase initiale de fissuration), similaires à ceux qui apparaissent sur la Figure 20.3 qui correspond, elle, à la phase finale de fissuration (voir ci-après). Pour chacun des deux paliers, la charge appliquée a été déterminée en se référant à la fissure à la base de la poutre qui, la première, a présenté une ouverture de 0,2 et de 0,3 mm, respectivement.

20.2.4.3. Chargement permanent

Suite de la phase initiale de fissuration, une phase de chargement permanent a été appliquée, destinée à évaluer, dans une certaine mesure, la réponse des poutres en flexion soumises à un chargement prolongé, au regard des critères de l'ELS notamment. Le vérin a alors été immobilisé (déplacement imposé) pendant cinquante heures environ à la position atteinte à la fin du deuxième palier susmentionné, afin d'appliquer une charge permanente durant cette période. Ensuite, le chargement a été totalement supprimé.

20.2.4.4. Fissuration finale

Les deux paliers de chargement présentés ci-dessus, correspondant à la phase de fissuration initiale, ont été reconduits, suivis ensuite d'un troisième chargement entraînant une ouverture de fissure de 0,4 mm (Figure 20.3). En effet, selon les recommandations de l'Eurocode 2 relatives à l'ELS, trois largeurs de référence des fissures principales ($w_{k,ref}$) sont à considérer [NF EN 1992-1-1, 2005, §7.3.1 et §7.3.3], à savoir 0,2, 0,3 et 0,4 mm.

20.2.4.5. Rupture

Suite aux trois paliers de chargement précédents, la dernière phase de l'essai a consisté à augmenter progressivement la charge jusqu'à atteindre un plateau où l'effort mesuré n'a plus progressé, alors que le vérin continuait à se déplacer. L'essai a alors pris fin (Figure 20.3).

20.3. Résultats et discussion

Il faut signaler tout d'abord que les remarques faites dans ce qui suit doivent être interprétées prudemment, car seule une poutre de chaque type de béton a été testée.

20.3.1. Espacement entre fissures

Une vue typique de la face latérale des poutres en fin d'essai est donnée Figure 20.4 (zone en flexion pure). Elle montre une image caractéristique de la configuration de la fissuration provoquée par la flexion. L'espacement moyen $s_{r,moy,exp}$ entre les différentes fissures verticales a été déterminé pour

les différents paliers de chargements. Ne sont considérées ici que les fissures principales (les plus visibles sur la Figure 20.4), c'est-à-dire les seules qui ont existé de la phase initiale jusqu'à la phase finale de fissuration (niveaux de chargement de service, cf. § 20.2.4 du présent chapitre). En outre, l'espacement maximum entre les fissures $s_{r,max,exp}$ et le nombre de fissures à l'intérieur de la zone en flexion pure ont été comptés. Ces paramètres sont présentés dans le Tableau 20.5 (entre parenthèses : écart-type) pour les différentes poutres testées. La tendance observée corrobore les résultats publiés dans de précédentes études (voir références, § 1 du présent chapitre), à savoir que l'espacement entre les fissures diminue lorsque la teneur totale en GBR augmente. Comme on le verra plus loin, ce comportement est plausible et peut s'expliquer par l'augmentation du rapport entre l'adhérence et la résistance à la traction, avec la teneur totale en GBR.

Figure 20.3

Essai de flexion – Fissuration finale typique et phase de rupture

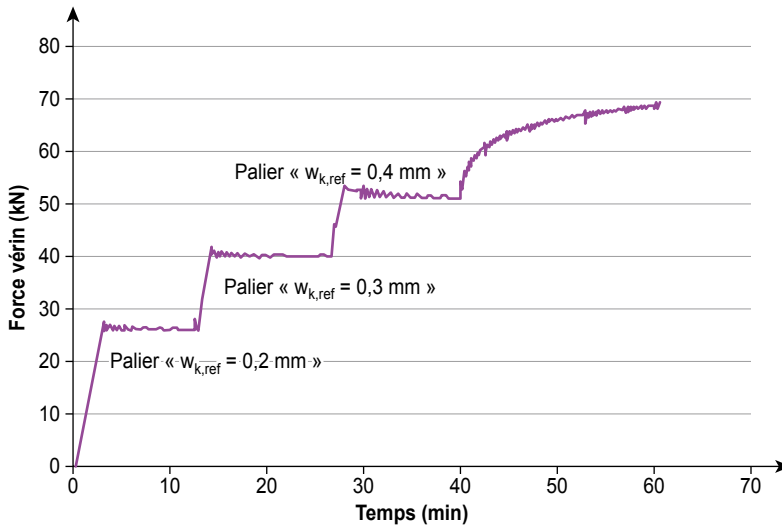


Figure 20.4

Configuration typique de la fissuration



Crédit photo : H. Mercado-Mendoza, ICube.

Tableau 20.5

Espacements entre fissures calculés et mesurés

Poutre		0S0G	30S30G	0S100G	100S100G
$s_{r,moy,exp}$	[cm]	20,2 (5,8)	16,6 (4,4)	15,6 (5,1)	14,5 (2,8)
$s_{r,max,exp}$	[cm]	27,0	26,0	26,4	20,0
Nombre de fissures	–	12	14	15	17
$s_{r,max,EC2,flexion}$	[cm]				21,2
$s_{r,max,EC2,flexion}^{(1)}$	[cm]				9 + 12,2
$s_{r,max,EC2,k2}$	[cm]	30,0	29,9	29,9	29,7
$s_{r,max,EC2,k2}^{(1)}$	[cm]	9,0 + 21,0	9,0 + 20,9	9,0 + 20,9	9,0 + 20,7

(1) Les valeurs correspondant aux deux termes de l'équation 20.1 sont présentées séparément.

Les résultats présentés dans le Tableau 20.5 montrent aussi que l'espacement mesuré entre les fissures, en particulier l'espacement moyen $s_{r,moy,exp}$, diminue avec la teneur totale en GBR.

Par ailleurs, lorsque la fissuration de la pièce est contrôlée par les armatures en tension (comme dans le cas du présent travail), l'équation suivante de l'Eurocode 2 est utilisée pour calculer l'espacement maximum entre les fissures [NF EN 1992-1-1, 2005, Eq. (7.11)] :

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad (20.1)$$

où c est l'enrobage (la couverture) des armatures longitudinales, ϕ le diamètre nominal des armatures longitudinales, et $\rho_{p,eff}$ le ratio d'armature de la zone de béton en tension (*cf. ibid.*).

Dans l'équation 20.1, le premier terme prend en compte, *via* la constante k_3 , la zone à proximité de la fissure où l'ancrage de la barre dans le béton est déficient (défaut d'appui des bielles comprimées, qui permettent l'ancrage). Le second terme prend en compte l'interaction entre les contraintes dans les barres d'armature et le béton environnant, à partir d'une fissure donnée jusqu'à la suivante, là où la résistance à la traction du béton est atteinte. Ainsi, le produit $k_1 \cdot k_4$ – dont l'influence sur le calcul de l'espacement est précisée par la suite – contrôle la relation entre la résistance à la traction du béton et la contrainte d'adhérence acier/béton.

Le coefficient k_2 tient compte du profil du diagramme de contraintes de traction dans le béton, entre les fissures. Les prescriptions de l'Eurocode 2 sont ambiguës quant à sa valeur. D'une part, « pour la flexion » (cas présent), une valeur de 0,5 est préconisée. D'autre part, « pour des zones localisées », la valeur de k_2 est à calculer à partir de la plus grande et de la plus petite contrainte dans l'aire

effective du béton tendu. C'est pourquoi, comme indiqué dans le Tableau 20.5, pour chaque poutre testée, deux valeurs de l'espacement maximum de fissuration ont été calculées selon les deux approches mentionnées, c'est-à-dire $s_{r,max,EC2,flexion}(k_2 = 0,5)$ et $s_{r,max,EC2,k_2}(0,5 < k_2 < 1)$, respectivement. Ces calculs ont été effectués en utilisant les propriétés mesurées sur les matériaux (§ 20.2.3 de ce chapitre).

Pour la poutre témoin 0S0G (qui ne contient que des granulats naturels), on peut voir Tableau 20.5 que la valeur calculée de $s_{r,max,EC2,flexion}$ (stipulée par l'Eurocode 2 pour les poutres en flexion) est très proche de l'espacement moyen mesuré expérimentalement entre fissures $s_{r,moy,exp}$. Par ailleurs, l'espacement maximum entre deux fissures contiguës $s_{r,max,exp}$ est plutôt bien prédit à partir de la valeur k_2 déterminée sur la base du diagramme de contraintes de traction, $s_{r,max,EC2,k_2}$.

Pour les poutres contenant des GBR, le Tableau 20.5 montre que l'Eurocode 2 surestime la valeur mesurée des espacements entre fissures, notamment l'espacement moyen entre fissures $s_{r,moy,exp}$ (comme en témoigne le nombre de fissures apparues dans chaque cas). En outre, la « surestimation » est plus flagrante lorsque la teneur totale en GBR est plus élevée. De même, en première approximation, la fissuration des poutres 30S30G et 0S100G semble identique (voir Tableau 20.1 et Tableau 20.5). Il convient cependant de noter que la poutre 0S100G a une fissure de plus que la poutre 30S30G, ce qui peut expliquer la valeur légèrement inférieure de l'espacement moyen de ses fissures.

Pour expliquer le comportement décrit par les données du Tableau 20.5, il convient de revenir sur le produit $k_1.k_4$ de l'équation 20.1. En effet, on peut démontrer que l'espacement entre les fissures le long d'une poutre en béton armé soumise à la flexion est : i) directement proportionnel à la résistance à la traction du béton ; ii) inversement proportionnel à la contrainte d'adhérence que l'interface acier/béton est capable de générer au cours de la flexion. Le produit $k_1.k_4$ équivaut donc au rapport entre la résistance à la traction susmentionnée et la contrainte d'adhérence. Par ailleurs, en comparant le Tableau 20.3 et le Tableau 20.5, on remarque que la résistance à la traction des différents bétons et l'espacement entre les fissures varient qualitativement de la même façon (leur valeur diminue lorsque la teneur totale en GBR augmente). Or, selon l'étude RECYBETON réalisée par le laboratoire L2MGC (cf. chapitre 16 de cet ouvrage « Adhérence entre armatures et bétons de GBR »), on peut observer que la contrainte d'adhérence ne varie pas selon la même tendance. Les résultats obtenus dans l'étude mentionnée montrent en effet que l'évolution de la contrainte d'adhérence est négligeable au regard de la valeur de la résistance à la traction mesurée ici. Par conséquent, la diminution de l'espacement entre les fissures peut être attribuée vraisemblablement à la seule diminution de la résistance à la traction des bétons, selon leur teneur totale en GBR.

L'approche adoptée par l'Eurocode 2 [NF EN 1992-1-1, 2005, §7.3.4] consiste à attribuer une valeur constante au produit $k_1.k_4$ de l'équation (20.1) (et donc implicitement au rapport susmentionné entre la résistance à la traction et la contrainte d'adhérence), sans considérer la qualité du béton ni les propriétés mécaniques de l'interface acier/béton. Cette approche néglige donc le fait que la résistance à la traction du béton diminue avec sa teneur en GBR. Il en résulte que l'espacement entre fissures, évalué selon l'équation (20.1), surestime les valeurs mesurées, comme indiqué ci-dessus. Néanmoins, on peut remarquer que les études statistiques traitant de l'espacement et de l'ouverture des fissures montrent que les propriétés du béton n'ont que peu d'influence sur ces paramètres (voir par exemple les travaux de [Robinson et Morisset, 1969] qui ont porté sur des bétons de granulats naturels de résistances très différentes).

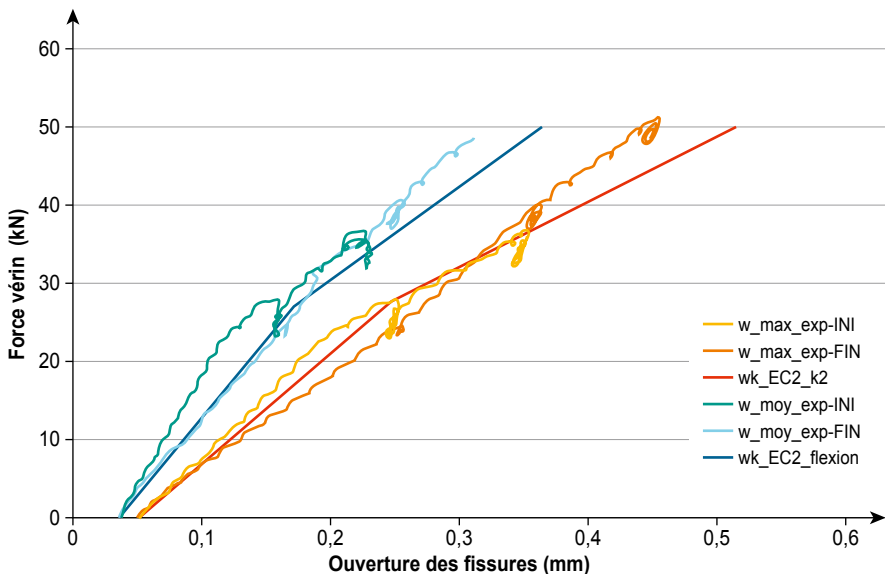
La tendance observée indiquant que l'espacement des fissures diminue lorsque le taux de GBR augmente a également été signalé par d'autres auteurs (cf. § 20.1 du présent chapitre).

20.3.2. Ouverture des fissures

L'évolution de l'ouverture des fissures de la poutre 0S0G, en fonction de la charge appliquée, est donnée Figure 20.5. Les courbes en traits pleins figurent l'évolution de la fissure la plus large pendant les deux phases de fissuration, initiale ($w_{\max,exp,INI}$) et finale ($w_{\max,exp,FIN}$). Les courbes en pointillés donnent la valeur moyenne des ouvertures de fissures mesurées sur la zone en flexion

Figure 20.5

Ouverture des fissures – Poutre 0S0G



pure durant les deux phases susmentionnées ($w_{\text{moy,exp,INI}}$ et $w_{\text{moy,exp,FIN}}$). Ces mesures – ainsi que celle de la flèche – ont été comparées aux mesures obtenues par la technique de corrélation d'images numériques. La concordance a été très satisfaisante (écarts dans la plage d'erreur des essais).

Selon les prescriptions de l'Eurocode 2, la largeur de fissure (w_k) est calculée par l'équation [NF EN 1992-1-1, 2005, Eq. (7.8)] :

$$w_k = s_{r,\text{max}}(\varepsilon_{\text{sm}} - \varepsilon_{\text{cm}}) \quad (20.2)$$

où $s_{r,\text{max}}$ est l'espacement maximum des fissures, traité dans le § précédent. Le deuxième terme représente la différence d'allongement entre l'armature et le béton environnant, entre deux fissures contiguës. L'Eurocode 2 donne la relation suivante pour calculer cette déformation différentielle [NF EN 1992-1-1 2005, Eq. (7.9)] :

$$\varepsilon_{\text{sm}} - \varepsilon_{\text{cm}} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{\text{ct,eff}}}{\rho_{\text{p,eff}}}(1 + \alpha_e \cdot \rho_{\text{p,eff}})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (20.3)$$

où

- σ_s est la contrainte dans les barres d'armature à un niveau de charge donné,
- k_t est un coefficient d'ajustement issu de la modélisation du comportement d'une poutre fléchie partiellement fissurée,
- $f_{\text{ct,eff}}$ est la résistance effective à la traction du béton au moment où la largeur de la fissure est calculée (égal à f_{ctm} si l'âge du béton est de 28 jours au moins),
- α_e est le rapport entre les modules d'élasticité de l'acier et du béton E_s/E_{cm} .

Comme indiqué dans l'équation (20.2), la largeur théorique de la fissure est fonction de l'espacement maximum des fissures $s_{r,\text{max}}$ (Équation 20.1). Ainsi, en procédant comme dans le paragraphe précédent, deux courbes distinctes, $w_{k,\text{EC2,flexion}}$ et $w_{k,\text{EC2,k2}}$, ont été tracées pour la poutre OS0G, en utilisant respectivement $s_{r,\text{max,EC2,flexion}}$ et $s_{r,\text{max,EC2,k2}}$ pour le calcul de l'ouverture de la fissure à chaque niveau de chargement. Elles complètent la Figure 20.5. Les propriétés réelles des matériaux, présentées dans le Tableau 20.3 et le Tableau 20.4, ont toujours été utilisées pour effectuer ces calculs.

Il faut noter que les courbes théoriques $w_{k,\text{EC2,flexion}}$ et $w_{k,\text{EC2,k2}}$ ont été calculées en tenant compte du poids propre des poutres (dont l'incidence est non négligeable), alors que, pour des raisons techniques, les courbes expérimentales ne prennent pas en compte cette charge. Rappelons que les fissures le long de la poutre n'ont pu être repérées qu'après avoir appliqué une certaine charge. Cette étape a été nécessaire pour placer les capteurs de déplacement, dont le « zéro » a été fait lorsque la charge de fissuration a été éliminée, ce qui supprime de facto l'effet du poids propre de la poutre. Par conséquent, pour pouvoir comparer courbes théoriques et courbes expérimentales (Figure 20.5), ces dernières ont été décalées sur l'axe des abscisses. On suppose donc implicitement ici que les déplacements sont linéaires pour les faibles niveaux

de chargement. La même approche a été adoptée pour les courbes présentant l'ouverture des fissures et la flèche (Figures 20.6, 20.7 et 20.8) et (Figures 20.9, 20.10, 20.11 et 20.12) respectivement.

Comme déjà observé pour l'espacement des fissures, pour la poutre témoin, il existe aussi une très bonne concordance entre les estimations de l'Eurocode 2 et les données expérimentales (voir Figure 20.5), surtout pour la phase initiale de fissuration. Logiquement, comme $s_{r,max,EC2,k2}$ restitue bien les espacements maximums entre fissures, $w_{k,EC2,k2}$ restitue donc bien aussi l'ouverture des fissures les plus larges. De même, l'ouverture moyenne des fissures est bien estimée par $w_{k,EC2,flexion}$. Malgré des courbes d'allure différente pour la phase finale de fissuration, les estimations restent pertinentes, du moins au niveau des ordres de grandeur.

En adoptant les mêmes conventions que sur la Figure 20.5, les ouvertures de fissure des poutres 30S30G, 0S100G et 100S100G contenant les GBR ont été tracées sur les Figures 20.6, 20.7 et 20.8, respectivement. Pour comparer les différentes formulations, les ouvertures pour un chargement de 40 kN, lues sur les Figures 20.5 et 20.6, ont été reportées dans le Tableau 20.6 (ce chargement est assez élevé pour mettre en exergue les différentes ouvertures pendant la phase finale de fissuration). Les poutres 0S0G (témoin) et 30S30G (teneur totale en GBR de 30 %) ont un comportement expérimental très similaire. La poutre 0S100G (teneur totale en GBR de 52 %) montre des fissures plus fines que celles des trois autres poutres (ouvertures maximales et moyennes). Ce constat est attribué au fait que, comme indiqué précédemment, la poutre 0S100G présente une fissure supplémentaire, bien que les propriétés mécaniques du béton des deux poutres (30S30G et 0S100G), et les espacements entre leurs fissures soient assez similaires (cf. Tableau 20.3 et Tableau 20.5, respectivement). Enfin, la poutre 100S100G montre une réponse intermédiaire.

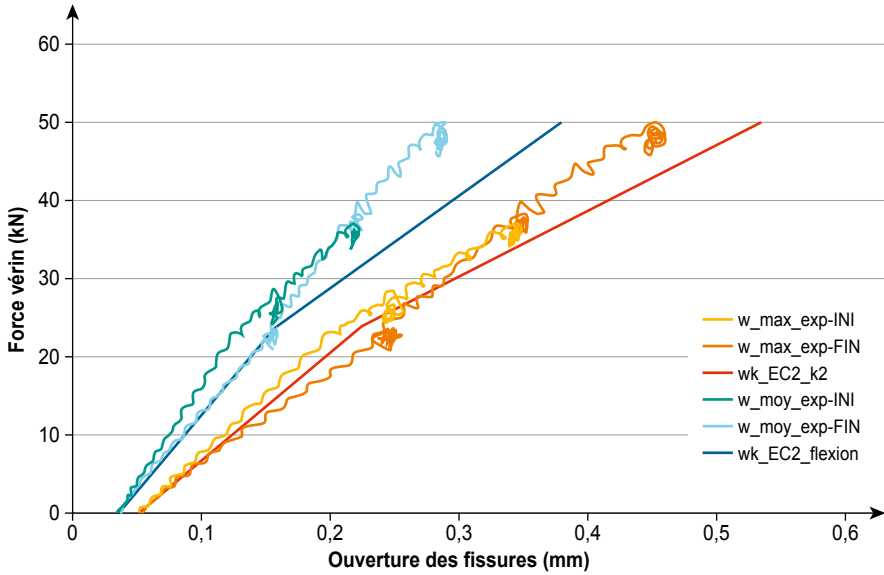
Tableau 20.6

Ouverture des fissures (phase finale de fissuration) pour un chargement de 40 kN

Désignation du béton dans les poutres		0S0G	30S30G	0S100G	100S100G
$w_{moy,exp-FIN}$	(mm)	0,256	0,228	0,193	0,228
$w_{max,exp-FIN}$	(mm)	0,363	0,361	0,302	0,332

Figure 20.6

Ouverture des fissures – Poutre 30S30G

**Figure 20.7**

Ouverture des fissures – Poutre 0S100G

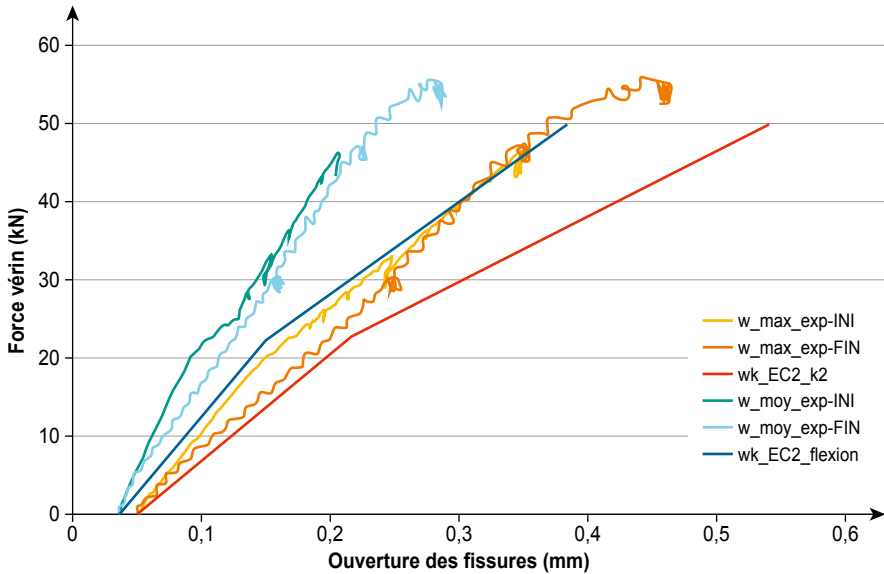
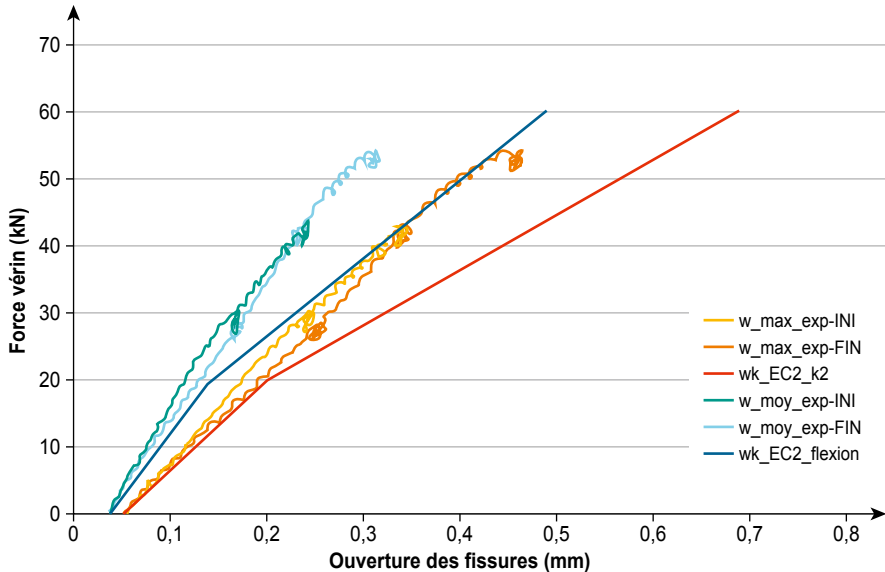


Figure 20.8

Ouverture des fissures – Poutre 100S100G



Logiquement, comme la largeur des fissures est directement proportionnelle à l'espacement des fissures [relation (20.2)], les mêmes commentaires que précédemment s'appliquent aux Figures 20.6, 20.7 et 20.8. En effet, sur la base des résultats obtenus pour la poutre témoin 0S0G, on voit que les ouvertures de fissure, calculées selon les relations de l'Eurocode 2, sont surestimées par rapport aux valeurs expérimentales. La différence est d'autant plus significative que la teneur totale en GBR est grande. Par ailleurs, la substitution jusqu'à 30 % du sable naturel par le sable de GBR ne semble pas avoir d'impact majeur, du moins pour ce qui concerne l'estimation des ouvertures de fissures.

20.3.3. Flèches

Les Figures 20.9, 20.10, 20.11 et 20.12 présentent l'évolution de la flèche à mi-portée, mesurée avec les capteurs LVDT décrits au § 20.2.4 du présent chapitre, en fonction de la charge appliquée, pour les poutres 0S0G, 30S30G, 0S100 G et 100S100G, respectivement. La courbe pleine noire décrit l'évolution de la flèche au cours de la phase initiale de fissuration ; la courbe pleine grise correspond à la phase finale de fissuration. Comme pour les ouvertures de fissure (Tableau 20.6), la flèche mesurée sous une charge de 40 kN appliquée durant la phase finale de fissuration a été reportée dans le Tableau 20.7. Comme signalé dans des travaux antérieurs (voir les références au § 1 du présent chapitre), la flèche augmente lorsque la teneur totale en GBR augmente, la majoration étant d'environ 50 % pour la poutre 100S100G. Cette observation est à relier aux propriétés mécaniques (modules d'élasticité) des différents bétons testés dans cette étude (Tableau 20.3).

Figure 20.9

Flèche – Poutre 0S0G

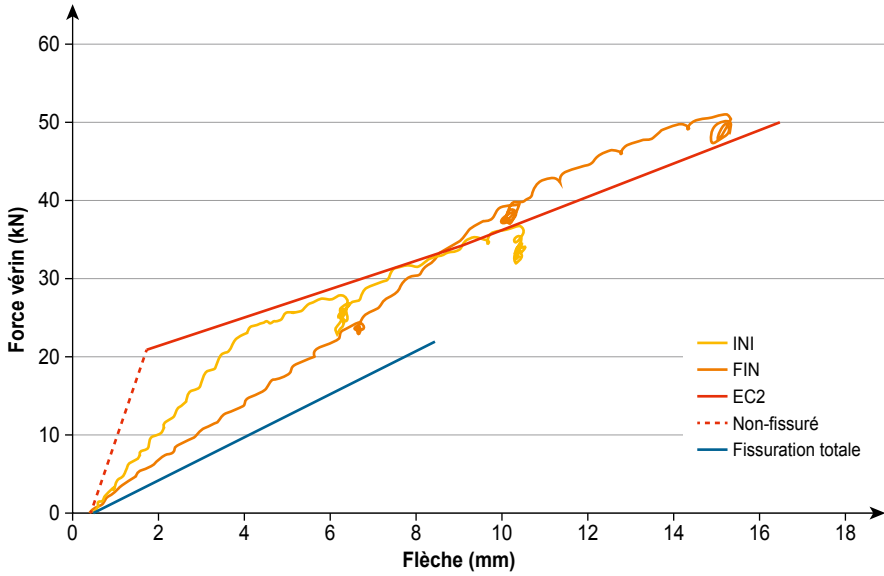


Figure 20.10

Flèche – Poutre 30S30G

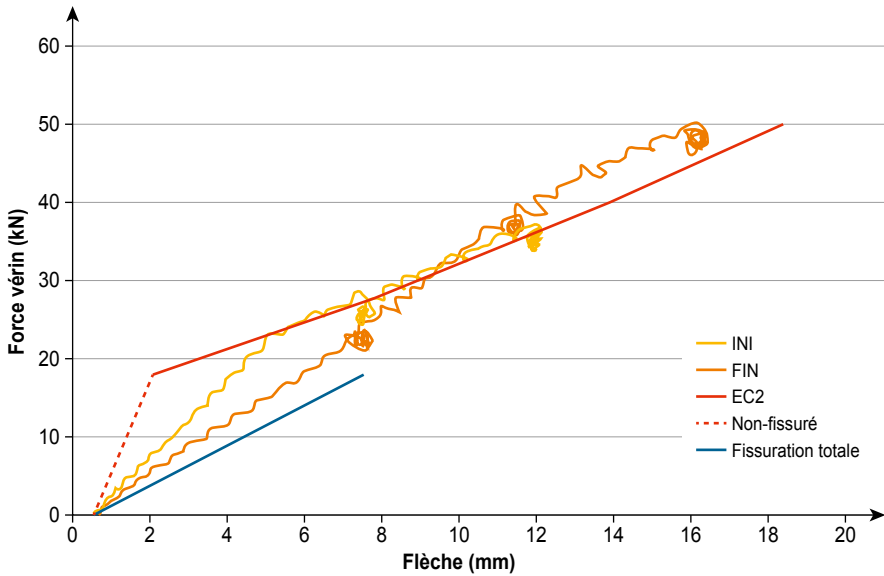


Figure 20.11

Flèche – Poutre 0S100G

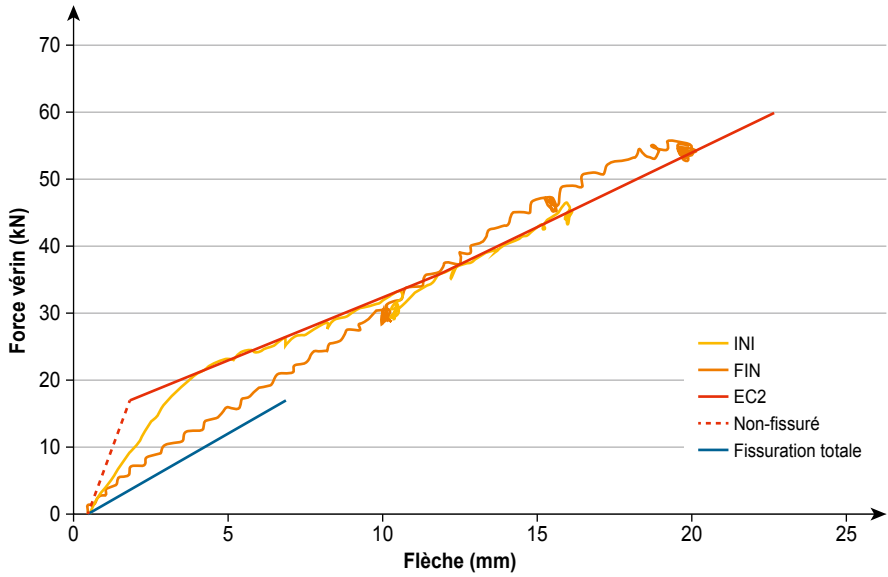


Figure 20.12

Flèche – Poutre 100S100G

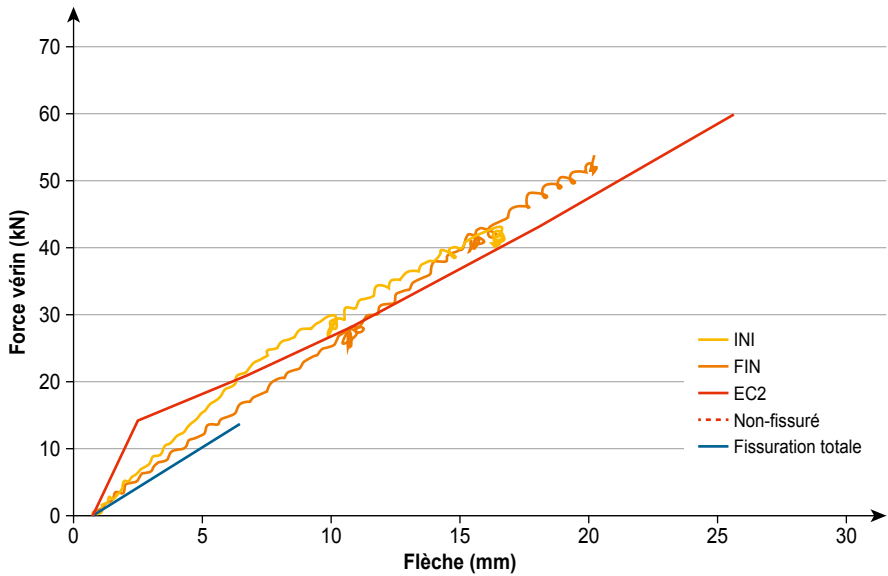


Tableau 20.7

Flèches (phase finale de fissuration) pour une charge appliquée de 40 kN

Désignation du béton dans les poutres		0S0G	30S30G	0S100G	100S100G
Déformation mesurée	(mm)	10,4	11,9	12,9	15,2
Déformation calculée	(mm)	11,9	13,8	13,9	16,5

L'Eurocode 2 stipule que, « dans la plupart des cas », « il sera acceptable » d'utiliser l'expression suivante pour estimer la flèche (f) d'une poutre soumise à un moment fléchissant supérieur à celui qui, en théorie, génère la première fissure dans le béton [NF EN 1992-1-1, 2005, §7.4.3] :

$$f = (1 - \xi)f_I + \xi \cdot f_{II} \quad (20.4)$$

où f_I et f_{II} sont les flèches admissibles calculées soit lorsque la totalité de la poutre demeure non fissurée (état I) soit lorsque le béton en tension dans la poutre (dans chaque section de la poutre) est entièrement fissuré (état II), respectivement.

En ce qui concerne le coefficient de distribution ξ , il est donné par [NF EN 1992-1-1, 2005, Eq. (7.19)] :

$$\xi = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \quad (20.5)$$

où β est un coefficient qui tient compte de l'impact des charges cycliques ou permanentes sur les paramètres de déformation de la poutre, σ_{sr} est la contrainte dans les armatures au moment où la charge appliquée sur la poutre produit la première fissure, et σ_s est la contrainte dans les armatures au niveau de chargement considéré.

Les graphiques donnant la flèche à mi-travée ont été tracés à partir des équations ci-dessus, en utilisant les propriétés mesurées sur les matériaux (Tableau 20.3 et Tableau 20.4) et les équations classiques de la résistance des matériaux. Les courbes relatives à chaque poutre testée complètent les Figures 20.9, 20.10, 20.11 et 20.12 (repère EC2). Les valeurs calculées pour un chargement donné (40 kN) au cours de la phase finale de fissuration sont données dans le Tableau 20.7. Enfin, les courbes correspondant aux deux flèches théoriques (repères « non fissurée » et « fissuration totale ») complètent les figures. Elles permettent de comparer le comportement théorique et expérimental des poutres testées.

Pour la phase initiale de fissuration, les Figures 20.9, 10.10, 20.11 et 20.12 montrent que les spécifications de l'Eurocode 2 sont plutôt bien adaptées pour prédire les flèches qui ont été observées dans cette étude. Ce constat s'applique indépendamment de la teneur totale en GBR dans le béton, du moins si le ferrailage et les caractéristiques géométriques sont correctement pris en

compte (§ 2.2 du présent chapitre). Pour la phase finale de fissuration, même si les courbes sont légèrement décalées, les estimations restent satisfaisantes, notamment au niveau des ordres de grandeur, toujours du moment où les propriétés mécaniques réelles des matériaux sont utilisées. En accord avec ce constat, [Silva *et al.*, 2016b] ont proposé une approche pour tenir compte de l'impact de l'incorporation des GBR dans le calcul de la flèche des poutres en béton armé. En bref, cette approche consiste à utiliser un « indice GBR » qui altère le module d'élasticité calculé à partir de la résistance à la compression mesurée, et de calculer la flèche selon les relations de l'Eurocode 2 en utilisant ce module d'élasticité réduit.

Néanmoins, pour des plages de chargements faibles (jusqu'à 20-25 kN environ, selon le type de béton), on peut noter que l'approche de l'Eurocode 2 sous-estime les flèches mesurées dans la phase de fissuration initiale et finale. Cependant, comme cet écart s'applique aussi à la poutre témoin en béton de granulats naturels (Figure 20.9), l'applicabilité des prescriptions de l'Eurocode 2 aux pièces contenant des GBR n'est donc pas remise en cause. En outre, comme les flèches mesurées au cours de la phase initiale de fissuration sont également sensiblement sous-estimées, les explications doivent être recherchées ailleurs. En effet, comme la phase initiale de fissuration a été réalisée après une fissuration préalable (§ 2.4 du présent chapitre), on peut penser *a priori* que des poutres fissurées subissent des déformations plus amples que celles de poutres initialement non fissurées. Mais comme l'évaluation des ouvertures de fissure ne présente pas cet artéfact (Figure 20.15), il faut donc rechercher une autre hypothèse ou utiliser un modèle complété ou amélioré pour calculer les flèches à tous les stades de chargement, y compris les flèches de faibles amplitudes, telles qu'indiquées ci-dessus.

En résumé, la sous-estimation des flèches mesurées aux faibles chargements, sur les Figures 20.9, 20.10, 20.11 et 20.12, est probablement erronée, car les poutres testées n'étaient pas initialement « non fissurées ». En revanche, les flèches calculées permettent une bonne estimation des valeurs mesurées, quelle que soit la teneur totale en GBR, dans la mesure où les charges de service sont appliquées à court terme (*cf.* § 3.5 de ce chapitre pour les charges concernées). Logiquement, la précision diminue progressivement lorsqu'on se dirige vers la ruine des poutres testées (le modèle de l'Eurocode 2 n'est pas destiné à prévoir la flèche aux ELU). Enfin, comme les flèches mesurées sur les différentes poutres présentent des différences importantes selon la teneur totale en GBR, il est alors nécessaire de mesurer le module d'élasticité et le facteur de fluage du béton des poutres dont la flèche doit être contrôlée précisément.

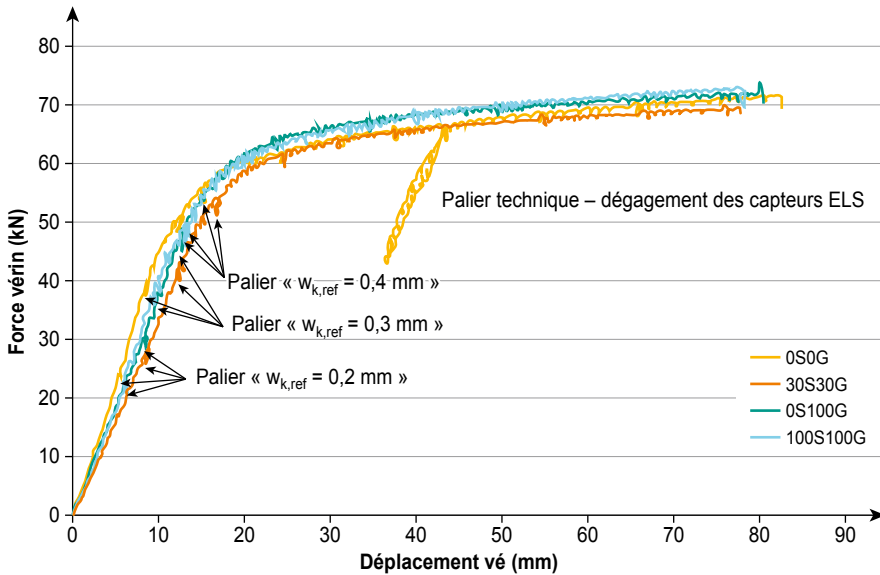
20.3.4. Phase de rupture

Compte tenu des caractéristiques du ferrailage des poutres testées dans cette étude (poutres sous-armées, *cf.* § 2.2 du présent chapitre), le mode de rupture

attendu est de type ductile. Cette rupture progressive a été effectivement constatée pour toutes les poutres lors des essais de flexion, comme illustré Figure 20.13 où le déplacement du vérin hydraulique est tracé en fonction de la charge. Les valeurs de déplacement étant trop grandes pour être mesurées par les capteurs à induction, ceux-ci ont dû être retirés au terme du dernier palier de la phase finale de fissuration.

Figure 20.13

Mesures sur le vérin hydraulique – fissuration finale et phases de ruine



La Figure 20.13 montre que les quatre poutres testées se comportent de manière très similaire au stade de leur ruine (plateau de ductilité à environ 70 kN), indépendamment de leur teneur en GBR. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus par d'autres auteurs. On remarquera sur la figure qu'un changement notable de pente s'opère lorsque l'effort dépasse 60 kN environ. Ce stade correspond probablement à la plastification des armatures. En effet, en se basant sur les caractéristiques de la section fissurée et sur les propriétés mécaniques des matériaux, on trouve que la déformation moyenne de l'acier, pour une charge de 60 kN, est de $2\,686\ \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$; rappelons que la limite élastique de l'acier, déterminée expérimentalement (Tableau 20.4), vaut $2\,757\ \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$.

Comme les poutres testées sont sous-armées, leur ruine se produit par plastification des aciers. Une vérification des spécifications de l'Eurocode 2 à l'ELU des poutres soumises à la flexion [NF EN 1992-1-1, 2005, §6] a alors été effectuée comme suit (Tableau 20.8) :

- pour chaque poutre, la contrainte ($f_{s,\text{calc}}$) et la déformation ($\epsilon_{s,\text{calc}}$) dans les armatures associées à l'effort maximum (F_{exp}) à la fin de l'essai de flexion

(Figure 20.13) ont été calculées en tenant compte de la résistance en compression du béton mesurée expérimentalement,

- à partir de la courbe expérimentale des essais de traction effectués sur les armatures, la contrainte $f_{s,exp}$, correspondant à $\varepsilon_{s,ult,calc}$, a été déterminée,
- enfin, la contrainte expérimentale ($f_{s,exp}$) et la contrainte calculée ($f_{s,calc}$) ont été comparées. Elles montrent un très bon accord, comme indiqué Tableau 20.8, ce qui valide l'applicabilité des spécifications de l'Eurocode 2 à l'estimation de la résistance des poutres contenant des GBR.

Tableau 20.8

Contrainte dans l'acier à l'ELU

Désignation du béton dans les poutres		0S0G	30S30G	0S100G	100S100G
F_{exp}	[kN]	72,3	72,8	71,8	70,0
$f_{s,calc}$	[MPa]	605	610	605	595
$\varepsilon_{s,calc}$	[%]	3,01	2,71	2,60	2,34
$f_{s,exp}$	[MPa]	616	613	612	609
$ f_{s,calc} - f_{s,exp} / f_{s,exp}$	[%]	1,8	0,5	1,2	2,3

20.3.5. Influence spécifique d'un chargement permanent à l'ELS

20.3.5.1. Ouverture des fissures

Selon l'Eurocode 2, Équation (7.8), le second terme de la déformation moyenne, ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$), qui prend en compte le raidissement en traction, est proportionnel à un facteur k_t égal à 0,6 pour un chargement instantané, et à 0,4 pour un chargement permanent ou cyclique. Même si l'adhérence n'est pas significativement différente entre bétons de GBR et de GN pour un chargement instantané, la valeur $k_t = 0,4$ peut être différente pour les bétons de GBR, en raison d'un facteur de fluage ϕ différent. Mais il n'existe pas de résultats expérimentaux comparatifs entre bétons de GBR et de GN sous chargement permanent permettant d'estimer la valeur de k_t pour les bétons de GBR. En outre, pour les bétons de granulats naturels, les valeurs de β ne sont pas explicitement liées au facteur de fluage ϕ .

20.3.5.2 Flèche

Selon les développements du § 20.3.3, connaissant le moment M_{Ed} et la section d'acier A_s , la flèche f_l à l'état non fissuré, qui est inversement proportionnelle au module E_c , est toujours correctement évaluée à partir de la valeur propre de E_c , tant pour les bétons de GBR que pour les bétons de granulats naturels. En utilisant le module efficace $E_{c,eff}$, la différence sur le facteur de fluage est alors aussi prise en compte.

Pour la flèche f_{II} à l'état de fissuration totale, l'adhérence entre l'armature et le béton est supposée nulle, alors f_{II} est indépendant de E_c et inversement proportionnelle à E_s . Le raidissement en traction lié à l'adhérence est introduit au moyen d'un facteur ζ qui dépend à son tour d'un facteur β traduisant l'influence de la charge permanente ou cyclique ($\beta = 1$ pour un chargement à court terme, ou 0,5 pour un chargement permanent ou cyclique). Pour la même raison que précédemment, la valeur $\beta = 0,5$ peut varier pour les bétons de GBR, et elle est difficile à estimer car, une fois de plus, il n'y a pas de résultats expérimentaux dédiés, et β n'est pas explicitement liée à ϕ .

20.4. Conclusion

L'objectif principal des travaux ici rapportés était d'évaluer l'impact de l'utilisation des GBR sur la réponse de poutres en béton armé testées en flexion, et l'applicabilité des prescriptions de l'Eurocode 2 pour leur dimensionnement. Dans ce but, une campagne d'essais a été réalisée sur des poutres sous-armées de grande dimension.

L'espacement entre les fissures diminue lorsque la teneur totale en GBR augmente. Ce résultat peut découler d'un rapport « adhérence/résistance à la traction » un peu supérieur pour les bétons de GBR, comparativement aux bétons de granulats naturels. Les deux types de béton ont apparemment une adhérence similaire, mais les bétons des GBR ont une résistance à la traction un peu plus faible.

L'ouverture des fissures le long des poutres diminue également avec la teneur totale en GBR. Les espacements entre fissures ont été mesurés et calculés. La comparaison montre une très bonne concordance, du moins pour la poutre témoin en granulats naturels. Par contre, l'espacement des fissures est surestimé pour les poutres contenant des GBR. La différence s'explique vraisemblablement par la non prise en compte dans les relations de l'Eurocode 2 de certains paramètres intrinsèques au matériau, comme la résistance à la traction du béton. La surestimation concerne aussi l'ouverture des fissures, mais elle découle logiquement de la mauvaise estimation susmentionnée de l'espacement des fissures.

La flèche à mi-portée augmente avec la teneur totale en GBR, en raison d'une altération du module d'élasticité du béton. Les valeurs de flèche calculées selon l'Eurocode 2 concordent plutôt bien avec celles mesurées durant les essais de flexion, quelle que soit la teneur totale en GBR, du moins si les charges de service sont appliquées à court terme. Cependant, les flèches mesurées pour les faibles taux de chargement sont sous-estimées. Cette différence est imputée au protocole d'essai de flexion, qui comporte une phase de pré-fissuration. Dans tous les cas, les règles de l'Eurocode 2 sont applicables car cet artéfact concerne aussi la poutre témoin en béton de granulats naturels. La concordance entre flèches calculées et mesurées est moins bonne lorsque

les poutres atteignent leur stade ultime, car le modèle de l'Eurocode 2 ne s'applique pas aux ELU. Il faut signaler également que, puisque la flèche augmente visiblement avec la teneur totale en GBR, les spécifications de l'Eurocode 2 concernant la dispense du calcul de la flèche devraient alors être revues.

En outre, il a été montré que les relations de l'Eurocode 2 permettent de prédire de façon satisfaisante la capacité ultime (ELU) des poutres testées dans ce travail, indépendamment de leur teneur totale en GBR.

Il faut mentionner aussi que tous les calculs ont été effectués avec les paramètres mécaniques mesurés sur les matériaux. Mais seuls des chargements instantanés ont été appliqués. On sait cependant que le fluage des bétons de GBR est plus conséquent que celui des bétons de granulats naturels. Alors, pour les dimensionnements selon l'Eurocode 2, il faudrait également revoir les coefficients dédiés au chargement permanent, c'est-à-dire k_t pour l'ouverture des fissures et β pour la flèche. Les relations de l'Eurocode 2 dispensant de ces calculs devraient donc être également révisées. Pour les éléments structuraux dont la déformation est un paramètre sensible, il est aussi recommandé de toujours mesurer le module d'élasticité et le coefficient fluage du béton.

Enfin, il faut rappeler que les présentes conclusions découlent de résultats expérimentaux obtenus sur une seule poutre testée par type de béton, et dans une configuration unique de ferrailage. Par conséquent, elles ne peuvent être extrapolées sans précautions.

Chapitre 21.

Poutres soumises à l'effort tranchant

G. Wardeh¹, E. Ghorbel¹, B. Fouré²

Résumé – Ce chapitre présente les résultats d'un travail expérimental portant sur le comportement à l'effort tranchant de poutres armées fabriquées avec des bétons à base de granulats naturels (GN) ou à base de granulats de béton recyclé (GBR). Ces poutres avaient pour dimensions $200 \times 250 \times 1\,900$ mm et ne comportaient pas d'armatures transversales. Elles ont été testées en flexion 4 points, avec un rapport « portée d'effort tranchant – hauteur utile » (a/d) de 1,5 ou de 3. Les bétons étaient de classe de résistance à la compression C35/45 et de classe de consistance S4. Leur résistance effective à la compression, à la traction par fendage, et leur module d'élasticité ont été mesurés. Pour une même classe de résistance à la compression du béton, les résultats montrent que les poutres en béton de GBR présentent une résistance à l'effort tranchant un peu moindre que les poutres en béton de granulats naturels, alors que les mécanismes de rupture sont quasi-identiques pour les deux types de béton. Lorsque la rupture est de type fragile, la diminution de la résistance à l'effort tranchant des poutres en bétons de GBR est clairement reliée à la diminution de la résistance à la traction par fendage des bétons de GBR. Lorsqu'elle n'est pas fragile, la diminution de la résistance à l'effort tranchant est plus conséquente que la diminution de la résistance à la traction. Pour une même charge, les poutres en béton de GBR présentent une flèche plus élevée que les poutres en béton de granulats naturels. Les surfaces de rupture des poutres sollicitées en configuration $a/d = 3$, observées au microscope optique, montrent que la rupture des bétons de granulats naturels se produit majoritairement à l'interface entre les granulats et le mortier, alors que pour les bétons de GBR, elle se produit plutôt à travers les GBR, avec un réseau de fissures plus dense. La résistance expérimentale à l'effort tranchant a été comparée à la résistance prédite par l'EN 1992-1-1. Il en résulte que des adaptations sont nécessaires pour améliorer l'applicabilité de ce règlement aux bétons de GBR. Les conclusions ont été confirmées par les résultats issus d'autres travaux publiés.

1. Laboratoire L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, Neuville-sur-Oise.

2. Consultant, Bougival.

21.1. Introduction

Cette étude expérimentale vise à : i) caractériser l'effet des granulats de béton recyclé (GBR) sur la résistance à l'effort tranchant de poutres armées, sans cadres, ii) étudier l'applicabilité de l'Eurocode 2 (EC2) [EN 1992-1-1, 2004] pour prédire la capacité portante des poutres en béton de GBR, avec ou sans armatures transversales.

La rupture par effort tranchant des poutres en béton armé est un phénomène complexe, gouverné par plusieurs paramètres, dont notamment le rapport « portée d'effort tranchant – hauteur utile » (a/d), le ratio d'armatures longitudinales (ρ_l), le ratio d'armatures transversales (ρ_t), la résistance à la compression du béton (f_{cm}), et la taille des granulats. Selon le rapport a/d et le ratio d'armatures transversales, différents modes de rupture sont possibles : rupture en diagonale, en compression-cisaillement ou par une rupture entre l'appui et le point d'application de la charge. Des recherches sur la résistance et les mécanismes de rupture à l'effort tranchant de poutres armées en béton incorporant des GBR (gravillons le plus souvent) ont déjà été publiées. Seuls certaines proposent des conclusions fiables, en relation avec la résistance au cisaillement du béton principalement [Arezoumandi *et al.*, 2014 ; Etxeberria *et al.*, 2007 ; Fathifazl *et al.*, 2011 ; Gonzalez-Fonteboa *et al.*, 2007 ; Schubert *et al.*, 2012 ; Yun *et al.*, 2011]. Mais ces conclusions sont parfois contradictoires. Elles admettent cependant que la résistance au cisaillement (V_{RC}) des bétons de GBR est généralement inférieure à celle des bétons de granulats naturels. Les raisons en sont attribuées à la plus faible résistance à la traction des bétons de GBR et la moindre rugosité des surfaces de rupture (engrènement des granulats). La rupture peut être fragile ou non, selon l'envergure du rapport a/d et la quantité d'armatures de flexion. Les essais sur poutres avec cadres sont plus rares, mais le paramètre V_{Rs} dédié à la résistance des cadres ne semble pas être affecté par la présence du béton de GBR. Ces résultats n'étant pas consensuels, et parfois même contradictoires, ils n'ont donc pas été retenus d'emblée dans le cadre de ce Projet National RECYBETON.

En partant du principe que le mécanisme de fonctionnement en treillis associé à l'armature transversale n'est pas considérablement modifié par la présence des GBR, il a été décidé de n'étudier, dans le cadre du présent travail, que la seule contribution du béton à la résistance à l'effort tranchant, c'est-à-dire d'utiliser des poutres dépourvues de cadres. Pour prendre en compte la variabilité de la résistance du béton, il a également été décidé de tester trois poutres identiques pour chacun des bétons étudiés.

Les conclusions tirées des présents essais, associées à celles d'autres essais issus de la littérature, sont complétées par des considérations sur la résistance apportée par les armatures transversales et sur la résistance limite des bielles en béton dans le mécanisme du treillis. En outre, une analogie est faite avec les bétons de granulats légers.

21.2. Étude expérimentale

21.2.1. Matériaux et méthodes

21.2.1.1. Matériaux

Les bétons OS0G et 100S100G C35/45 ($f_{ck} = 35$ MPa), mis au point dans le cadre du Projet National RECYBETON, ont été retenus pour cette étude. Ils ne contiennent respectivement que des granulats naturels ou que des GBR. Leur composition est donnée dans les annexes de ce livre.

21.2.1.2. Corps d'épreuves

Des éprouvettes cylindriques 110×220 mm ont été fabriquées pour mesurer la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage et le module d'élasticité dynamique des deux bétons.

Pour chacun des bétons, six poutres de dimension $200 \times 250 \times 1\,900$ mm, dépourvues de cadres, ont été fabriquées. Trois ont été testées avec un rapport « portée de l'effort tranchant – hauteur utile » $a/d = 1,5$ et trois avec un rapport $a/d = 3$. Pour toutes les poutres, l'armature longitudinale était constituée de 4 HA16. L'armature secondaire était constituée de deux barres longitudinales HA8 placées sur la partie supérieure (comprimée) de la poutre, et de six cadres verticaux de diamètre 6 mm, quatre placés dans la partie centrale de la poutre et un à chaque extrémité, au niveau de l'ancrage des armatures principale (Figure 21.1). Il n'y avait donc aucun cadre dans les deux travées de cisaillement. Pour toutes les poutres testées, le taux d'armature longitudinale était $\rho = A_l/bd = 1,78$ %.

Les poutres et éprouvettes ont été réalisées, conservées et testées dans le laboratoire « Structures » de l'Université de Cergy-Pontoise. Elles ont été décoffrées après une semaine, humidifiées pendant une semaine, puis conservées à la température et à l'humidité relative (environ 50 %) du laboratoire, jusqu'au moment des essais à 28 jours.

21.2.1.3. Déroulement des essais

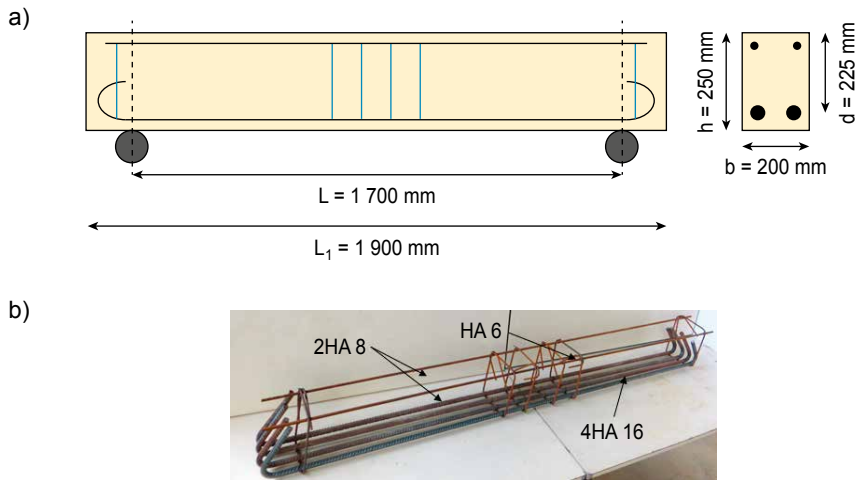
Les essais de compression et de traction par fendage des éprouvettes ont été effectués sur une presse INSTRON de 3 500 kN de capacité. La vitesse de chargement pour l'essai de compression était de 0,5 MPa/s, celle de l'essai de traction par fendage de 0,05 MPa/s.

Les poutres ont été chargées jusqu'à la rupture à l'aide un bâti hydraulique de 300 kN de capacité. Les essais de flexion quatre points ont été effectués à déplacement contrôlé, à vitesse constante de 1 mm/minute. La position des deux points d'application de la charge a varié selon deux configurations, de façon à avoir un rapport « portée de l'effort tranchant – hauteur utile » de 1,5 ou de 3.

La flèche a été mesurée à mi-portée avec un capteur de déplacement (LVDT) placé sous les poutres. Durant les essais, les deux zones situées entre les points d'application de la charge et les appuis ont été filmées en continu afin de repérer l'apparition et de suivre l'évolution des fissures de cisaillement.

Figure 21.1

Dimensions (a) et ferrailage ; (b) des poutres testées



21.2.2. Résultats expérimentaux

21.2.2.1. Propriétés mécaniques des bétons

Les valeurs moyennes et les écarts-types des propriétés des deux bétons sont résumées dans le Tableau 21.1. On peut constater que toutes les propriétés (résistance à la compression, résistance à la traction par fendage et module d'élasticité) diminuent lorsque le squelette granulaire est entièrement constitué de GBR. La diminution est de l'ordre de 8 %, 27 % et 37 % respectivement. La variation de f_{cm} entre béton de GBR et béton de granulats naturels permet d'interpréter la diminution de la résistance à la traction par fendage et le module d'élasticité dynamique en supposant la corrélation de $f_{cm}^{2/3}$ pour $f_{ctm,sp}$ ou de $f_{cm}^{1/3}$ pour $E_{cm,dyn}$. Pour la même résistance à la compression, la diminution est alors environ 18 % pour la résistance à la traction et 22 % pour le module.

Tableau 21.1

Propriétés mécaniques des bétons à 28 jours (entre parenthèses : écart type)

	Béton (C35/45)	Éprouvette	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	$f_{cm,sp}$ (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	$E_{cm,dyn}$ (GPa)
Série 1	0S0G	1	35,3		3,2		
		2	42,0	37,3 (4,1)	3,1	3,2 (0,09)	42,1 (0,7)
		3	34,5		3,3		
	100S100G	1	33,4		2,5		
		2	34,3	33,6 (0,5)	2,6	2,6 (0,09)	30,7 (0,5)
		3	33,6		2,5		
Série 2	0S0G	1	35,0		3,5		
		2	43,3	37,4 (5,1)	3,8	3,5 (0,4)	–
		3	34,0		3,1		
	100S100G	1	33,4		2,4		
		2	36,5	35,6 (1,9)	2,5	2,7 (0,4)	–
		3	37,0		3,1		
Série 3	0S0G	1	34,0		3,6		
		2	42,0	36,9 (4,4)	3,4	3,5 (0,07)	–
		3	34,8		3,5		
	100S100G	1	31,5		2,6		
		2	35,0	33,3 (1,8)	2,5	2,6 (0,1)	–
		3	33,3		2,7		

21.2.2.2. Réponses des poutres testées

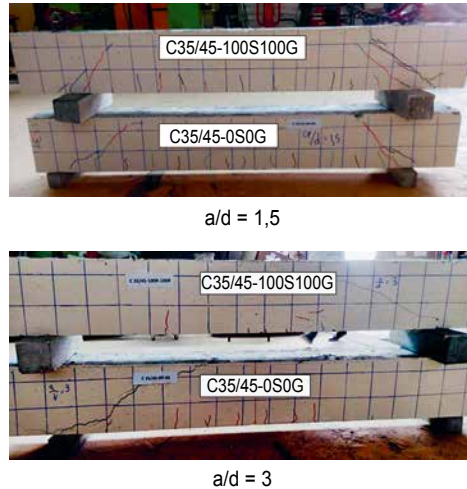
Pour toutes les poutres, les premières fissures, qui sont des fissures de flexion, sont apparues entre les deux points d'application de la charge, dans la zone inférieure tendue. La ruine s'est produite ensuite par l'apparition d'une fissure diagonale partant de l'un ou des deux appuis. Deux types de réponse ont été distingués en fonction du rapport a/d :

- $a/d = 3$: rupture fragile avec apparition brutale d'une grande fissure oblique,
- $a/d = 1,5$: après formation d'une fissure diagonale, la poutre continue à résister jusqu'à la rupture.

La fissuration et le mode de rupture à l'effort tranchant sont présentés Figure 21.2. Le comportement des poutres en béton de GBR et de granulats naturels a été pratiquement identique, tant au niveau de l'apparition des fissures que de leur propagation. Pour le rapport $a/d = 1,5$, le mode de rupture est de type compression-cisaillement. Pour $a/d = 3$, il est de type traction-diagonale.

Figure 21.2

Relevé des fissures sur les poutres testées

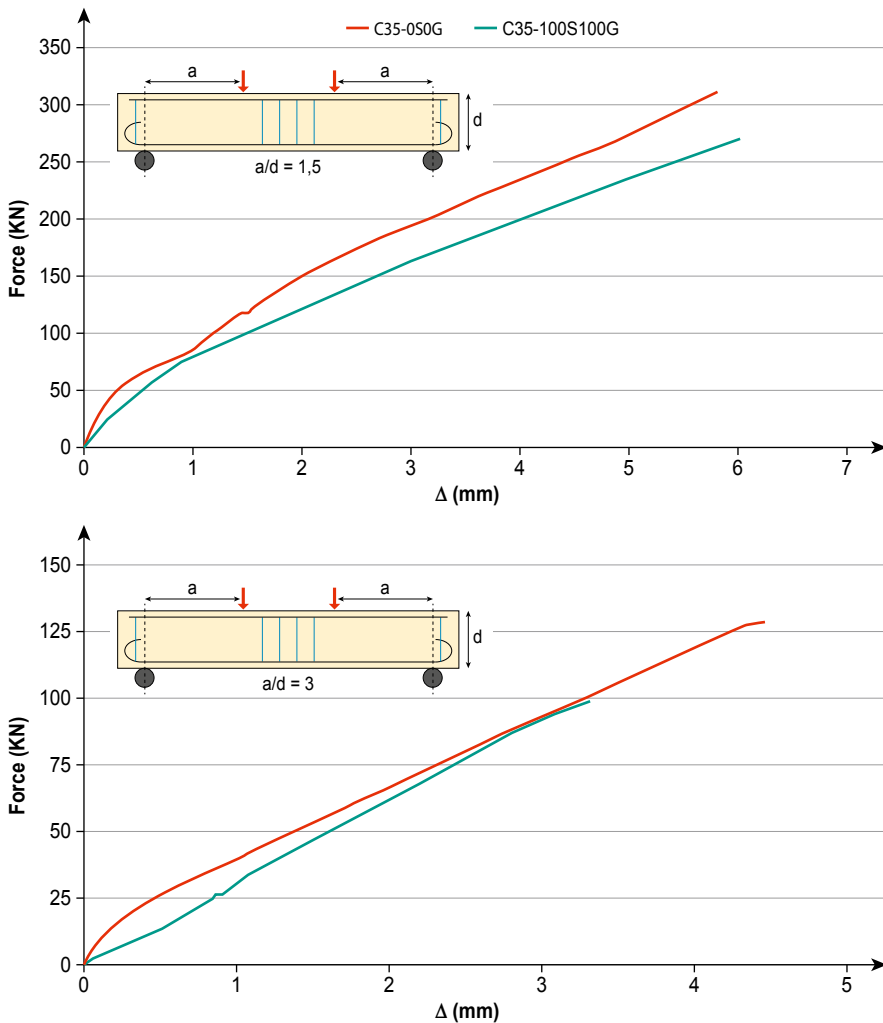


21.2.2.3. Courbe force-flèche

Les courbes force-flèche des différentes poutres sont reportées Figure 21.3 (une courbe moyenne par type de béton). Le comportement est linéaire avant l'apparition de la première fissure de flexion, avec une pente plus faible pour le béton de GBR, en raison de son module d'élasticité plus petit. Après l'apparition des fissures de flexion, la pente de la courbe change, tant pour le béton de granulats naturels que pour le béton de GBR. Pour le rapport $a/d = 3$, les fissures de flexion, qui sont principalement contrôlées par l'armature, sont prépondérantes et la pente de la courbe force-flèche des deux types de béton est confondue. Pour le rapport $a/d = 1,5$, les pentes sont différentes parce que le cisaillement a un poids relatif plus grand dans la flèche. Les pentes sont aussi reliées à la déformation en compression du béton, qui est plus importante pour le béton (et les poutres) de GBR.

Figure 21.3

Courbes Force-Flèche



21.2.2.4. Analyse de la surface de rupture

Les surfaces de rupture d'effort tranchant des poutres C35/45 0S0G et 100S100G, testées dans la configuration $a/d = 3$, ont été observées à l'œil nu et au microscope optique avec un agrandissement de 20 fois. À l'échelle macroscopique, on constate que la rupture dans les poutres en béton de granulats naturels se produit plutôt à l'interface entre les granulats et le mortier, alors qu'elle se produit plutôt au travers des granulats recyclés pour les poutres en béton de GBR. L'analyse montre également que la surface de rupture du béton de GBR est plus lisse que celle du béton de granulats naturels, révélant

ainsi que les phénomènes de pontage et de ramification ont une moindre contribution dans le transfert des contraintes entre les deux lèvres des fissures.

Les observations microscopiques ont montré que le réseau de fissures est plus dense pour les poutres en béton de GBR. Les fissures traversent les GBR alors qu'elles restent localisées dans la pâte pour les bétons de granulats naturels. Les largeurs de fissures sont plus grandes pour le béton de GBR que pour le béton de granulats naturels. Aucun décollement à l'interface entre le nouveau mortier et les GBR n'a été observé.

21.3. Analyse de la résistance ultime

21.3.1. Cas de la présente étude

L'effort ultime F_{exp} et la résistance au cisaillement correspondante V_{exp} , mesurés au cours des essais, sont portés dans le Tableau 21.2. Pour les poutres en béton de granulats naturels et en configuration $a/d = 1,5$, la capacité maximale de 300 kN du banc d'essai n'a pas été suffisante pour atteindre la rupture par effort tranchant ; la force de cisaillement ultime dépasse donc 150 kN.

La contrainte expérimentale ultime de cisaillement a été calculée selon l'équation suivante :

$$v_{exp} = \frac{V_{u,exp}}{b_w d} \quad (21.1)$$

Par ailleurs, afin d'avoir des valeurs comparables corrigées selon les fluctuations de f_{cm} , la contrainte, n_{exp} est divisée par la racine carrée de la résistance à la compression moyenne f_{cm} , soit $v_{exp}/\sqrt{f_{cm}}$. La proportionnalité à $\sqrt{f_{cm}}$ sert également à prédire la résistance V_{Rc} dans la formule de [Rafla, 1971 ; Kordina et Blume, 1985].

Pour la configuration $a/d = 3$ et pour la même résistance à la compression, la résistance au cisaillement ultime $V_{u,exp}$ des poutres en béton de GBR est inférieure de 17 % à celle des poutres en béton de granulats naturels ; pour $a/d = 1,5$ la diminution relative dépasse 49 %. Par ailleurs, le rapport $v_{exp}/\sqrt{f_{cm}}$ reste supérieur à 0,17, valeur minimale recommandée par la norme américaine [ACI 318-11, 2011].

Pour $a/d = 3$, la charge de fissuration V_{cr} et la charge ultime $V_{u,exp}$ sont identiques. Elles sont proportionnelles à la résistance à la traction du béton, que la fissure critique soit initiée par une fissure de flexion ou qu'elle résulte directement de l'effort tranchant. De même, la diminution relative de $V_{u,exp}$ du béton de GBR par rapport au béton de granulats naturels (- 17 %) est comparable à la diminution de la résistance à la traction $f_{ctm,sp}$ (- 18 %).

Pour $a/d = 1,5$, la diminution relative de la force de cisaillement pour le béton de GBR (-49%) a deux origines. L'une est reliée à la charge de fissuration V_{cr} (-17%), l'autre à la charge allant de V_{cr} jusqu'à la charge ultime $V_{u,exp}$ (plus de 40%). Cette dernière agrège les mécanismes suivants : i) engrenement des granulats le long de la fissure critique ; ii) effet goujon de l'armature en flexion ; iii) résistance en cisaillement-compression de la zone en flexion comprimée. L'effet ultime de l'engrenement peut être estimé avec les formules de l'Eurocode 2 dédiées au cisaillement le long des joints de construction [EN-1992-1-1, § 6.2.5, 2004]. Le terme de cohésion est proportionnel à la résistance à la traction f_{ctm} (soit une baisse d'environ 15% entre béton de granulats naturels et béton de GBR). Le terme de frottement est proportionnel au coefficient de frottement (μ avec un coefficient de sécurité ; $\tan\varphi$ sans coefficient de sécurité) ; il varie en fonction de la rugosité de la surface. On peut supposer que la surface de la fracture est rugueuse pour le béton de granulats naturels ($\mu = 0,7$; $\tan\varphi \approx 1$), lisse pour le béton de GBR ($\mu = 0,6$; $\tan\varphi \approx 0,8$; diminution effective de $\tan\varphi$ de 20%), voire très lisse ($\mu = 0,5$; $\tan\varphi \approx 0,6$; diminution de 40%) ; cette dernière hypothèse semble être la plus vraisemblable pour expliquer la diminution de $V_{u,exp} - V_{cr}$.

Tableau 21.2

Résultats expérimentaux des essais de flexion 4 points (rupture par effort tranchant)

Béton (C35) Rapport a/d	Poutre	Force de rupture F_{exp} (KN)	Moyenne F_{moy} (écart type)	$V_{u,exp} = \frac{F_{exp}}{2}$	$v_{exp} = \frac{V_{u,exp}}{b_w d}$ (MPa)	$\frac{v_{exp}}{\sqrt{f_{ctm}}}$	Moyenne
0S0G a/d = 1,5	1						
	2		> 300	> 150	> 3,33	0,55	> 0,55
	3						
0S0G a/d = 3	1	127		63,6	1,41	0,24	
	2	121	123 (3)	60,6	1,35	0,23	0,23
	3	120		60,0	1,33	0,23	
100S100G a/d = 1,5	1	150		75,0	1,67	0,27	
	2	160	153 (5)	80,0	1,78	0,29	0,28
	3	150		75,0	1,67	0,27	
100S100G a/d = 3	1	100		50,2	1,12	0,19	
	2	98	99 (-)	49,0	1,09	0,19	0,19
	3	-		-	-	-	

21.3.3. Résultats d'autres essais

Tous les travaux expérimentaux recensés utilisent des poutres rectangulaires.

[Gonzales-Fonteboa *et al.*, 2007] ont fait des essais sur des poutres avec ou sans cadres, une armature longitudinale constante et une travée relative de cisaillement $a/d = 3,3$. Un béton de résistance moyenne $f_{cm} = 40$ MPa a été utilisé, à base de granulats naturels ou de GBR, avec un taux de GBR de 25 % environ (gravillons uniquement). La résistance à la compression f_{cm} a varié légèrement ; la résistance à la traction f_{ctm} n'a apparemment pas varié avec le teneur en GBR pour une même f_{cm} . Pour les poutres sans cadres, la présence des GBR ne semble pas avoir d'influence sur la résistance au cisaillement V_{Rc} ; la rupture est fragile.

[Etxeberria *et al.*, 2007] ont fait des essais sur des poutres avec ou sans cadres, une armature longitudinale constante et une travée relative de cisaillement a/d un peu inférieure à 3,3. Un béton de résistance moyenne $f_{cm} = 41$ MPa a été utilisé, à base soit de granulats naturels, soit de GBR à raison d'une substitution variant de 14 % à 62 % (gravillons uniquement). La résistance à la compression f_{cm} a légèrement varié ; pour la même f_{cm} , la résistance à la traction f_{ctm} a augmenté avec la teneur en GBR, jusqu'à 22 %. Néanmoins, pour les poutres sans cadres, la résistance à l'effort tranchant V_{Rc} a diminué jusqu'à 14 %. La rupture est plutôt fragile.

[Schubert *et al.*, 2012] ont fait des essais sur des poutres sans cadres, une armature longitudinale constante et une travée relative de cisaillement $a/d = 3,5$. Un béton de résistance moyenne $f_{cm} = 36$ MPa a été utilisé, à base soit de granulats naturels, soit de GBR (100 %, gravillons + sable). La résistance f_{cm} a légèrement variée ; pour la même f_{cm} , la résistance à la traction f_{ctm} a augmenté en présence des GBR, tandis que la résistance au cisaillement V_{Rc} à légèrement baissée, avec une rupture fragile.

[Fathifazi *et al.*, 2011] ont fait des essais sur des poutres sans cadres, des armatures longitudinales variables, une hauteur variable et une travée relative de cisaillement a/d variable entre 1,5 et 4. Le béton était soit à base de granulats naturels, soit à base de GBR avec un taux de substitution de 41 % ou de 47 % (gravillons uniquement). Deux types de gravillons ont été utilisés (calcaires concassés ou gravillons de rivière), de même origine pour les deux natures de granulats (GN et GBR). La résistance à la compression f_{cm} était significativement différente entre béton de GBR (moyenne de 45 MPa) et bétons de granulats naturels (moyenne 36 MPa) ; pour la même f_{cm} , la résistance à la traction f_{ctm} du béton de GBR était d'environ 10 % inférieure à celle du béton de granulats naturels. La résistance au cisaillement V_{Rc} était identique pour le béton de GBR et le béton à base de calcaire concassé, et significativement plus faible (environ 30 %) pour le béton à base de gravillons de rivière. Probablement que les deux modes de ruine, fragile ou non fragiles, étaient impliqués.

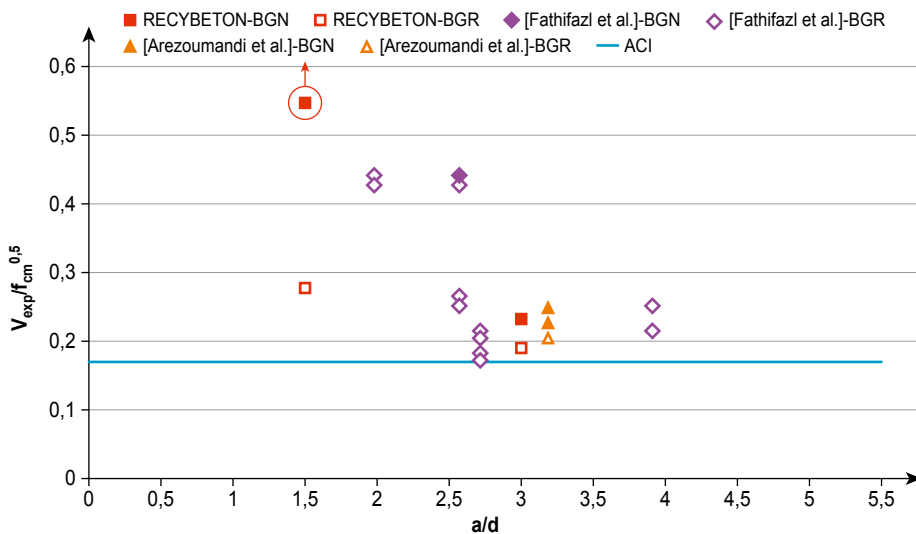
[Yun *et al.*, 2011] ont fait des essais sur des poutres sans cadres, une armature longitudinale constante et une travée relative de cisaillement $a/d = 5,1$. Un béton de résistance moyenne $f_{cm} = 33$ MPa a été utilisé, à base de granulats

naturels ou de GBR avec un taux de substitution variant entre 15 % et 52 % (gravillons uniquement). La résistance à la compression f_{cm} était sensiblement variable ; pour la même f_{cm} , la résistance à la traction f_{ctm} a augmenté avec la teneur en GBR. La ruine était fragile.

[Arezoumandi *et al.*, 2014] ont fait des essais sur des poutres sans cadres, une armature longitudinale variable et une travée relative de cisaillement a/d d'environ 3. Un béton de résistance moyenne $f_{cm} = 34$ MPa a été utilisé, à base de granulats naturels ou de GBR, avec un taux de substitution de 52 % (gravillons uniquement). La résistance à la compression f_{cm} était légèrement variable ; pour une même f_{cm} , la résistance à la traction f_{ctm} a diminué avec la présence des GBR. Selon la quantité d'armatures en flexion (ratio ρ_l), la ruine est fragile, avec une légère diminution de V_{Rc} pour les bétons de GBR, ou non fragile avec une baisse beaucoup plus importante de V_{Rc} .

Figure 21.4

Comparaison entre les résultats de cette étude et d'autres auteurs [Arezoumandi *et al.*, 2014 ; Fathifazl *et al.*, 2011] pour les bétons de granulats naturels (BNG) et les bétons de GBR (BGR)



21.3.4. Synthèse

Concernant la résistance au cisaillement V_{Rc} , ces résultats confirment qu'il est nécessaire de dissocier rupture fragile ou rupture non fragile, comme le montrent clairement les résultats des essais décrits au § 21.3.1. Cependant, il est difficile de faire une synthèse probante permettant de quantifier la différence

de résistance à l'effort tranchant observée entre bétons de GBR et bétons de granulats naturels, pour plusieurs raisons :

- 1) les résultats présentent une grande dispersion (sur f_{cm} , f_{ctm} , V_{RC}),
- 2) le mode de rupture doit être déterminé (fragile ou non fragile),
- 3) dans certains travaux, il n'est pas possible de comparer directement le béton de GBR et le béton de GN car plusieurs paramètres ont varié en même temps. Dans ce cas, la comparaison a été faite *via* une valeur approchée de V_{RC} , calculée à l'aide de la formule de [Rafla, 1971 ; Kordina et Blume, 1985], qui inclut tous les paramètres influents :

$$V_{RC} = 0,54 f_{cm}^2 \rho_l^3 d^{-1/4} k_a b_w d \quad (21.2)$$

avec :

- b_w et d les dimensions de la section transversale en mm,
- f_{cm} la résistance à la compression moyenne exprimée en MPa,
- ρ_l le ratio d'armatures longitudinales en %,
- d , exprimé en cm dans le terme $d^{-1/4}$, décrit l'effet de taille,
- k_a est un facteur sans unité, exprimé comme suit :

$$- k_a = 6 - 2,2 \frac{a}{d} \text{ pour } \frac{a}{d} < 2 ;$$

$$- k_a = 0,795 + 0,293 \left(3,5 - \frac{a}{d} \right)^{2,5} \text{ pour } 2 < \frac{a}{d} < 3,5$$

$$- k_a = 0,9 - 0,03 \frac{a}{d} \text{ pour } \frac{a}{d} > 3,5.$$

Les ratios $V_{RC}(\text{essai})/V_{RC}(\text{calcul})$ pour les bétons de GBR et de granulats naturels ont ensuite été comparés.

Une corrélation a alors été cherchée entre le rapport des résistances au cisaillement $S = V_{RC}(\text{béton de GBR})/V_{RC}(\text{béton de GN})$ et le rapport des résistances à la traction $T = f_{ctm}(\text{béton de GBR})/f_{ctm}(\text{béton de GN})$ pour la même résistance à la compression f_{cm} . T inclut implicitement l'effet du taux Γ de GBR, en supposant qu'une corrélation entre f_{ctm} et Γ est donnée par ailleurs.

Dans ces calculs, les résultats individuels ou la moyenne des résultats de plusieurs essais identiques ont été pondérés comme suit : pondération 1 si la comparaison entre béton de GBR et béton de granulats naturels était directe, avec des paramètres d'essai identiques ; pondération $\frac{3}{4}$ pour une comparaison indirecte fiable ; pondération $\frac{1}{2}$ pour une comparaison indirecte peu fiable. Malgré ce traitement, la dispersion est restée élevée, en raison notamment de l'incertitude sur le mode de rupture (fragile ou non fragile). En outre, la plage de variation des valeurs expérimentales de S et T était petite. Il n'a donc pas été possible de trouver une corrélation franche entre S et T , de type régression linéaire par exemple. Les conclusions avancées ici ne sont alors basées que sur des valeurs moyennes globales :

- 1) Rupture fragile (tension diagonale), $T_{\text{moyen}} \approx 1$, $S_{\text{moyen}} \approx 0,95$. Légère diminution de V_{Rc} pour le béton de GBR, même si l'on admet que la résistance à la traction du béton de GBR n'est pas affectée. Les résultats fiables de Cergy (trois essais identiques avec les mêmes paramètres expérimentaux), confirmés par d'autres résultats issus de la littérature, permettent de conclure sur la proportionnalité entre S et T.
- 2) Rupture non fragile (compression-cisaillement), $T_{\text{moyen}} \approx 0,9$, $S_{\text{moyen}} \approx 0,8$, soit $S \approx T^2$.

21.3.5. Analogie avec les bétons de granulats légers

L'analyse du comportement à l'effort tranchant du béton de GBR, par rapport au béton de granulats naturels, peut être avantageusement conduite par analogie entre béton de GBR et béton de granulats légers. En effet, ce dernier présente aussi une diminution de la résistance à la traction par rapport au béton de granulats naturels, pour une même résistance à la compression f_{cm} , attribuée aux fissures qui traversent les granulats. En fonction de la masse volumique ρ du béton, le chapitre 11 de l'EC2 donne un facteur de réduction $\eta_1 = 0,4 + 0,6 \frac{\rho}{2\,200}$

pour la résistance à la traction du béton (relation 11.1), en supposant une densité $\rho = 2\,200 \text{ kg/m}^3$ pour le béton de granulats naturels. Dans la relation (11.6.2), l'EC2 donne deux coefficients de réduction de la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton de granulats légers sans cadres et sans charge axiale, par rapport au béton de GN. Un coefficient η_V est appliqué à V_{Rc} , un autre ($\eta_{V,\min}$) à $V_{Rc,\min}$ (voir aussi § 4), avec $\eta_V = \left(\frac{0,15}{0,18}\right) \eta_1 = 0,833 \eta_1$ et $\eta_{V,\min} = \left(\frac{0,03}{0,05}\right) \approx 0,86$.

Il est utile de rappeler que v_{\min} est reliée à la formation de la fissure critique d'effort tranchant (c'est-à-dire V_{cr}), tandis que V_{Rc} correspond au mécanisme complet, avec engrenement des granulats, etc. En prenant l'exemple d'un béton de granulats légers de masse volumique $\rho = 1\,800 \text{ kg/m}^3$ (classe LC 1,8 de l'EC2), on trouve : $\eta_1 = 0,89$, $\eta_{V,\min} = 0,86$, c'est-à-dire un peu moins que η_1 ; $\eta_V = 0,74$, c'est-à-dire un peu moins que η_1^2 .

21.4. Comparaison avec les prévisions de l'EC2 pour VRC

L'effort théorique de cisaillement donné par l'EC2 [EN-1992-1-1, 2004] a été calculé pour toutes les poutres à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \right] b_w d \quad (21.3)$$

avec pour minimum :

$$V_{Rd,c} = [0,035k^{3/2}f_{ck}^{1/2}]b_w d \quad (21.4)$$

où :

- $C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$, avec $\gamma_c = 1,5$ dans la plupart des cas ;
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$, avec d en mm ;
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w} d$, A_{sl} est la surface de l'armature en tension, b_w et d sont la largeur et la hauteur effective de la section, respectivement ;
- f_{ck} la résistance caractéristique à la compression du béton sur cylindre à 28 jours en MPa (pour les essais : $f_{ck} = f_{cm}$ mesurée – 8 MPa ; seules les valeurs moyennes des bétons de GBR ou de granulats naturels ont été considérées ici).

Les résultats sont donnés dans le Tableau 21.3 (repère colonne A) ; comme attendu, la marge de sécurité des valeurs expérimentales est plus faible pour le béton de GBR, par rapport au béton de granulats naturels, indépendamment du rapport a/d. L'équation (21.3) a également été appliquée sans sécurité $f_{ck} = f_{cm}$ et $\gamma_c = 1$ (repère colonne B). Dans ce cas, $V_{Rd,c}$ est inférieur à $V_{u,exp}$ pour a/d = 1,5, et supérieur à $V_{u,exp}$ pour a/d = 3. Mais pour a/d = 1,5, l'EC2 considère une valeur réduite de la force appliquée, équivalente à une valeur augmentée de la résistance.

Tableau 21.3

Prévisions de l'EC2 pour l'effort tranchant ultime selon (21.3), comparée aux valeurs des essais (KN)

Béton (C35)	f_{cm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	a/d	$V_{u,exp}$	(A) $V_{Rd,c}$	(B) $V_{Rd,c}$
0S0G	37,3	29,3	1,5	> 150	39,2	63,7
			3	61,4		
100S100G	34,5	26,5	1,5	76,7	37,9	64,1
			3	49,6		

21.5. Autres considérations pour le calcul de la résistance à l'effort tranchant

21.5.1. Terme VRs pour l'armature transversale

Comme on pouvait le prévoir, les résultats des essais tirés de la littérature ne mettent pas en défaut l'applicabilité du modèle du treillis. Le calcul de la

résistance à l'effort tranchant impliquant l'armature transversale V_{Rs} demeure alors inchangé. La seule question qui peut se poser est celle de la valeur minimale de l'angle θ des bielles de compression. Mais il y a trop peu de résultats expérimentaux pour pouvoir analyser ce point.

21.5.2. Résistance limite des bielles en béton

La résistance réduite à la compression du béton, $v_1 f_{cd}$, introduite dans l'EC2 pour le calcul de l'effort limite d'effort tranchant $V_{Rd,max}$, résulte du comportement des bielles en béton, qui sont soumises aux forces de compression longitudinale et de traction transversale. Comme la résistance à la traction f_{ctm} du béton de GBR est probablement inférieure à celle du béton de granulats naturels, il est logique de supposer que le facteur de réduction v_1 sera aussi minoré pour le béton de GBR. En l'absence de résultats expérimentaux, l'analogie avec le béton de granulats légers peut-être être considérée en première approximation ; dans le chapitre 11 de l'EC2, v_1 est multipliée par η_1 (qui est proportionnel à f_{ctm}).

21.6. Conclusion

Des poutres en béton de granulats naturels et en béton de GBR (substitution de 100 % du sable et des gravillons), sans cadres, ont été testées à l'effort tranchant jusqu'à la rupture. Compte tenu des résultats de cette étude, et d'autres résultats tirés de la littérature, les conclusions suivantes peuvent être formulées :

- au niveau de la morphologie de la rupture et de la propagation des fissures, le comportement des poutres en béton de GBR et en béton de granulats naturels est identique ;
- les GBR peuvent diminuer la résistance à l'effort tranchant des poutres, par rapport aux poutres en béton de granulats naturels, conséquence d'une possible réduction de la résistance à la traction du béton. L'ampleur de la réduction varie avec le type de rupture (fragile ou non fragile) et selon la configuration de la sollicitation (rapport a/d), et d'autres paramètres. Si la rupture est fragile, la diminution est proportionnelle à la diminution de la résistance à la traction ; si la rupture est non fragile, l'ordre de grandeur de la diminution est égal au carré du facteur précédent ;
- l'EC2 permet de prédire la résistance à l'effort tranchant des poutres testées ici, en tenant compte d'une marge de sécurité réduite pour le béton de GBR, par rapport au béton de granulats naturels ;
- dans les poutres en béton de granulats naturels, la rupture à l'effort tranchant est due au détachement des granulats naturels, alors qu'elle se produit par la rupture des granulats recyclés dans les poutres en béton de GBR. Les conséquences des différences de résistance à la traction et à l'effort tranchant des bétons de GBR, par rapport aux bétons de granulats naturels, peuvent être comparées à celles des bétons de granulats légers.

Partie VII.

Chantiers expérimentaux

*Patrick Dantec*¹

La réalisation de chantiers expérimentaux dans différents secteurs de la construction avait pour but de prouver la faisabilité opérationnelle de l'incorporation de granulats de béton recyclé (GBR) dans le béton. Ils ont consisté en la réalisation d'un dallage pour parking (chapitre 22), de parties d'un pont pour piste cyclable (chapitre 23), d'un bâtiment d'archives (chapitre 24), de murs et de trottoirs en milieu urbain (chapitre 25), d'une dalle intérieure d'un bâtiment à usage de bureaux (chapitre 26), et de produits préfabriqués en béton (chapitre 27).

Dans chacun des cas, l'effet de la substitution partielle ou totale des granulats naturels par des GBR (sables et gravillons) sur les propriétés de différents bétons manufacturés a été décrit et étudié, ainsi que les méthodes de production des GBR, de fabrication et de mise en œuvre des bétons. Le contrôle de la qualité des GBR en rapport avec la qualité de leurs composants, de leur granularité et à de leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques, a été effectué selon les normes d'essais en vigueur et en suivant les seuils d'acceptabilité des spécifications en cours. L'impact des GBR a été mesuré sur la résistance, mais aussi sur le retrait et le module d'élasticité lorsque cela était requis pour le dimensionnement structurel. Les propriétés de transfert ont été également étudiées, conformément aux critères habituels de la durabilité. Des inspections visuelles en fin de construction et, lorsque cela était possible, à un âge plus avancé, ont été effectuées afin d'évaluer l'effet éventuel des GBR sur la qualité de l'exécution, en particulier au niveau des parements et des surfaces.

Un autre chapitre (chapitre 28) est consacré aux dispositions applicables en matière de contrôle de la qualité des matériaux et d'exécution des bâtiments et des ouvrages d'art, au niveau mondial et en France plus particulièrement. Les

1. Ingénieur Consultant, Courmon d'Auvergne.

normes dédiées sont listées, ainsi qu'un certain nombre d'exemples appliqués aux cas des chantiers expérimentaux RECYBETON.

Enfin, il convient de rappeler que 7 ans avant le démarrage du Projet National RECYBETON, un ouvrage a été réalisé à Paris où plusieurs milliers de mètres cubes de béton de GBR à un taux de substitution élevé ont été coulés. Les aspects correspondants ont été traités dans le chapitre 16 « Développement, production et contrôle des bétons recyclés à taux élevé de substitution ».

Chapitre 22.

Dallage sur terre-plein : Chaponost

F. de Larrard¹, E. Garcia¹, T. Dao¹, C. De Sa²,
F. Benboudjema², D. Rogat³

Résumé – Ce chapitre est dédié au premier chantier expérimental réalisé en France sur le recyclage du béton dans le béton, dans le cadre du Projet National RECYBETON. Il concerne un dallage de parking de 2 000 m² subdivisé en six secteurs réalisés chacun avec une formule de béton différente. Tous les bétons respectaient les mêmes spécifications, mis à part le taux de substitution de granulats de béton recyclé (GBR), qui a varié de 0 à 100 % (sables et/ou gravillons). Une campagne préliminaire de caractérisation des six formules a porté sur les propriétés du béton frais et durci (résistance, module d'élasticité, retrait). Les tendances habituellement observées pour les taux élevés de substitution – i.e. augmentation du dosage en ciment, diminution du module d'élasticité et augmentation du retrait – ont été retrouvées.

Une modélisation par éléments finis du dallage a été réalisée, sur la base des propriétés mesurées sur les bétons, complétées par des données issues de la littérature et des résultats expérimentaux fournis par les laboratoires partenaires du Projet National RECYBETON. L'objectif était de prévoir la fissuration pouvant résulter de la combinaison des effets thermiques et hydriques. Les simulations n'ont prédit l'apparition d'aucune fissure, excepté au droit des joints de dalles et dans le béton « tout recyclé » soumis en laboratoire à l'essai de fissuration à l'anneau. Le chantier s'est déroulé sans difficultés particulières et, lors de la mise en œuvre, les compagnons n'ont signalé aucune différence entre les bétons. De même, aucune fissure n'est apparue, hormis celle au droit des joints réglementaires sciés tous les 5 mètres, comme prévu par les simulations. Ce chantier expérimental a permis de constater que la fabrication et le coulage d'un béton de GBR ne nécessitaient pas de changer significativement les pratiques habituelles. Concernant le risque de fissuration lié au retrait, il n'est accru qu'en cas d'une substitution à des taux très élevés. Ainsi, même dans un contexte difficile (dallage sur terre-plein réalisé en hiver, d'épaisseur modérée), il a été montré

1. LafargeHolcim R&D, St Quentin-Fallavier.

2. Laboratoire de Mécanique et Technologie/École Normale Supérieure/CNRS/Université Paris-Saclay, Cachan.

3. Sigma Bétons, l'Isle d'Abeau.

qu'il est possible d'utiliser un béton entièrement recyclé sans risque de fissuration, avec toutefois une quantité de ciment plus importante. Pour mieux appréhender ce risque, il serait nécessaire d'obtenir davantage de données de fluage, et de procéder à d'autres simulations numériques. Trois ans après la réalisation du projet, quelques dalles supplémentaires ont été coulées avec un béton incorporant un ciment recyclé (i.e. un ciment où 15 % des matières premières constituant le cru cimentier ont été substituées par du sable de GBR, cf. chapitre 4). Là encore, aucunes différences en termes de propriétés à l'état frais et durci, ni de comportement pendant et après le coulage n'ont été observées, comparativement à un béton témoin fabriqué parallèlement avec un ciment Portland ordinaire.

22.1. Introduction

Le chantier, situé à Chaponost (banlieue Sud de Lyon, Rhône) est le premier à avoir été réalisé dans le cadre du Projet National RECYBETON. L'objectif était de produire des bétons à base de granulats de béton recyclé (GBR) en environnement industriel (dans une centrale de BPE située à proximité de Lyon) et de réaliser les tâches habituelles en matière de fabrication, de transport et de coulage. Une parcelle de 2 000 m² a été affectée à la construction d'un parking. Les questions posées par cette expérimentation étaient les suivantes :

- pour un tel ouvrage, est-il nécessaire de modifier les pratiques habituelles, du dimensionnement à la réalisation, lorsque, dans le béton, une part des granulats naturels est substituée par des GBR ?
- si oui, où se situe la limite entre béton modérément recyclé (où les pratiques habituelles peuvent être conservées) et béton fortement recyclé, se comportant comme un matériau particulier ?
- sachant qu'un béton de GBR présente généralement un retrait plus élevé qu'un béton de granulats naturels de même catégorie, présente-t-il alors un risque plus élevé de fissuration ?

Pour répondre à ces questions, une équipe s'est constituée au sein du Projet National RECYBETON, comprenant l'entreprise ELTS propriétaire du parking assurant elle-même la mise en œuvre, Fillot Eurovia pour la fourniture des GBR, LafargeHolcim (anciennement Groupe Lafarge) pour la mise au point des formules et la livraison des bétons sur chantier, le CEREMA chargé par le client du contrôle qualité, Sigma Béton pour la campagne de caractérisation des mélanges et le LMT ENS Cachan pour la modélisation et la prédiction du risque de fissuration.

22.2. Le projet Chaponost

22.2.1. Genèse

ELTS est une entreprise spécialisée dans les ouvrages souterrains. Pour le stationnement d'une partie de sa flotte de camions et d'engins, elle a décidé de construire un parking périphérique à son nouveau bâtiment. Agissant à la fois en tant que maître d'ouvrage (privé) et entreprise, ELTS pouvait réaliser un tel projet sans risque de contentieux, puisqu'il n'y avait pas de marché contractualisant les normes actuelles. Comme cette société était convaincue de l'intérêt de la technologie du béton recyclé, en termes d'économie et d'environnement, elle prit le risque de réaliser un ouvrage où certains bétons pouvaient contenir jusqu'à 100 % de GBR. Fillot est une entreprise de recyclage bien établie en région lyonnaise. Elle tenait à démontrer la possibilité d'utiliser son produit non seulement dans les marchés traditionnels, en sous-couches routières, mais aussi dans des applications à plus forte valeur ajoutée, comme le béton prêt à l'emploi. Le groupe LafargeHolcim est mobilisé depuis longtemps dans la problématique du recyclage des bétons. Le chantier de Chaponost fut alors une occasion unique de démontrer sa capacité à produire un béton ayant un taux de GBR allant bien au-delà des limites autorisées par les normes en vigueur. ELTS demanda à son consultant local de prendre en charge le dimensionnement du dallage. En considérant un béton de 25 MPa, les calculs ont conduit à une dalle de 18 cm d'épaisseur, divisée en panneaux de 5 × 5 m sciés en périphérie sur un tiers de leur épaisseur.

22.2.2. Formulation et propriétés

Les granulats de béton recyclé (GBR) provenaient d'un lot unique préparé par Fillot pour le projet Chaponost. Leur caractérisation complète a été réalisée selon les essais requis par l'EN 206-1 [de Larrard *et al.*, 2014]. Le sable affichait une absorption d'eau de 9,4 % (selon [NF EN 1097-6, 2014]) répondant ainsi aux exigences de la norme béton. Quant au gravillon, il était classé Rcu₉₅ (i.e. avec un taux total de granulats naturels et de bétons recyclés de 98 %), mais en raison de sa teneur en bitume de 1,3 % (qui lui conférait le label Ra_{10.}), sa catégorie finale était alors de type 3, selon la norme [NF EN 206/CN, 2014].

Tableau 22.1

Spécifications du béton

Type de béton (selon [NF EN 206/CN, 2014])	Affaissement entre T ₀ et T ₀ +1 h 30 (mm)	Résistance minimale en compression (MPa)	Dosage minimum en liant équivalent (kg/m ³)	Rapport eau/liant équivalent maximum	Volume d'air entraîné (%)	Taux de GBR (%)
C25/30 XF2 D ₂₀ S4	150 ≤ A ≤ 230	25	300	0,55	≥ 4	0-100 %

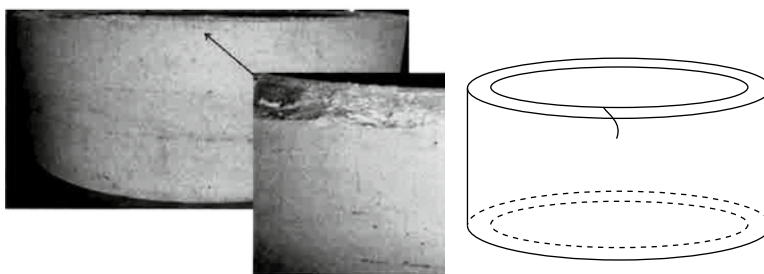
Tous les bétons devaient répondre aux mêmes spécifications, détaillées dans le Tableau 22.1, qui se réfèrent à l'EN 206-1. Ils devaient présenter une teneur minimale en air entraîné de 4 %.

Quant au taux de substitution, bien que la norme n'autorise aucun matériau recyclé pour ce type d'environnement (XF2), les taux de sable et de gravillons de GBR ont été fixés à 0 %, 30 % et 100 %. Les formules ont été ajustées afin d'avoir des valeurs comparables d'affaissement et de résistance à la compression à 28 jours. En raison de la plus faible compacité des GBR (comparativement aux granulats naturels), la quantité d'eau efficace a augmenté avec le taux de substitution. Afin de garder le rapport eau/liant inférieur à la valeur maximale spécifiée, la quantité de ciment a alors été aussi augmentée (uniquement dans les mélanges contenant 100 % de sable et/ou de gravillons de GBR). Quant au maintien dans le temps de l'affaissement, il a fallu ajouter un retardateur dans les mélanges recyclés, même si les granulats avaient été préalablement saturés. En effet, il s'avère que les fines de GBR peuvent perturber le système ciment/superplastifiant (voir chapitre 7 de ce livre). Les formules de béton et leurs propriétés sont données dans le Tableau 22.2, y compris les propriétés mesurées sur chantier.

Bien que la dose d'entraîneur d'air ait été faible, la présence du sable de GBR a provoqué une augmentation de la teneur en air, supérieure à celle prévue. Mais ce phénomène n'a pas affecté la résistance à la compression, puisqu'elle a toujours dépassé la valeur spécifiée de 25 MPa. Le mélange 0S100G présentait une résistance plus élevée, en raison d'une teneur en air plus faible que les autres.

Figure 22.1

Fissuration de l'échantillon 100S100G dans l'essai à l'anneau



Toutes les mesures sur les bétons durcissant et durcis ont été réalisées sur des échantillons prélevés à la centrale de BPE et traités au laboratoire Sigma Béton. La sensibilité au retrait plastique a été évaluée par l'essai « Krai test » (ASTM C 1579). Il semble que les bétons à base de GBR soient plus enclins à ce problème. Toutefois, compte tenu de la saison, ce retrait n'a pas eu de conséquences visibles sur le parking (voir § 22.2.3). Le retrait total, mesuré sur éprouvettes $7 \times 7 \times 28$ cm, a été fortement influencé par le taux de substitution,

Tableau 22.2

Composition et propriétés des bétons. XSYG : X % de sable de GBR, Y % de gravillon de GBR

Constituants (kg/m ³)\Formules	REF	30S0G	0S30G	30S30G	0S100G	100S100G
Gravillon naturel 11/22	720	752	509	506	0	0
Gravillon naturel 4/11	286	174	139	139	0	0
Sable naturel 0/4	790	541	789	506	772	0
Gravillon de GBR 4/20	0	0	282	280	778	725
Sable de GBR 0/4	0	235	0	234	0	654
Ciment CEM II (ciment composé au calcaire)	302	306	305	308	346	390
Plastifiant	2,57	3,65	2,6	2,62	2,94	3,32
Retardateur	0	1,54	0,88	1,54	1,04	1,95
Agent entraîneur d'air	0,91	0,46	0,76	0,61	0,35	0,4
Eau	173	188	178	192	205	260
e/c (rapport eau efficace/ciment)	0,52	0,54	0,53	0,54	0,54	0,53
Affaissement (mm)	200	200	200	200	190	190
Air (% , à la centrale)	7,2	8,5	7,6	7,6	5,5	9
Air (% , au laboratoire)	5,8	7,3	6	7	3,5	6
Krai test (ASTM C 1579, %)	n.d.	238	75	181	200	274
Retrait de 0 à 24 h (10 ⁻⁶)	1 580	2 420	2 130	2 280	3 200	3 090
Résistance à la compression à 1 jour (MPa)	7,2	7,8	6,7	6,7	10,8	13,6
Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	22,7	25	25,6	22,2	33,1	25,6
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	31,1	31,3	32,1	29,1	40,1	33,3
Résistance au fendage à 28 jours (MPa)	2,8	3,2	2,9	2,8	3,3	3,2
Retrait de 1 à 90 jours (10 ⁻⁶)	397	430	469	492	545	838
Module d'élasticité à 28 jours (GPa)	30	28	28	23	25	21
Test du retrait à l'anneau (procédure spécifique) ; fissures ?	NON	NON	NON	NON	NON	OUI

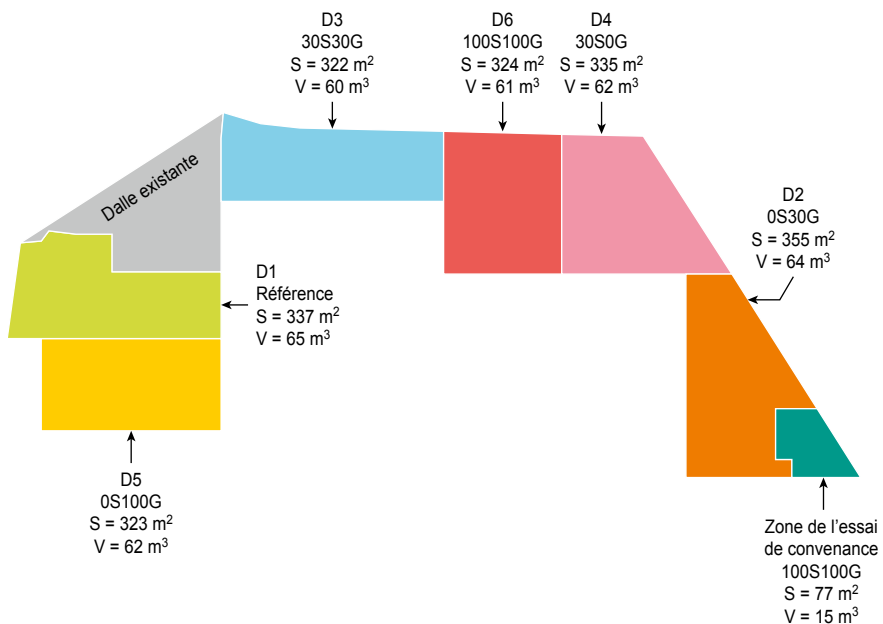
de même que le module d'élasticité, mais en sens opposé. Par rapport au béton de référence, le retrait du béton entièrement recyclé a doublé, alors que son module d'élasticité a diminué d'environ un tiers (comparaisons des données de retrait et de module à 90 jours, entre les formules REF et 100S100G). Un essai de fissuration à l'anneau a été effectué sur tous les mélanges (voir Figure 22.1) selon un protocole spécifique. Seul le mélange entièrement recyclé a montré une fissure, apparue à quatre jours.

22.2.3. Déroulement de la préparation et de la réalisation du parking

La Figure 22.2 montre la configuration générale du parking. Une petite zone sur le côté droit a été coulée tout d'abord avec le béton 100S100G, pour vérifier son aptitude à une mise en œuvre conventionnelle. Les six secteurs ont ensuite été coulés durant la même semaine, en décembre 2013. Le temps était froid et brumeux. Durant le coulage du secteur D6, une légère averse est tombée sur le chantier.

Figure 22.2

Le parking de Chaponost [de Larrard *et al.*, 2014]



Aucune remarque particulière n'a été faite durant la fabrication du béton, qui s'est déroulée classiquement, quel que soit le taux de recyclage. Bien que des problèmes de manutention des GBR aient été signalés par ailleurs (surtout

pour le sable), en particulier au niveau de l'écoulement dans les trémies, aucun problème de ce type n'est apparu ici. Un temps minimum de malaxage de 55 secondes a été appliqué, conformément aux conditions normatives actuelles pour les bétons contenant des adjuvants.

Les Figures 22.3, 22.4 et 22.5 montrent les différentes étapes de la construction. Les bétons ont été répandus manuellement puis talochés avec un hélicoptère. Aucun produit de cure n'a été appliqué. Les compagnons n'ont signalé aucune différence entre les mélanges, qui étaient tous fluides et faciles à manier. Une seule réserve concernait l'aspect de surface du béton entièrement recyclé, où quelques débris de bois sont apparus, contrairement aux autres secteurs où aucun « corps étranger » n'a été détecté.

Figure 22.3

Vue du chantier avant le coulage du béton [de Larrard *et al.*, 2014]



Figure 22.4

Coulage du béton frais [de Larrard *et al.*, 2014]



Figure 22.5

Vue du chantier après coulage du béton [de Larrard *et al.*, 2014]



22.2.4. Suivi

Le chantier a fait l'objet de plusieurs visites après sa réalisation. L'objectif principal était de détecter une éventuelle fissuration des dalles de béton, générée par le retrait empêché du béton. Aucune fissure n'a été observée. Seul l'examen des bords de dalle a conduit à identifier quelques fissures à la base de certains joints sciés (voir Figure 22.6).

Figure 22.6

Fissure à la base d'un joint observée après 4 mois [photo LafargeHolcim LCR]



22.3. Modélisation du risque de fissuration

La fissuration peut provenir de plusieurs mécanismes de dégradation se produisant à différentes échelles d'observation :

- à l'échelle macroscopique, les gradients thermiques et hydriques entre la surface et le cœur de la dalle induisent des gradients de déformations et, partant, des gradients de contraintes (avec un état de traction en surface pouvant induire une fissuration lorsque la valeur dépasse celle de la résistance à la traction du béton). En outre, l'hygrométrie du sol peut provoquer des déformations dans la dalle et conduire à des fissures transverses et un décollement entre la dalle et le sol ;
- à l'échelle mésoscopique, la déformation de la pâte de ciment peut être empêchée par les granulats (plus rigides), conduisant ainsi à une rupture de l'interface pâte/granat (fissures périphériques), et à l'apparition de fissures inter-grains (fissures radiales).

Afin d'appréhender ces mécanismes et de comparer les risques de fissuration des différents bétons de GBR, des simulations thermo-hydro-mécaniques ont été effectuées au LMT par C. De Sa et F. Benboudjema, en utilisant le code éléments finis Cast3M développé par le Commissariat à l'Énergie Atomique [Cast3M].

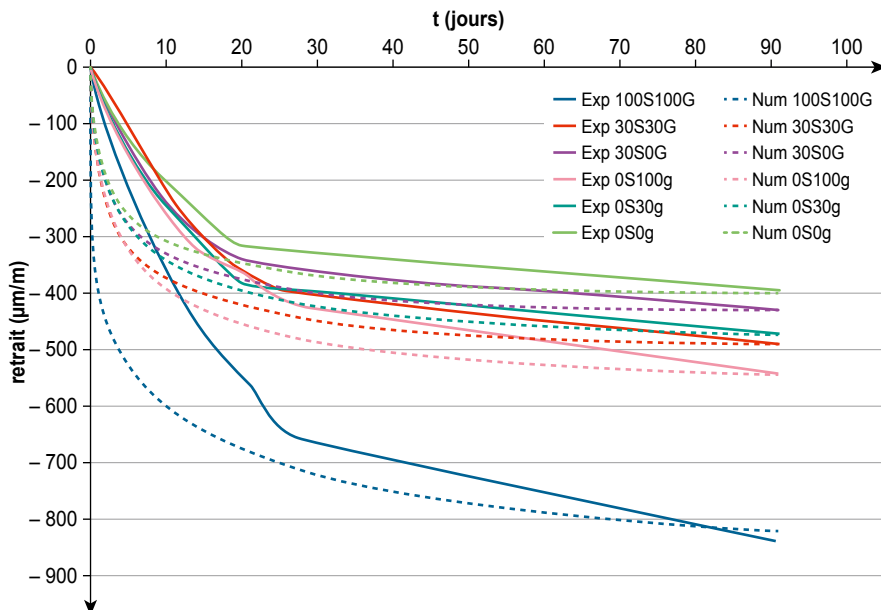
22.3.1. Formulation et identification des modèles dédiés aux différentes propriétés mécaniques et de transferts

Tout d'abord, le processus d'hydratation est décrit *via* la notion d'affinité chimique, fondée sur la loi d'Arrhenius. Le champ de température est résolu grâce à l'équation de la chaleur, avec comme terme source l'hydratation du ciment. Les conditions aux limites sont de type convectif ; le flux de chaleur est supposé proportionnel à la différence entre la température ambiante et la température de la surface.

Pour les transferts d'humidité, seul l'écoulement liquide est considéré, avec une loi de diffusion calée pour une isotherme d'adsorption. Le retrait libre de séchage est déduit du champ d'humidité, avec un modèle empirique supposant une dépendance linéaire entre l'humidité et le retrait. Le retrait endogène, bien que mineur dans cette plage de rapport eau/liant, est obtenu en supposant une dépendance linéaire avec le degré d'hydratation du ciment. La déformation thermique est déduite de la température locale associée à un coefficient de dilatation.

Figure 22.7

Calibration du retrait



La résistance à la compression et le module d'élasticité sont contrôlés par le degré d'hydratation. Le fluage est décrit par un modèle classique de Kelvin-Voigt, avec amortisseurs en série. La raideur des ressorts, ainsi que la viscosité des amortisseurs, sont censées dépendre du degré d'hydratation, selon le modèle proposé par [de Schutter, 1999] et [Stefan *et al.*, 2010]. Le même modèle est utilisé pour les déformations de fluage en traction et en compression, bien que cette hypothèse soit contraire à la plupart des expériences. S'ajoute le fluage de dessiccation, supposé proportionnel au retrait de séchage [Bazant et Chern, 1985]. Finalement, la déformation totale correspond aux déformations élastiques et thermiques, auxquelles s'ajoutent le retrait endogène et deséchage, ainsi les déformations de fluage propre et de dessiccation. Lorsque la contrainte de traction calculée dépasse la résistance en traction du béton, la fissuration obtenue est alors décrite par un modèle d'endommagement de Mazars modifié [Mazars, 1984].

L'identification des paramètres des modèles a été réalisée avec les données suivantes :

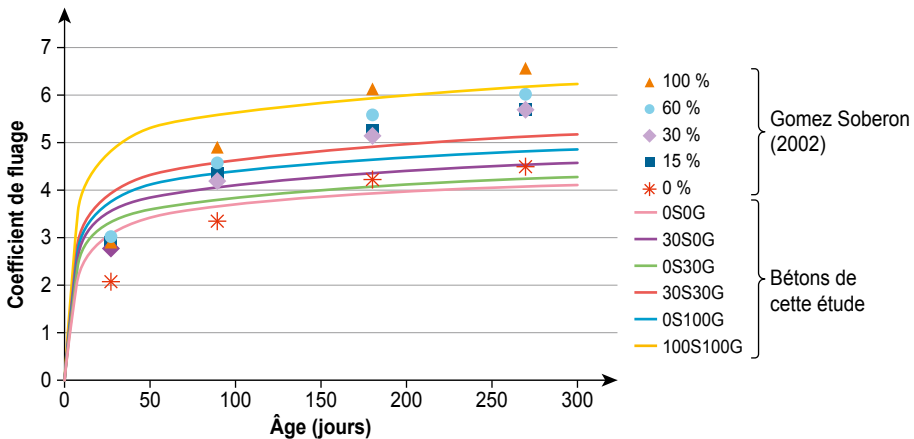
- les données de résistances ont servi à étalonner la loi du degré d'hydratation ;
- les mesures de retrait (comprenant les mesures de perte de masse), ont servi à étalonner la loi du retrait de séchage. À ce stade, les retraits des éprouvettes prismatiques ont été simulés avec un modèle aux éléments finis. Les comparaisons entre simulations et mesures sont données Figure 22.7 ;

- pour le modèle de fluage, il manquait des données expérimentales originales, sauf pour les deux mélanges testés à l'École Centrale de Nantes (voir chapitre 11 « Propriétés mécaniques différées »). Pour ces deux mélanges, le modèle a donc été calibré avec ces données expérimentales ; pour les autres, le fluage a été pris inversement proportionnel au module d'Young ;
- des données typiques tirées de la littérature ont été utilisées pour les nombreux autres paramètres d'ajustement. Par exemple, pour intégrer l'effet du taux de GBR sur le fluage de séchage, les essais de fluage total de Gomez-Soberon [Gomez-Soberon, 2002] ont été modélisés afin de calibrer les différents paramètres. Les bétons de Chaponost ont pu ainsi être simulés et comparés à ceux de Gomez-Soberon (voir Figure 22.8).

Le processus de modélisation est décrit en détail dans le rapport original du Projet National RECYBETON [de Sa et Benboudjema, 2016].

Figure 22.8

Coefficients de fluage (expérimental et modélisé)

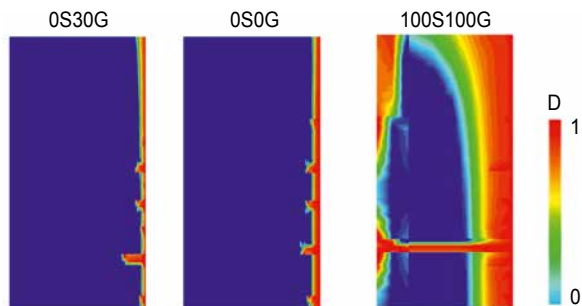


22.3.2. Simulation de l'essai de retrait à l'anneau

Les modèles ci-dessus ont été appliqués à l'essai de retrait à l'anneau, décrit Figure 22.1. Ils ont restitué les endommagements présentés Figure 22.9. Seule une mince fissuration de peau apparaît pour tous les mélanges, excepté celui entièrement recyclé. Pour ce mélange (100S100G), les dommages sont beaucoup plus conséquents, avec des fissures développées sur le tiers, voire sur la moitié de l'épaisseur de l'anneau. Cette prévision est conforme au comportement signalé Figure 22.1, où une fissure partait de l'extérieur de l'anneau, traversait l'échantillon, mais s'arrêtait avant le cœur de l'éprouvette.

Figure 22.9

Domage simulé à l'anneau



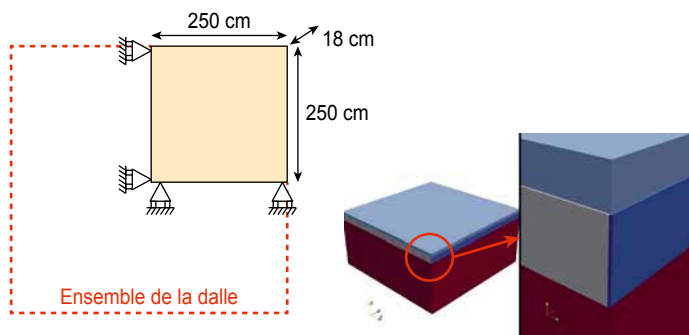
22.3.3. Simulation des dallages

Des simulations 3D ont été réalisées pour les dalles de 5×5 m contenant les différents bétons, en ne modélisant qu'un quart de leur surface, et en supposant que la dalle repose sur une couche de sol de 1 m d'épaisseur (voir Figure 22.10). Des données réelles de température et d'humidité, fournies par une agence météorologique locale, ont été prises en compte afin d'avoir les meilleures conditions aux limites possibles (en considérant une loi de convection pour les transferts thermiques). Du côté du sol, une valeur d'humidité de 98 % a été prise en compte. Pour l'aspect mécanique, en raison du manque de données, une liaison parfaite a été considérée entre le dallage et le sol, caractérisé lui-même par un module d'élasticité de 40 MPa (correspondant aux conditions les plus restrictives).

La Figure 22.11 présente le champ d'endommagement dans les six dallages simulés. Aucune fissuration n'apparaît. Des fissures se produisent cependant aux droits des joints périphériques, en raison de la réduction brusque de la section à cet endroit, qui induit une concentration de contraintes. En ce qui concerne l'essai à l'anneau, les simulations sont en bon accord avec les observations.

Figure 22.10

Maillage 3D du dallage (bleu pour la dalle béton et rouge pour le sol) avec un détail sur joints



Afin de discriminer quantitativement les différentes formules, en termes de susceptibilité à la fissuration, d'autres simulations élastiques 1D en conditions de dalle totalement restreinte ont été proposées par le LMT. Elles montrent que le mélange 100S100 G développe une forte susceptibilité à la fissuration (caractérisée par un indice calculé en divisant la contrainte de traction développée σ_t par la résistance du matériau f_t , voir Figure 22.12). Les autres formules présentent toutes des indices de fissuration du même ordre, qui ne dépasse pas celui de la formule de référence.

Figure 22.11

Dommages simulés des dallages

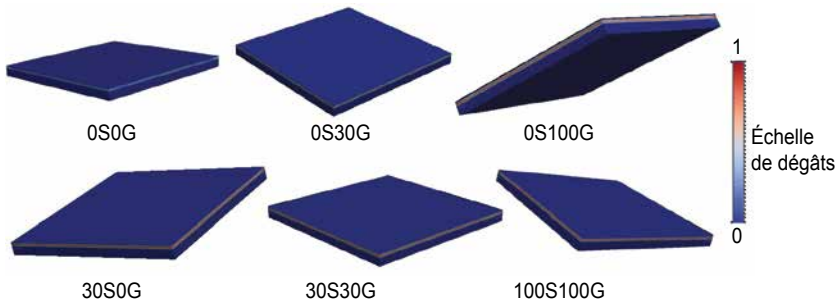
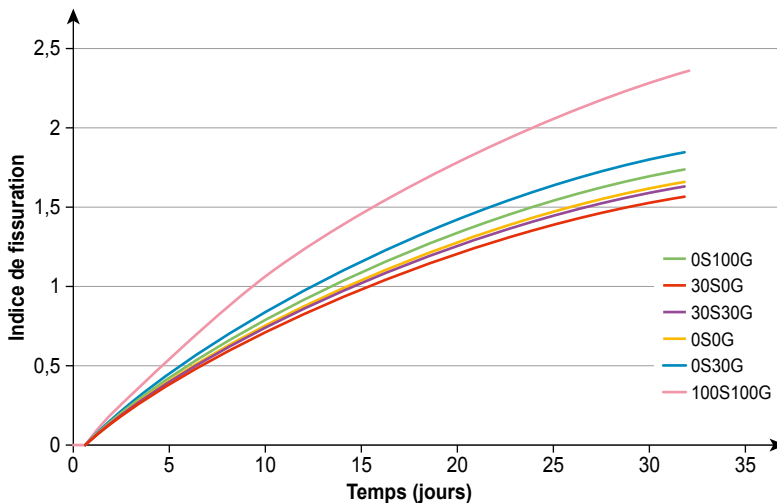


Figure 22.12

Indice de sensibilité à la fissuration développé dans les différents mélanges, dans des conditions de dalle totalement restreinte



22.4. Dallages complémentaires en béton de ciment recyclé

Trois ans après la réalisation du chantier, le propriétaire a souhaité étendre son parking. Il a alors accepté de tester l'utilisation d'un béton contenant le ciment recyclé décrit dans le chapitre 4. Rappelons que le clinker de ce ciment résulte de la cuisson d'un cru contenant 15 % de sable de GBR. 5,8 tonnes de ce ciment, produit par la société Vicat, ont été livrées à la centrale de BPE LafargeHolcim Herriot (située à Lyon).

22.4.1. Ciment incorporant du sable de GBR dans le cru cimentier

Les étapes du développement du ciment recyclé sont décrites dans le chapitre 4 de cet ouvrage. Ses principales propriétés physiques, chimiques et mécaniques sont reprises dans le Tableau 22.3. Aucune différence significative n'apparaît entre ce ciment et le ciment de référence, excepté pour la demande en eau qui est plus élevée pour le ciment recyclé (bien que sa surface spécifique Blaine soit plus faible).

Tableau 22.3

Caractéristiques du ciment de référence et du ciment recyclé

	C3S	C2S	C3A	C4AF	Masse volumique (g/cm ³)	SS Blaine (cm ² /g)	Demande en eau (%)	Temps de prise (mn)	Chaleur d'hydratation à 41 heures	Rc2 (MPa)	Rc28 (MPa)
Ciment Portland CEMI 52.5	66	13	1	15	3,18	3 810	26,5		299	31,8	61
Ciment recyclé CR1	61,8	17,8	6,1	11,6	3,14	3 630	34,9	280	350	35	58

22.4.2. Formulation et propriétés du béton

Un béton C25/30 CEMI 52,5 N D22 S4 XF2 CL0,4 (selon la norme [NF EN 206/CN, 2014]) issu du catalogue de la centrale de BPE a été pris comme mélange témoin. La formule avec le ciment recyclé a été obtenue en remplaçant uniquement le ciment Portland d'origine par le ciment recyclé, en gardant constant tous les dosages. L'ajustement de la quantité d'eau pour atteindre la

consistance du béton témoin montre que le béton de ciment recyclé réclame un rapport eau/ciment légèrement plus élevé. Cependant, les propriétés du béton frais et du béton durci sont très semblables. Les compagnons n'ont détecté aucune différence durant l'étape du coulage, alors que le technicien en charge de l'échantillonnage a signalé une consistance légèrement plus collante pour le second mélange. Les formules et les propriétés à l'état frais et durci sont présentées dans le Tableau 22.4.

Tableau 22.4

Caractéristiques des bétons réalisés

Constituants (kg/m ³)\Formules	Béton témoin	Béton de ciment recyclé
Gravillon naturel 11/22	720	720
Gravillon naturel 4/11	290	290
Sable naturel 0/4	790	790
Ciment CEM I 52,5 N CP2	300	–
Ciment CEM I 52,5 N recyclé	–	300
Plastifiant (%)	2,55	2,55
Agent entraîneur d'air (%)	1,05	1,05
Eau	178	187
e/c (rapport eau efficace/ciment)	0,59	0,62
Affaissement (mm)	220	195
Air (% , à la centrale)	5,0	6,0
Air (% , au laboratoire)	3,5	2,8
Résistance à la compression à 1 jour (MPa)	6,9	6,8
Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	23,2	25,3
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	29,4	29,2
Résistance au fendage à 28 jours (MPa)	2,67	2,80

22.4.3. Réalisation des dallages supplémentaires à Chaponost

Les dallages supplémentaires ont été coulés sur la même épaisseur et selon la même technique que pour les dallages construits trois ans auparavant. À ce jour, aucune dégradation ni aucune différence pouvant être attribuée au « ciment recyclé » n'ont été signalées.

22.5. Besoins de recherche

Concernant l'utilisation des bétons à base de GBR, le chantier de Chaponost n'a soulevé aucun obstacle particulier, traduisant ainsi les possibilités pratiques de recyclage du béton. Le processus de formulation a été régulier, excepté pour la gestion des adjuvants qui soulève deux difficultés : i) le maintien dans le temps de l'affaissement a été partiellement perturbé par l'introduction des GBR (sable). Des recherches sont donc nécessaires en matière de chimie organominérale sur les interactions ciment-superplastifiant, afin de comprendre le rôle du granulats. ii) par ailleurs, l'effet négatif du sable de GBR sur la teneur en air nécessiterait une étude plus approfondie. Cet effet a été observé sur chantier, mais pas durant les essais préliminaires en laboratoire, réalisés avec une livraison différente de GBR. Cela signifie que le rôle perturbateur des GBR sur la rhéologie du béton frais dépend probablement de légères variations de certains paramètres secondaires.

En ce qui concerne la caractérisation du matériau, le processus de modélisation a souffert d'un manque de données de fluage. Une plus large investigation sur le fluage du béton à base de GBR est donc nécessaire, en privilégiant les effets de plusieurs paramètres comme le taux de substitution, l'âge du béton au moment du chargement, et l'effet de l'humidité. Grâce à ces données complémentaires, des simulations fiables pourraient être réalisées afin de permettre l'évaluation du risque de fissuration dans des projets spécifiques.

Concernant le béton incorporant le ciment recyclé, il serait important de vérifier en laboratoire si l'incorporation de sable de GBR dans le cru cimentier n'a aucun effet sur les propriétés de durabilité, au-delà des propriétés du béton frais et des propriétés mécaniques du béton durci, vérifiées lors du deuxième chantier de Chaponost.

22.6. Conclusions

Le parking de Chaponost fut le premier chantier expérimental mené dans le cadre du Projet National RECYBETON. D'un point de vue pratique, l'objectif était de vérifier si le béton de GBR pouvait être produit et coulé sans changer les protocoles habituels. Côté formulation et comportement mécanique, le défi était de voir dans quelle mesure un taux élevé de GBR pouvait remplacer des granulats naturels sans créer de fissures de retrait dans un dallage sur terre-plein de grande dimension. Trois ans après la construction, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. un GBR de type 3 (selon la norme EN 206-1) a été utilisé sans générer de difficultés apparentes, en dépit des recommandations des normes actuelles qui stipulent l'emploi de GBR de type 1 ou type 2 pour les bétons recyclés ;
2. six formules ont été développées, avec des taux de substitution allant de 0 à 100 %, incluant la fraction fine (sable). Elles ont été soumises à une

large série d'essais de caractérisation (excepté le comportement au fluage qui n'a pas pu être étudié). Les tendances habituelles ont été retrouvées, comme un moindre module élastique et une augmentation du retrait à différents stades. Pour maintenir la résistance à la compression, le dosage en ciment a été augmenté uniquement pour les mélanges contenant plus de 30 % de GBR ;

3. des tests de fissuration à l'anneau ont été effectués en laboratoire. Le béton à 100 % de GBR a été le seul à présenter une prédisposition plus importante à la fissuration, par rapport au mélange de référence ;

4. la construction du parking, en six secteurs réalisés chacun avec une formule de béton différente, s'est déroulée sans difficultés particulières. Pendant le coulage et la finition, l'équipe du chantier n'a noté aucune différence entre les mélanges. Le seul contraste entre zones a été la présence de quelques débris de bois apparus à la surface du béton entièrement recyclé ;

5. une importante modélisation par éléments finis a été réalisée sur le processus de fissuration du dallage en place, en considérant les différentes propriétés des mélanges. Les essais en laboratoire de retrait et les essais à l'anneau ont été simulés, à des fins d'étalonnage ou de prévision. Des résultats de fluage de la littérature ont aussi été utilisés pour calibrer le modèle de fluage, alors que les données issues du chantier ont suffi à étalonner les autres modèles ;

6. comme prévu, il a été constaté que, pour une dalle de 18 cm d'épaisseur, le retrait de dessiccation est le moteur principal de la fissuration. Les effets thermiques jouent un rôle secondaire. Les simulations peuvent reproduire la fissuration à l'anneau du béton entièrement recyclé, les autres bétons ne présentant qu'une fine fissuration de peau ;

7. les observations sur chantier et les simulations ne montrent ou ne prédisent aucune fissuration, excepté au droit des joints sciés tous les 5 mètres dans les dalles. La prédisposition à la fissuration n'apparaît que pour des taux de substitution supérieurs à 30 %. Même à 100 % de GBR, malgré une quantité de pâte de ciment plus élevée et dans les conditions environnementales du chantier, la fissuration n'a pas été un problème pour ces bétons. À la connaissance des auteurs, c'est ici la première étude qui constate ce fait important ;

8. bien que des essais de fluage aient été effectués après ce chantier dans le cadre du programme RECYBETON (voir chapitre 11), une étude complète du fluage du béton recyclé serait souhaitable dans le futur, où des paramètres tels que la résistance, le taux de substitution, l'âge du chargement seraient systématiquement étudiés. Après une telle campagne, le risque de fissuration pourrait être mieux évalué, dans les cas les plus défavorables notamment (pièces de béton plus épaisses, environnement sec, etc.).

9. l'utilisation d'un ciment fabriqué à partir d'un clinker partiellement recyclé n'a montré aucune différence en termes de propriétés et d'ouvrabilité du

béton, par rapport à un ciment Portland ordinaire. Gardant à l'esprit que ce ciment recyclé est déjà autorisé par la norme EN 197, on peut considérer que c'est un résultat encourageant. Lorsque la durabilité apportée par ce ciment aura été vérifiée, il n'y aura aucun obstacle autre qu'économique ou environnemental (voir le chapitre 33) à la diffusion de cette nouvelle pratique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la société ELTS (Chaponost, Rhône) pour avoir permis d'organiser ce chantier expérimental, Vicat pour la fourniture du ciment recyclé et LafargeHolcim France pour la production des bétons de GBR.

Chapitre 23.

Ouvrage d'art : contournement ferroviaire de Nîmes-Montpellier

I. Moulin¹, E. Perin¹, O. Servan², M. Verbrauwhe³

Résumé – Ce chapitre concerne la construction d'un pont-cadre conventionnel du chantier de contournement ferroviaire Nîmes-Montpellier, avec utilisation de granulats de béton recyclé (GBR). Ce chantier pilote a été précédé d'une étude du béton en laboratoire. Pour cet ouvrage, un béton C35/45 était requis afin de satisfaire les classes d'exposition XC4 XF1 de la norme NF EN206/CN. Deux formules de béton incorporant un gravillon de GBR ont été étudiées. La première contenait 20 % de gravillon de GBR, pour être conforme aux spécifications de la norme [NF EN 206/CN, 2014]. La seconde contenait un taux supérieur (de 40 %) correspondant à une substitution totale du gravillon naturel 6/14, pour explorer l'impact d'un taux élevé de gravillon recyclé. Les propriétés chimiques, minéralogiques et physiques du gravillon de GBR sélectionné ont tout d'abord été mesurées. Les bétons ont ensuite été étudiés en laboratoire selon la démarche habituelle pour ce genre d'ouvrage. Des caractéristiques supplémentaires ont également été mesurées afin d'évaluer l'impact du taux de GBR sur la durabilité du béton (porosité à l'eau, perméabilité à l'oxygène, profondeur de carbonatation et retraits). L'étude en laboratoire a montré que les propriétés du béton frais et durci, avec 20 % ou 40 % de gravillons de GBR, respectaient toujours les spécifications des prescriptions.

Une partie du pont a été coulée avec le béton à 20 % de gravillons de GR, le reste avec un béton classique. Aucune difficulté particulière n'a été signalée, tant durant la fabrication du béton qu'au cours de sa mise en œuvre. Un mur « sacrificiel » a été coulé en même temps que l'ouvrage, pour pouvoir pratiquer des carottages et suivre les propriétés du béton au cours du temps. Plus de deux ans après la fin du chantier, aucun défaut n'a été observé et les paramètres de durabilité mesurés sur les carottes sont conformes aux valeurs attendues.

Cette expérience montre que l'utilisation de gravillons de GBR peut être généralisée, y compris dans les ouvrages d'art, sans encourir de

1. Lerm Setec, Arles.

2. Setec TPI, Paris.

3. Bouygues TP, Parisance.

difficultés majeures, et à des taux pouvant probablement dépasser 20 %, comme le montrent les résultats positifs obtenus pour le béton contenant 40 % de gravillons de GBR.

23.1. Introduction

L'utilisation de granulats de béton recyclé (GBR) dans le béton est aujourd'hui autorisée en France, dans les limites toutefois de celles de la norme NF EN 206/CN. Cependant, le béton de GBR est encore peu utilisé dans les ouvrages d'art et les retours d'expérience sont peu nombreux. Le groupe Setec a été chargé de la maîtrise d'œuvre d'une partie du projet de contournement ferroviaire Nîmes-Montpellier. Dans le cadre de sa démarche innovation (Setec Labs), il a favorisé le rapprochement des sociétés Bouygues et Oc'Via Construction avec les partenaires de Projet National RECYBETON. Cette collaboration s'est concrétisée par la décision d'utiliser un béton de GBR dans l'un des ponts du projet. L'objectif était de démontrer la pertinence de la mise en œuvre d'un béton de GBR dans un ouvrage d'art. Le projet a aussi permis de mieux identifier les obstacles au développement du béton de GBR dans un contexte donné.

Ce chantier pilote a été combiné à une étude en laboratoire ayant pour but d'évaluer l'impact de la proportion de GBR sur les propriétés du béton. Les gravillons naturels ont été substitués à hauteur de 20 % par des gravillons de GBR de type 1, proportion maximale autorisée par la norme [NF EN 206/CN, 2014] mais également par 40 % à titre prospectif. L'accent a été mis aussi sur la durabilité du béton, un aspect important pour l'utilisation éventuelle de GBR dans les ouvrages d'art.

23.2. Genèse du projet et description du site

La contournement ferroviaire Nîmes-Montpellier est une nouvelle ligne ferroviaire à grande vitesse du sud de la France. Elle a nécessité la construction de 188 ouvrages d'art. Elle a été mise en service fin 2017.

Il s'agit d'un contrat de partenariat public-privé (PPP) entre RFF (Réseau Ferré de France) et Oc'Via Construction. En collaboration avec les sociétés d'ingénierie SETEC et SYSTRA, Oc'Via Construction a été chargée de la conception et de la construction de la ligne ferroviaire et elle en assure son fonctionnement et sa maintenance.

La décision commune de SETEC/Oc'Via de construire un ouvrage utilisant des granulats de béton recyclé a été prise en février 2014. L'ouvrage choisi est un pont-cadre classique (environ 12 mètres de long et 7,5 mètres de large) situé à Nîmes (sud-est de la France). Ce pont franchit le ruisseau de Valdebane et

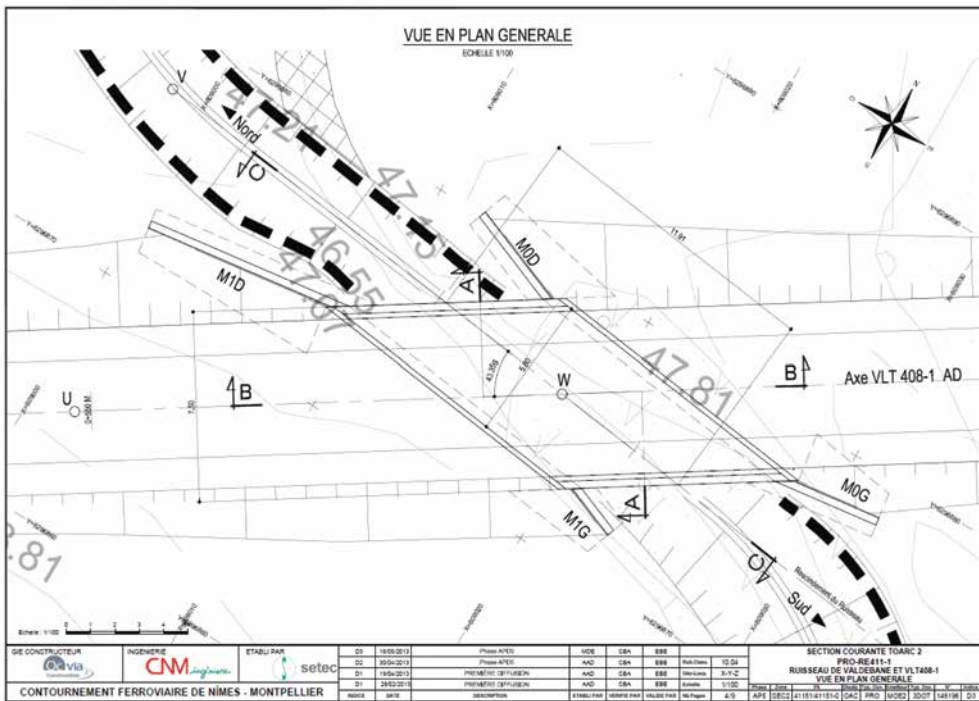
supporte une piste cyclable. C'est l'un des ouvrages de rétablissement de la nouvelle ligne ferroviaire, qui fait partie intégrante du projet de contournement Nîmes-Montpellier, même s'il n'est pas situé directement sur la voie principale. Le béton devait être conforme à la norme NF EN 206-1/CN 2012.

Le pont devait être livré en juin 2014. Les partenaires du projet avaient donc un délai très court pour concevoir le béton et valider la formule, en conformité avec législation en vigueur (Fascicule 65).

La traverse du pont et un mur en retour (repéré M1D sur la vue en plan, Figure 23.1) ont été coulés avec le béton de GBR, soit 42 m³, pour un total de 100 m³ de béton pour l'ensemble de l'ouvrage.

Figure 23.1

Vue en plan de l'ouvrage sélectionnée



23.3. Matériaux et formulation

23.3.1. Granulat de béton recyclé (GBR)

23.3.1.1. Approvisionnement

Le gravillon de GBR provenait d'un seul lot dédié au projet (50 tonnes), traité par la société LRM. La plateforme était située à 20 km de la centrale Unibéton, chargée de la production du béton. Le gravillon de GBR 6/20 mm a été obtenu par concassage de gros blocs de béton, traitement qui a permis de réduire leur taille et d'éliminer les aciers. Le GBR obtenu (Figure 23.2) a été classé « type 1 + » selon la norme NF EN 206/CN (tous les critères étant CR_B).

Figure 23.2

Stock de granulat recyclé préparé par LRM



Crédit photo : Lerm.

23.3.1.2. Caractéristiques du granulat

La masse volumique, le coefficient d'absorption d'eau et les éléments solubles dans l'eau ont été déterminées sur dix échantillons. Les autres caractéristiques requises par la norme [NF XP P 18-594, 2004] ont été mesurées sur un échantillon homogène représentatif. Une attention particulière a été portée sur le problème de la réactivité potentielle alcalis-granulat (RAG). Dans ce but, l'analyse pétrographique, la teneur en alcalins actifs et le test de stabilité dimensionnelle sous conditions alcalines selon XP P 18-594 ont été effectués. Les caractéristiques du gravillon de GBR sont résumées dans le Tableau 23.1. Toutes les propriétés satisfont les exigences la norme béton, sachant que le GBR présente une absorption d'eau comprise entre 6,1 à 7,3 %, avec une moyenne de 6,6 %. L'analyse pétrographique montre la présence de différentes natures de roches, indiquant que le GBR provient de différentes sources d'anciens bétons. La teneur en silice réactive a été estimée à 4 % environ, valeur pouvant conduire à une RAG potentielle. Toutefois, les tests de stabilité dimensionnelle en milieu alcalins ont permis de classer le GBR comme non réactif.

Tableau 23.1

Propriétés du gravillon de GBR

Caractéristiques physiques		
Masse volumique (kg/m ³)	[NF EN 1097-6, 2014]	2350 – 2420
Coefficient d'absorption d'eau (%)	[NF EN 1097-6, 2014]	6,6
Micro Deval (%)	[NF EN 1097-1, 2011]	29
Los Angeles (%)	[NF EN 1097-2, 2010]	29
Caractéristiques chimiques		
Teneur en chlorures (%)	[NF EN 1744-1, 2014 article 7]	< 0,01
Teneur en sulfates (%)	[NF EN 1744-1, 2014 article 12]	0,34
Teneur en soufre total (%)	[NF EN 1744-1, 2014 article 11]	0,14
Matières organiques	[NF EN 1744-1, 2014 article 15-1]	Négatif
Teneur en sulfates solubles dans l'eau (%)	[NF XP P 18-581, 1997]	0,11 – 0,15
Tests alcalis-réaction		
Alcalins actifs (%)	Méthode LPC n° 37	0,0111
Péetrographie	[NF EN 932-3, 1996]	Calcaire
Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin	[NF XP P 18-594, 2004 article 5.1]	Non-réactif

Le gravillon de GBR a été classé en catégorie D, pour son coefficient d'absorption d'eau et de sa teneur en sulfates, alors que tous les autres paramètres ont été classés en catégorie A (selon [NF EN 12620, 2008]).

23.3.2. Formulation du béton

Dès le stade de la conception, un béton C35/45 a été imposé afin de respecter les critères des classes d'exposition XC4 XF1 de la norme [NF EN 206/CN, 2014]. En effet, tous les bétons du projet devaient pouvoir résister à un environnement agressif, en l'occurrence l'eau de mer. Deux bétons recyclés ont été étudiés en laboratoire à partir d'une formule de référence (formule témoin) :

- un béton recyclé repéré 40 % GBR, qui permettait le remplacement d'une coupure granulométrique complète du gravillon naturel,
- un béton recyclé repéré 20 % GBR, pour lequel le taux de gravillon de GBR était limité à 20 %, conformément à la norme [NF EN 206/CN, 2014].

En raison du caractère potentiellement réactif (RAG) du gravillon de GBR, l'apport en alcalins a été limité en utilisant un ciment CEM I 52,5 et un ajout de laitier granulé moulu.

Les formules du béton témoin et des bétons de GBR sont détaillées dans le Tableau 23.2. On notera qu'il n'y a pas d'eau ajoutée, et que la quantité d'adjuvants est la même.

Tableau 23.2

Composition des bétons

Matériaux	Témoin	20 % GBR	40 % GBR
CEM I 52,5 N SR3 CE PM (kg/m ³)	320	320	320
Laitier granulé moulu (kg/m ³)	60	60	60
Sable naturel 0/4 (kg/m ³)	860	850	840
Gravillon 6,3/16 naturel (kg/m ³)	340	270	190
Gravillon 11/22 naturel (kg/m ³)	595	450	330
Gravillon 6,3/20 recyclé (kg/m ³)	–	180	350
Plastifiant réducteur d'eau 1 (kg/m ³)	2,66	2,66	2,66
Plastifiant réducteur d'eau 2 (kg/m ³)	0,76	0,76	0,76
Eau efficace/Liant équivalent	0,44	0,44	0,44

23.4. Essais en laboratoire

À la demande de Bouygues TP, les bétons ont été réalisés et leurs propriétés mécaniques mesurées par Unibéton. Les essais en laboratoire ont été menés conformément aux exigences de la législation française, complétés par les exigences spécifiques de RFF. Les résultats sont donnés dans le Tableau 23.3. On notera que les granulats n'ont pas été saturés préalablement.

La classe d'affaissement S4 (160-220 mm) a été maintenue pendant 2 heures sans avoir besoin de modifier les formules. Malgré l'introduction du gravillon de GBR, la résistance à la compression à 28 jours n'a pas été significativement affectée.

Les essais de durabilité ont été réalisés par le LERM, sur des échantillons prélevés en centrale, excepté pour la mesure du retrait qui a été réalisée sur des éprouvettes 7 × 7 × 28 cm³ fabriquées par le LERM et conservées à 20 °C et 50 % HR. Leur masse et leur longueur ont été mesurées à différentes échéances jusqu'à un an. Afin d'évaluer, du moins partiellement, l'importance du retrait endogène, la stabilité dimensionnelle d'une deuxième série d'éprouvettes, protégées de la dessiccation par un film aluminium autocollant, a aussi été suivie pendant un an (mesure de la longueur initiale à 24 heures).

Tableau 23.3

Propriétés des bétons

Bétons	Témoin	20 % GBR	40 % GBR
Béton frais			
Affaissement à T0 (mm)	230	235	235
Affaissement à T60 (mm)	225	220	235
Affaissement à T120 (mm)	190	215	220
Masse volumique (kg/m ³)	2 356	2 340	2 323
Air entraîné (%)	2,0	2,9	2,1
Béton durcis			
Résistance en compression à 7 jours (MPa)	44	38	41
Résistance en compression à 14 jours (MPa)	–	47	47
Résistance en compression à 28 jours (MPa)	55	57	55
Résistance en traction à 28 jours (MPa)	4	3,8	3,6

La Figure 23.3 présente l'évolution du retrait total et du retrait endogène des trois bétons (témoin, 20 % et 40 % de gravillons de GR).

Les indicateurs de durabilité (porosité à l'eau, perméabilité à l'oxygène, coefficient de diffusion apparent des chlorures, profondeur de carbonatation) ont été mesurés sur des éprouvettes de béton durcis conservées dans l'eau à 20 °C pendant 90 jours.

La porosité de l'eau a été mesurée par imbibition sous vide et pesée hydrostatique selon la norme [NF P 18-459, 2010].

La mesure de la perméabilité à l'oxygène a été réalisée sur des disques de béton préalablement séchés (diamètre 95 mm, épaisseur 50 mm), selon la norme [NF XP P18-463, 2011].

Le coefficient de diffusion apparent des chlorures a été mesuré selon la norme XP P18-462 : les disques de béton (90 jours de cure humide) ont été placés entre deux compartiments, l'un contenant une solution à 0,1M NaOH + 0,5M NaCl et l'autre une solution à 0,1M NaOH. La migration des chlorures est accélérée par un champ électrique et le coefficient de diffusion apparent est calculé à partir du front de pénétration des chlorures.

La profondeur de carbonatation a été mesurée après accélération de la réaction réalisée par exposition des échantillons à un mélange gazeux contenant 50 % de CO₂ (90 jours) selon la norme [NF XP P18-458, 2008].

Tous les résultats sont détaillés dans le Tableau 23.4.

Tableau 23.4

Propriétés de durabilité des bétons (moyenne de trois mesures)

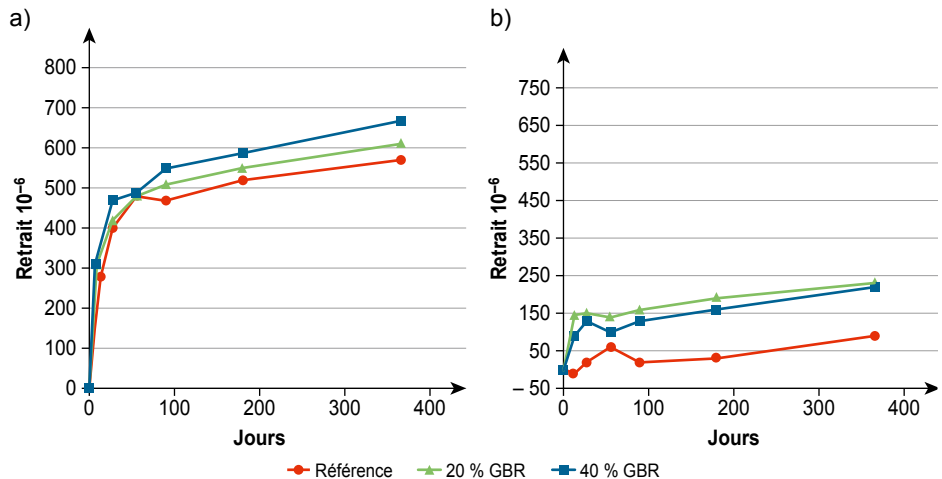
Bétons	Référence	20 % GBR	40 % GBR
Béton frais			
Porosité à l'eau à 90 jours [NF P 18-459, 2010]	13,1	14,6	14,4
Perméabilité à l'oxygène à 90 jours (10^{-18} m^2) [NF XP P18-463, 2011]	49	213	149
Coefficient de diffusion apparent des chlorures à 90 jours ($10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) [NF XP P18-462, 2012]	8,6	9,6	8,3
Profondeur de carbonatation à 90 jours (essais accéléré) (mm) [NF XP P 18-458, 2008]	7,8	7,1	–
Essais de la réaction alcalis-granulats (semaine 52) (%) [NF P18-454, 2004]	–	0,016	0,019
Retrait total entre 1 et 90 jours (10^{-6})	470	510	550
Retrait endogène entre 1 et 90 jours (10^{-6})	20	160	130

Comme attendu, les valeurs de porosité et de perméabilité sont plus élevées pour les bétons de GBR, mais les différences sont plutôt faibles. Les bétons de GBR restent donc conformes aux exigences requises pour un tel ouvrage. On notera aussi que les valeurs de perméabilité des bétons de GBR sont dispersées, ce qui relativise les différences entre 20 % et 40 % de gravillons de GBR.

Figure 23.3

Retraits ; (a) échantillons conservés à 20 °C et 50 % HR ;

(b) échantillons conservés à 20 °C et 50 % HR avec protection étanche



L'incorporation du gravillon de GBR dans le béton a provoqué à une augmentation marquée du retrait endogène. Elle a cependant un impact nettement moindre sur le retrait total. Cet effet peut être dû à une absorption d'eau différée du gravillon recyclé.

23.5. Réalisation des travaux

23.5.1. Production du béton

Le béton contenant 20 % de gravillon de GBR (20 % GBR) a été choisi pour la construction du pont. Ce béton a été produit par la centrale BPE Unibéton et transporté sur 15 km par camion-toupie. Les gravillons de GBR n'ont subi aucune préparation particulière avant leur utilisation (pré-humidification par exemple). Aucune difficulté n'a été signalée à ce stade. Le mur retour a été coulé le 27 juin 2014 et la traverse le 17 juillet 2014 sous un temps ensoleillé et chaud.

23.5.2. Livraison et mise en place du béton

La mise en œuvre du béton de GBR s'est déroulée exactement comme celle du béton témoin. Les Figures 23.4 et 23.5 illustrent les différentes étapes du coulage. Le béton a été curé par arrosage et recouvrement d'une bâche protectrice imbibée d'eau pour éviter une déshydratation prématurée. Aucune difficulté particulière n'a été constatée durant le coulage et la mise en place du béton, le béton de GBR se comportant exactement comme un béton courant.

Figure 23.4

Coulage du béton à 20 % de GBR



Crédit photo : Lerm.

Figure 23.5

Régalage et mise à niveau du béton à 20 % GBR



Crédit photo : Lerm.

23.6. Suivi et observations

Comme tous les ouvrages du contournement ferroviaire Nîmes-Montpellier, le pont a été visité et inspecté avant réception. Aucun défaut particulier n'a été observé. Dans le cadre du Projet National RECYBETON, une procédure spécifique de suivi a été adoptée en complément des visites classiques. Ainsi, durant la construction, un élément de mur « sacrificiel » a été coulé en même temps que l'ouvrage réel et dans les mêmes conditions (formule, personnel, moyens). Ce mur était destiné au carottage d'échantillons à différentes échéances sur lesquels les caractéristiques du béton ont été mesurées, en plus des observations visuelles. Deux campagnes ont été planifiées ; la première à 1 an d'âge, la seconde à 3 ans d'âge. Les prélèvements de béton ont permis de mesurer la porosité à l'eau, la profondeur de carbonatation et la perméabilité à l'oxygène. Les Figures 23.6, 23.7 et 23.8 montrent la campagne de carottages à 1 an. Le Tableau 23.5 donne les résultats de la campagne à 1 an et les propriétés mesurées à 90 jours durant l'étude en laboratoire, à titre de comparaison. Tous les paramètres sont comparables à ceux des essais en laboratoire. La valeur de la perméabilité à l'oxygène à 1 an est néanmoins plus faible que celle mesurée en laboratoire. Cet écart est attribué à l'hétérogénéité du béton de GBR qui limite la reproductibilité de ce type de mesure.

Tableau 23.5

Propriétés des bétons

Béton 20 % de gravillons de GBR	Stade conception	1 an
Porosité à l'eau à 90 jours [NF P 18-459, 2010]	14,6	14,4
Perméabilité à l'oxygène à 90 jours (10^{-18} m ²) [NF XP P18-463, 2011]	213	141
Profondeur de carbonatation à 90 jours (essais accéléré) (mm) [NF XP P 18-458, 2008]	7,1	–
Profondeur de carbonatation (mm) [NF EN 14630, 2007] (6 carottes)		4 (2,5 à 6)

Figure 23.6

Échantillons carottés à 1 an dans le mur « sacrificiel »



Crédit photo : Bouygues.

Figure 23.7

Vue sur le mur « sacrificiel » après carottage des échantillons



Crédit photo : Bouygues.

Figure 23.8

Échantillons carottés et test de profondeur de carbonatation



Crédit photo : Lerm.

Figure 23.9

Vue du pont après 2,5 ans



Crédit photo : Lerm.

23.7. Conclusion

Un pont-cadre classique du contournement ferroviaire Nîmes-Montpellier a été partiellement construit avec un béton de granulats recyclés. Le but était de démontrer que les bétons de granulats recyclés pouvaient être utilisés en ouvrage d'art sans modifier la formulation et la mise en œuvre, tout en maintenant les exigences de durabilité spécifiques au domaine. Les études en laboratoire ont montré que l'utilisation de 20 % ou de 40 % de gravillons de GBR dans le béton permettait de maintenir les indicateurs de durabilité dans la plage attendue. Bien que le retrait soit favorisé par les GBR, il reste cependant dans des limites admises. Aucune préparation particulière du GBR n'a été nécessaire,

et la mise en œuvre du béton n'a pas nécessité de précautions particulières a été régulière. Plus de deux ans après la construction (Figure 23.9), aucun défaut particulier n'est apparu et les paramètres de durabilité mesurés sur les échantillons carottés (porosité à l'eau, perméabilité à l'oxygène, profondeur de carbonatation, etc.) sont conformes aux prévisions. Cette expérience montre que l'emploi des gravillons de GBR peut être généralisé sans difficultés majeures, y compris dans les ouvrages d'art et à des taux probablement supérieurs à 20 %, compte tenu des résultats positifs obtenus avec la formule à 40 % de GR type 1. Une attention particulière doit cependant être apportée à l'augmentation du fluage (*cf.* chapitre 11).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Oc'Via Construction pour avoir permis cette opportunité, le groupe Setec pour son appui financier, LRM pour la fourniture des granulats de béton recyclé et Unibéton pour la production du béton.



Chapitre 24.

Bâtiment pour archives administratives : CD 77

Amor Ben Fraj¹, Sophie Decreuse²

Résumé – Ce chapitre présente une première expérience de construction d'un bâtiment utilisant des granulats de béton recyclé (GBR), réalisée dans le cadre du Projet National RECYBETON. L'ouvrage, destiné à l'archivage, est particulièrement sollicité (750 kg/m²). Il a nécessité 40 m³ de béton. Deux formules de béton ont été retenues, la première avec des granulats naturels (GN), la seconde avec 30 % de sable et 50 % de gravillons de GBR.

Une première campagne de caractérisation des bétons a été réalisée par le laboratoire de la société Cemex, où l'affaissement, le retrait, la résistance à la compression et le module d'élasticité ont été mesurés. Des essais de convenance ont ensuite été menés par le Cerema. Ils ont porté sur les propriétés du béton frais (affaissement) et sur les résistances en compression et en traction. Les résultats montrent que pour respecter les spécifications du béton de granulats naturels, la formulation du béton de GBR a nécessité une teneur en ciment plus élevée (+ 5 %), ainsi que l'utilisation d'un superplastifiant. De même, une augmentation du retrait (+ 40 %) et une diminution du module d'élasticité (– 17 %) ont été observés lorsque les GBR sont utilisés.

Durant la réalisation, le béton a été coulé en cinq livraisons. À chaque fois, l'affaissement au cône d'Abrams et la résistance en compression et en traction ont été mesurés. Par contre, le retrait et les propriétés de durabilité (porosité à l'eau, perméabilité à l'air et profondeur de carbonatation) n'ont été mesurées que sur un seul prélèvement de béton de GBR et de béton de granulats naturels. L'affaissement et les résistances sont les mêmes pour les deux types de béton. Mais le retrait, la porosité à l'eau et la perméabilité à l'air sont plus élevés, de 10 %, 20 % et 80 % respectivement, lorsque les GBR sont incorporés. La profondeur de carbonatation, après 1 mois, est 3 fois plus élevée dans le béton de GBR.

L'inspection détaillée du bâtiment, à la livraison et après 3 mois, n'a révélé aucun défaut ni aucune microfissure pouvant être associés à la présence des GBR. Les défauts observés (planéité, acier apparent, ségrégation) ne sont dus qu'à des problèmes de coffrage ou de vibration.

1. Cerema, Sourdun.

2. Cemex, Rungis.

24.1. Introduction

Aujourd'hui, les matériaux de construction sont au cœur des préoccupations écologiques et du développement durable, et ils en sont devenus l'un des enjeux stratégiques. Le recyclage du béton dans le béton offre une alternative prometteuse à l'épuisement des ressources naturelles. Dans ce contexte, le Conseil Départemental de Seine-et-Marne (CD77) a la volonté d'être un acteur territorial actif en matière d'éco-construction et d'éco-rénovation, en favorisant le rapprochement des différents acteurs locaux dans des projets d'éco-construction. Ainsi, le « Bâtiment CD77 », situé à Mity-Mory (Seine-et-Marne), dans la banlieue Nord-Est de Paris, a été le troisième chantier expérimental réalisé dans le cadre du Projet National RECYBETON. Il est probablement le premier bâtiment réalisé en France à base de béton incorporant des granulats de béton recyclé (GBR). Ce bâtiment a une superficie de 40 m² et il est destiné au stockage des archives. C'est un point critique du projet car la charge de service est de 750 kg/m². Cette particularité induit des dispositions particulières de dimensionnement de la dalle, compte tenu :

- de la déformation autorisée : la surcharge ne doit pas endommager les éléments mobiles pour le stockage des archives ;
- du fluage : l'utilisation de granulats recyclés induit une diminution du module différé du béton de GBR.

Afin d'avoir une meilleure connaissance de l'effet des GBR, des essais de durabilité ont été réalisés sur des éprouvettes de béton de GBR, d'une part, et des inspections détaillées ont été faites sur le bâtiment lui-même, d'autre part.

Pour atteindre les objectifs fixés, une équipe dédiée a été constituée au sein du Projet National RECYBETON. Elle a regroupé les représentants du CD77 (Maître de l'Ouvrage), les bureaux d'études et de contrôle associés, une entreprise de construction, Cemex (pour la fourniture des GBR, la production et la livraison des bétons) et le Cerema (responsable du contrôle qualité et de conception, des essais de durabilité et des inspections).

24.2. Projet du bâtiment CD77

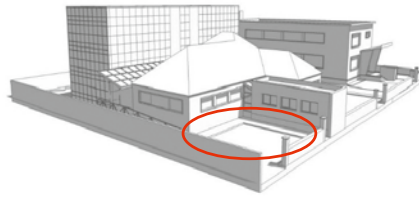
24.2.1. Présentation

Le bâtiment est situé à Mity-Mory (Seine-et-Marne, région Île-de-France). Sa superficie est d'environ 40 m² (Figure 24.1). Il est adossé à un bâtiment existant (Maison de la Solidarité) et il n'a pas vocation à recevoir du public. La construction, destinée à stocker des archives, comprend des fondations superficielles, une dalle en béton armé, des murs banchés (avec trois fenêtres), et une liaison avec le bâtiment existant (canopée-verrière). Une rampe en béton armé doit permettre aussi l'accès aux personnes à mobilité réduite.

D'un point de vue technique, la faible quantité de béton requise (40 m^3) a conduit à n'envisager qu'une seule formule de béton de GBR, où 30 % du sable et 50 % des gravillons naturels ont été substitués par des GBR : 13 m^3 , 7 m^3 , 13 m^3 et 7 m^3 ont été les volumes de béton nécessaires pour les fondations, la dalle, les murs banchés et la toiture terrasse, respectivement. La résistance caractéristique exigée à 28 jours était de 25 MPa.

Figure 24.1

Localisation du bâtiment



Source : CD 77.

24.2.2. Matériaux et formules

Le ciment utilisé est un CEM II/A-L 42,5 R CP2. Un sable 0/4 et un gravillon 4/20 calcaires ont été utilisés comme granulats naturels. Pour améliorer la rhéologie du béton de granulats naturels, des cendres volantes et un plastifiant ont été incorporés. Ce dernier a été remplacé par un superplastifiant pour le béton de GBR. Les GBR utilisés en substitution partielle des granulats naturels ont été fournis par Cemex. Leur production est présentée ci-après.

24.2.2.1 Granulats de béton recyclé (GBR)

Dans le cas général, après démolition d'un bâtiment ou d'un ouvrage, les blocs de béton sont transportés sur une plateforme de recyclage, ou bien traités sur place avec des matériels mobiles (Figure 24.2). Ils subissent un premier concassage qui permet de réduire la taille des blocs et d'éliminer les armatures. Les matériaux sont alors à nouveau concassés (concassage secondaire), avant d'être criblés. Les polluants, tels le bois et le plastique, sont éliminés.

Dans le cas présent, les bétons de démolition, issus de différents sites de déconstruction parisiens, ont été collectés par Cemex sur les quais de la Seine à Paris. Ils ont été ensuite transférés par barge à la carrière de Bouafles (Normandie), avec les péniches vides qui avaient apportés précédemment des granulats naturels à Paris. Ainsi, ce système de fret n'a nécessité aucune énergie supplémentaire pour transporter les matériaux destinés au recyclage. Les GBR ont été produits à la carrière de Bouafles (Figure 24.2), à l'aide :

- de cisailles hydrauliques pour enlever les armatures du béton de démolition,

- d'un concasseur à mâchoires pour produire un 0/100 mm criblé ensuite en deux coupures 0/40 et 40/100 mm,
- d'un concasseur giratoire pour réduire la fraction 40/100 mm, criblée ensuite en 0/4 mm et 4/20 mm.

50 tonnes de sable de GBR 0/4 mm et 150 tonnes de gravillons de GBR 4/20 mm ont été ainsi produites. Au regard de la norme NF EN 206/CN, ces matériaux sont de type 1 et leur catégorie est CR_B. Les propriétés physiques des matériaux naturels et recyclés sont résumées dans le Tableau 24.1. Comme prévu, l'ancien mortier diminue la masse volumique du sable et des gravillons de GBR, de 16 % pour ces matériaux. La présence du mortier et sa porosité élevée sont à l'origine de la forte absorption d'eau des GBR, qui est 8 et 15 fois supérieure à celle du sable et des gravillons naturels, respectivement.

Figure 24.2

Production des granulats de béton recyclé



Source : Cemex.

Tableau 24.1

Propriétés physiques des granulats naturels (GN) et recyclés (GBR)

Matériaux	Masse volumique (t/m ³) [NF EN 1097-6, 2014]	Absorption d'eau (%) [NF EN 1097-6, 2014]
Sable naturel 0/4 mm	2,63	0,52
Sable de GBR 0/4 mm	2,22	8,3/7,3*
Gravillon naturel 4/20 mm	2,67	0,66
Gravillon de GBR 4/20 mm	2,28	5,5

* la première valeur a été mesurée sur la fraction 0/4, la seconde sur la fraction 0,063/4

24.2.2.2. Bétons

Le bâtiment étant situé en région Île-de-France. Ainsi, un gel modéré (XF1) et un risque élevé de corrosion par carbonatation (XC4) ont été considérés, au regard de la norme [NF EN 206/CN, 2014]. La résistance caractéristique minimale à la compression et le rapport maximum liant équivalent/eau visés étaient alors de 25MPa et de 0,6, respectivement. Pour faciliter la mise en œuvre du béton, la

classe de consistance S4 a été retenue, soit un affaissement de 160 à 210 mm. Il faut noter qu'il a fallu remplacer le plastifiant par un superplastifiant et ajouter un agent de viscosité pour maintenir la rhéologie requise (affaissement) du béton de GBR. Les formules du béton de granulats naturels et du béton de GBR sont présentées Tableau 24.2.

Tableau 24.2

Formule du béton de granulats naturels et du béton de GBR

Constituants		Béton de GN (témoin)	Béton de GBR
Granulats			
Sable naturel 0/4 mm	kg	826	543
Sable de GBR 0/4 mm	kg	–	233
Gravillon naturel 4/20	kg	1041	489
Gravillon de GBR 4/20 mm	kg		489
Liants			
CEM II/A-L 42,5 R CP2	kg	243	255
Cendres volantes	kg	61	61
Adjuvants			
Agent entraîneur d'air	%	0,15	
Plastifiant	%	0,60	
Agent de viscosité			0,33
Superplastifiant	%		0,80
Eau efficace	L	166	155
Liant équivalent	kg	280	292
E_{eff} /Liant équivalent		0,59	0,53
G/S		1,26	1,26

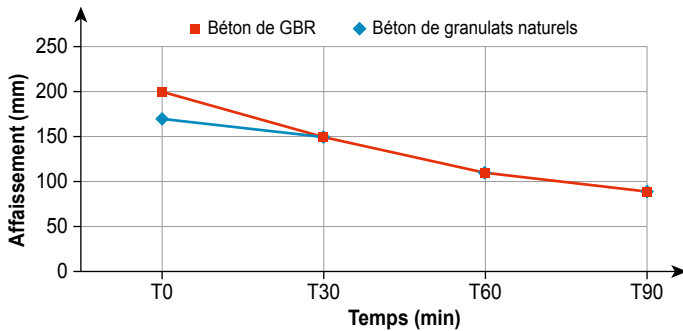
24.2.3. Étude préliminaire et tests de convenance

Une étude préliminaire du béton de granulats naturels et du béton de GBR a été effectuée par le laboratoire Cemex. Elle a montré la nécessité d'accroître de 5 % la teneur en ciment du béton de GBR pour atteindre la même résistance à la compression que la formule témoin (Tableau 24.2). L'utilisation d'un superplastifiant a été aussi nécessaire pour améliorer la rhéologie du béton de GBR.

La Figure 24.3 présente l'évolution de l'affaissement en fonction du temps (en minutes). Elle est comparable pour les deux bétons, excepté entre T0 et T30, où l'affaissement du béton de GBR diminue plus rapidement. En effet, les GBR n'ont pas été saturés et leur porosité élevée entraîne une absorption d'eau conséquente dès les premiers contacts entre les différents constituants, dans le malaxeur. Ce phénomène affecte l'affaissement initial du béton. À T90, l'affaissement mesuré est le même pour les deux bétons, ce qui confirme l'effet bénéfique attendu du superplastifiant dans le béton de GBR. Les essais de convenue, réalisés par le Cerema, ont montré les mêmes tendances. L'affaissement mesuré était de 185 mm, 185 mm et 120 mm, à T30, T60 et T90, respectivement.

Figure 24.3

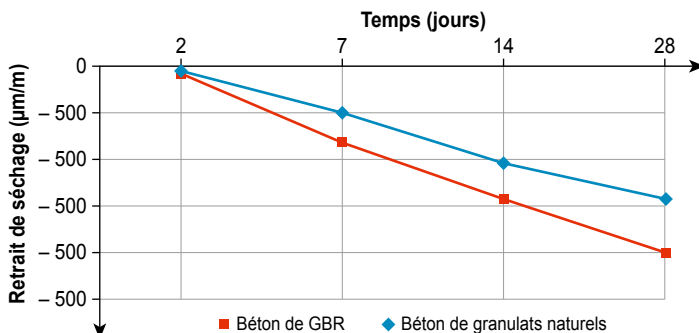
Rhéologie du béton de granulats naturels et du béton de GBR



Pour mesurer le retrait, des éprouvettes $7 \times 7 \times 28$ cm ont été coulées. Chaque valeur présentée est la moyenne de trois mesures. Sur la Figure 24.4, le retrait de séchage des deux bétons (granulats naturels et GBR) est donné à 2, 7, 14 et 28 jours. Comme on peut le voir, le retrait à 28 jours du béton de GBR est supérieur de 40 % à celui du béton de granulats naturels. L'ancien mortier des GBR et le taux plus élevé de ciment dans le béton de GBR expliquent cette différence.

Figure 24.4

Retrait du béton de granulats naturels et du béton de GBR



Le Tableau 24.3 présente les propriétés mécaniques à 28 jours des deux bétons. Les résultats obtenus confirment les comportements attendus : en raison de leur plus faible module d'élasticité, les GBR réduisent de 17 % le module d'élasticité du béton ; la résistance caractéristique à la compression du béton de GBR est inférieure de 4 MPa à celle du béton de granulats naturels. Les deux bétons atteignent toutefois, sans problème, la résistance caractéristique en compression requise pour leur utilisation dans le bâtiment (> 25 MPa).

Tableau 24.3

Propriétés mécaniques du béton de GN et du béton de GBR

Propriétés	Béton de GN	Béton de GBR
Rc_28 (MPa)	38,9	34,7
E_28 (GPa)	32,5	27,1

24.2.4. Réalisation du chantier

Comme expliqué précédemment, le point critique du projet est la charge de service de 750 kg/m². Des dispositions spécifiques ont alors été prises, au regard de la norme EN 1992-2-1. La flèche admise a été limitée à L/500 (L/250 dans les autres cas), afin d'éviter l'endommagement des éléments mobiles de stockage des archives. Par ailleurs, pour prendre en compte la diminution du module d'élasticité (augmentation du fluage) avec l'utilisation des GBR, un coefficient d'équivalence de 27 (15 pour les bétons de granulats naturels) a été considéré dans le calcul de la section d'armatures [de Larrard *et al.*, 2014]. En conséquence, la section d'acier a été doublée (2 × TS25), comme illustré Figure 24.5.

Figure 24.5

Armatures de la dalle



Crédit photo : Cerema.

Figure 24.6

Coulage du BPE



Crédit photo : Cerema.

Figure 24.7

Surfaçage du béton frais



Crédit photo : Cerema.

Figure 24.8

Vibration du béton frais



Crédit photo : Cerema.

Figure 24.9

Coffrage des voiles en béton armé



Crédit photo : Cerema.

24.2.5. Propriétés des bétons du chantier

À chaque livraison de béton (BPE), des essais ont été réalisés par le Cerema Île-de-France : l'affaissement a été mesuré pour vérifier la rhéologie requise (i.e. la classe de consistance) ; des éprouvettes cylindriques ont été coulées pour les essais mécaniques (compression et traction). Pour les essais de retrait et de durabilité (porosité à l'eau, perméabilité au gaz, profondeur de carbonatation), seul le béton de la dalle (béton de GBR) et de la rampe (béton de granulats naturels) ont été caractérisés. Le Laboratoire Eco-Matériaux (LEM) du Cerema Île-de-France a été chargé de la préparation, du conditionnement et de la mesure de ces propriétés.

Le Tableau 24.4 présente les propriétés des différents bétons livrés. La dernière colonne concerne celles du béton de granulats naturels ayant servi au coulage de la rampe.

À l'exception du béton coulé le 22 octobre 2015, l'affaissement mesuré a toujours été pratiquement le même (200 mm ; classe S4). À cette date, il faisait plutôt froid (13 °C), humide (HR 88 %), et il pleuvait. La résistance caractéristique en compression requise (25 MPa) a été atteinte pour tous les mélanges et la résistance en traction a été la même pour les deux types de bétons.

Comme prévu, le retrait du béton de GBR est plus important que celui du béton de granulats naturels. Il est dû à la présence de l'ancien mortier des GBR et au surcroît de ciment dans le béton de GBR, pour atteindre la résistance à la compression requise. Toutefois, l'augmentation relative du retrait (+ 12 %), lorsque les GBR sont incorporés, reste faible en comparaison de celui mesuré au moment de l'étude préliminaire (+ 40 %).

Bien qu'un supplément de ciment ait été ajouté au béton de GBR, ce qui conduit à un rapport eau/ciment plus faible, et donc aussi une porosité plus faible de la nouvelle pâte de ciment, on constate que la porosité totale du béton de GBR est supérieure de 20 % à celle du béton de granulats naturels. Les GBR étant poreux, ils augmentent donc considérablement la porosité du béton qui les incorpore. Cette augmentation affecte aussi la profondeur de carbonatation et la perméabilité au gaz. En effet, les GBR peuvent être assimilés à un matériau composite formé d'un granulat conventionnel associé à un ancien mortier, plus une auréole de transition (AT) entre ces deux phases. Une auréole de transition existe aussi entre le GBR et la nouvelle matrice cimentaire environnante. Ces ATs, et plus particulièrement l'ancienne, sont considérées comme des chemins privilégiés pour les agents agressifs. Les résultats obtenus sont cohérents avec les recherches antérieures, où il a été constaté que la profondeur de carbonatation a augmenté avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés [Silva *et al.*, 2015b].

Tableau 24.4

Propriétés des bétons du chantier

Propriétés	Béton de GBR				Béton de GN	
	Date de coulage					
	06 Oct	09 Oct	15 Oct	22 Oct	30 Oct	
A (mm)	205	200	200	240	205	
R _{C28} (MPa)	38,4	35,0	36,2	34,5	33,3	
R _{t28} (MPa)	3,4	3,4	3,3	3,2	3,3	
ε _{28 days} (µm/m)	418	n.d	n.d	n.d	373	
P _{eau_90 jours} (%)	18	n.d	n.d	n.d	15	
K _{air_90 jpurs} (× 10 ⁻¹⁸ m ²)	180	n.d	n.d	n.d	100	
X _d (mm)	6	n.d	n.d	n.d	2	

24.2.6. Observations, inspections

Concernant la mise en œuvre, les compagnons ont indiqué que le béton recyclé se comportait de la même façon qu'un béton traditionnel.

Le 3 décembre 2015, une première inspection du bâtiment (Figure 24.10) a été faite, après décoffrage. Elle a été effectuée conformément à l'Instruction Technique du Ministère des Transports, partie suivi et entretien des ouvrages d'art, du 19 octobre 1979 et révisé en 2010. Les parements ont été également examinés selon les critères de la norme FD P 18-503 [NF FD P 18-503, 1989].

Figure 24.10

Ouvrage après décoffrage



Crédit photo : Cerema.

Durant cette inspection, les observations suivantes ont été faites :

- deux fissures verticales ont été notées : la première d'une largeur de 0,4 mm et de 20 cm de longueur, située sur le mur Nord ; la seconde d'une largeur de 0,1 mm, située dans les fondations Est. Ces deux fissures peuvent provenir d'un retrait empêché ou d'un défaut de coulage ;
- des traces de rouille sur l'intrados du plancher et sur le mur Ouest (Figure 24.11) : l'utilisation d'un coffrage mal nettoyé semble être à l'origine de ce défaut de coulage ;
- armature apparente : ici, l'épaisseur de couverture du béton n'a pas été respectée, ce qui explique ce défaut ;
- ségrégations (Figure 24.12) : la non-étanchéité du coffrage et l'absence de vibration expliquent ce phénomène ;
- défauts de planéité (Figure 24.13) : situées sur les murs Nord et Est, ces malfaçons sont la conséquence d'un défaut de montage du coffrage ;
- il n'y a aucune matière indésirable (bois, plastique, etc.) à la surface du béton.

Ces observations montrent clairement que les défauts découverts sont dus à une mise en œuvre et à des équipements défectueux. Leur origine n'est pas liée à l'utilisation du béton de GBR.

Une deuxième inspection, effectuée par Cerema Île-de-France, a porté plus spécifiquement sur l'observation des parements. Trois paramètres ont été considérés ; la planéité, le bullage et la couleur. Les classements suivants ont été attribués :

- planéité P3 : la planéité globale est de 2 à 5 mm, la planéité locale est de 1 à 2 mm ;
- bullage E (3-3-3) : le premier index indique que la surface maximale des bulles est de 0,3 cm², avec une profondeur maximale de 2 mm et une

surface maximale de bulles de 2 % ; le second correspond à des zones de concentration de bulles inférieures à 5 % ; le dernier caractérise les défauts localisés ;

- couleur T3 : la différence de couleur (grise) entre zones adjacentes et zones extrêmes est 1 et 2, respectivement.

Ces observations satisfont les critères d'acceptation pour les parois minces, selon l'article « parois minces en béton » du fascicule 65 du CCTG.

Figure 24.11

Rouille et bullage



Crédit photo : Cerema.

Figure 24.12

Phénomène de ségrégation



Crédit photo : Cerema.

Figure 24.13

Défaut de planéité



Crédit photo : Cerema.

24.3. Besoins de recherche

La construction du bâtiment CD77 n'a soulevé aucune difficulté particulière. L'utilisation de GBR n'a pas changé les pratiques de mise en œuvre du béton. Excepté pour l'adjuvant utilisé (superplastifiant), la formulation des mélanges a été identique entre béton de GBR et béton de granulats naturels.

La charge de service étant le point critique de ce projet, et il a été nécessaire de tenir compte de la diminution (arbitraire) du module d'élasticité différé du béton, lorsque les GBR ont été utilisés. Pour une meilleure estimation de ce paramètre, d'autres recherches sur le fluage des bétons de GBR sont nécessaires. L'effet de plusieurs paramètres, tels le rapport e/c, le taux de substitution des granulats naturels par des GBR et l'âge d'application de la charge devraient alors être considérés.

24.4. Perspectives pour de nouveaux projets

Comme la construction du bâtiment d'archivage n'a soulevé aucune difficulté particulière, le CD77 a décidé de lancer un autre projet plus important. Un collège, basé à Montevrain (département de Seine-et-Marne), sera construit en 2018. Le CD77 a la volonté d'imposer l'utilisation de GBR dans les bétons. Comme le bâtiment sera accessible au public, la teneur maximale en GBR dans le béton sera alors limitée à 20 % (selon les normes en vigueur).

Même si le Projet National RECYBETON sera clos au moment du lancement du chantier, l'équipe du présent projet a été invitée à participer à la rédaction des pièces techniques de l'appel d'offres.

24.5. Conclusions

Pour ce projet, le défi consistait à construire un bâtiment avec un taux élevé de GBR, au-delà des limites normatives actuelles, sans modifier le processus de formulation et de mise en œuvre. Un an après sa construction, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- les granulats de béton recyclé fabriqués pour le projet étaient de bonne qualité. Ils étaient classés de « type 1 », selon la norme [NF EN 206/CN, 2014] ;
- un superplastifiant a été utilisé dans le béton de GBR afin d'améliorer sa rhéologie. A T90, le même affaissement a été obtenu à la fois pour le béton de GBR et le béton de granulats naturels ;
- les tendances habituelles ont été retrouvées (diminution du module d'élasticité, augmentation du retrait) lorsque des GBR sont incorporés. Pour la résistance à la compression requise, une légère augmentation de la teneur en ciment de 5 % a été nécessaire pour le béton de GBR ;
- pour tenir compte de la charge de service élevée, la déformation autorisée a été limitée à L/500. Cette disposition particulière doit protéger les éléments mobiles, pour le stockage des archives, sans les endommager ;
- la diminution du module différé, lorsque les GBR sont utilisés, a induit un doublement de la section des armatures dans la dalle ;
- d'un point de vue pratique, la mise en œuvre du béton de GBR a été la même que celle du béton de granulats naturels sur le chantier de ce projet, sans difficulté particulière ;
- une inspection détaillée du bâtiment a montré certains défauts de coulage et de mise en œuvre. Mais aucun défaut n'a été attribué à l'utilisation des granulats de béton recyclé.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le CD77 pour avoir permis la construction de ce bâtiment avec un taux élevé de matériaux recyclés, Cemex pour la fourniture des granulats de béton recyclé, et le Cerema pour le contrôle de la conception et de la qualité.

Chapitre 25

Applications industrielles : murs et trottoirs

P. Vuillemin¹, A. Cudeville²

Résumé – Ce chapitre présente l'un des premiers chantiers expérimentaux en granulats de béton recyclés (GBR) réalisés en 2014/2015 dans le cadre du Projet National RECYBETON.

Les objectifs étaient :

- de produire des granulats de béton recyclé (GBR), i.e. des sables et des gravillons de GBR, ayant des caractéristiques suffisantes pour pouvoir être utilisés dans des bétons d'ouvrages,*
- d'étudier diverses formules de béton avec un taux de substitution des granulats « traditionnels » – ou granulats naturels (GN) – par des GBR, allant de 0 à 100 %,*
- de sélectionner une composition permettant de produire un béton C25/30 pour une utilisation structurale,*
- de produire ce béton dans une centrale de BPE, en utilisant uniquement les matériels et équipements existants,*
- de couler sur chantier ce béton dans des éléments armés, tels que des murs et des trottoirs architectoniques (béton désactivé coloré).*

La principale conclusion est que l'utilisation des gravillons de GBR peut être recommandée, même à des taux de substitution élevés, alors que l'utilisation du sable de GBR est plus délicate. Le recours à un superplastifiant permet d'ajuster la maniabilité et la rhéologie des bétons de GBR.

Dans le cas présent, les GBR étaient de qualité supérieure. Malgré cela, un taux important de sable de GBR a engendré des propriétés de durabilité moindres : retrait, porosité à l'eau, perméabilité aux gaz ont augmenté rapidement avec le pourcentage de sable substitué. Ce problème doit être cependant relativisé car le but était de produire un béton C25/30 pour des applications plutôt modestes. Une durabilité élevée n'était donc pas visée, et les valeurs moyennes obtenues aux différents critères permettent d'estimer que la durabilité des bétons était potentiellement atteinte.

1. EQIOM (ex HOLCIM France), Paris.

2. CLAMENS, Villeparisis.

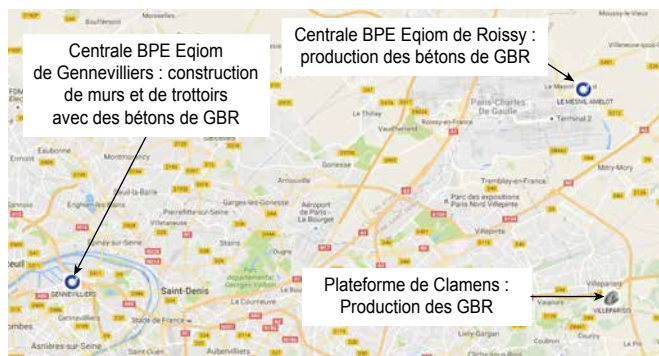
Enfin, il importe de signaler aux futurs producteurs de bétons de GBR la nécessité d'anticiper le nombre de silos de stockage des granulats à la centrale, pour pouvoir gérer 4 à 6 coupures et variétés de granulats, etc.

25.1. Présentation du projet

Parallèlement aux études en laboratoire, le Projet National RECYBETON a sollicité des volontaires pour réaliser des chantiers expérimentaux avec des bétons de GBR. Les sites concernés par la présente action sont repérés sur la Figure 25.1

Figure 25.1

Localisation des sites Clamens et Eqiom



Source : Eqiom-Clamens.

25.1.1. Clamens

Clamens est une entreprise leader dans le recyclage des déchets de construction et de démolition (DCD). Elle produit annuellement environ 600 000 tonnes de matériaux recyclés. Sur sa plateforme de Villeparisis (Figure 25.2), trois installations sont concernées :

- un poste de concassage-criblage avec un concasseur à percussion qui réduit les blocs de béton pour générer une grave 0/31,5,
- une installation de lavage-recyclage où les matériaux sont lavés sous eau, tamisés et où les boues sont cyclonnées pour être séparées des granulats,
- une centrale d'enrobage permettant de traiter l'intégralité du 0/31,5 avec un faible pourcentage de liant hydraulique, de façon à améliorer les propriétés mécaniques. Ces matériaux sont destinés aux applications routières.

Cependant, les exigences physiques, mécaniques et chimiques des granulats destinés aux travaux routiers sont moindres que celles des granulats pour

les bétons de bâtiments. C'est la raison pour laquelle Clamens commence à produire aujourd'hui des petites quantités de gravillons et des sables de GBR de meilleure qualité, issus de DCD sélectionnés, contrôlés notamment en termes de propreté et de teneur en sulfate.

Figure 25.2

Plateforme Clamens à Villeparisis (77)



Crédit photo : Clamens.

25.1.2. EQIOM Bétons

La société EQIOM Bétons (Holcim Bétons avant fin 2015) est un acteur majeur du Béton Prêt à l'Emploi en France, avec une production de l'ordre de 3 millions de m³ de béton par an. Elle est très active dans la recherche de solutions liées au développement durable.

Son étude des bétons de GBR a consisté principalement en une vaste campagne d'essais en laboratoire, sur 8 formules de bétons C25/30, repérées F0 à F7.

F0 est le béton de référence (témoin) régulièrement produit. Il ne contient que des granulats naturels (GN). F1 à F7 sont des bétons qui contiennent divers taux de GBR, allant de 0 à 100 %.

Pour tous les bétons, la rhéologie jusqu'à 90 minutes, la résistance à la compression et à la traction, le retrait, la perméabilité à l'air, la porosité et le coefficient apparent de diffusion des chlorures ont été mesurés. En outre, le module d'élasticité a été mesuré sur les bétons paraissant les mieux appropriés pour une utilisation en béton armé (F2/F3/F4/F6).

25.2. Matériaux, bétons et propriétés

La centrale de BPE de Roissy (Figure 25.3) a été choisie en raison de sa proximité avec la plateforme Clamens, au Nord de Paris. Cette centrale livre actuellement les bétons pour la plupart des projets de génie civil pour le Groupe Aéroports de Paris/ADP. Ces bétons sont fabriqués aujourd'hui avec des granulats naturels de bonne qualité, à savoir les sables et gravillons calcaires concassés des Carrières du Boulonnais.

Figure 25.3

Centrale BPE de Roissy



Crédit photo : Eqiom.

25.2.1. Fabrication des granulats de bétons recyclés (GBR) à la plateforme Clamens

Clamens a commencé par stocker des lots de bétons de démolition, notamment des blocs issus de pieux en béton. Une attention particulière a été apportée pour s'assurer que les déchets de béton contenaient le moins possible de plâtre, contrôlée par la teneur en sulfate. Les photos ci-dessous (Figures 25.4, 5, 6 et 7) illustrent les différentes étapes de la production des granulats de béton recyclé (GBR).

Pour des raisons commerciales, Clamens a produit un sable 0/4 et deux gravillons 4/10 et 10/20 de GBR.

Figure 25.4

Déchets de construction stockés sur la plateforme



Crédit photo : Eqiom.

Figure 25.5

Blocs issus de pieux en béton sélectionnés pour le Projet National RECYBETON afin de produire des GBR



Crédit photo : Eqiom.

Figure 25.6

À gauche : sable de GBR destiné aux travaux de remblaiement. À droite : sable de GBR lavé destiné aux bétons de structure



Crédit photo : Eqiom.

Figure 25.7

Les blocs de béton contenant du plâtre ont été écartés d'un usage en granulats de béton recyclé (GBR)



Crédit photo : Eqiom.

Grâce aux précautions prises par Clamens pour élaborer de « bons granulats », le sable et les gravillons de GBR obtenus ont été classés CR_B, type 1 (voir les analyses présentées Tableau 25.1), c'est-à-dire la meilleure catégorie des granulats recyclés selon la norme [NF EN 206/CN, 2014]. Le coefficient d'absorption d'eau de ces GBR varie entre 5,8 et 6,6 %, valeur faible pour des granulats recyclés (valeur fréquemment comprise entre 7 à 9 %).

Les matériaux concassés ont été lavés, afin d'obtenir des produits propres. Pour le sable, la valeur de bleu (0,4), la teneur en fines (0,7 %) et le module de finesse (3,2) indiquent que le sable de GBR est de haute qualité. Cependant, comme la norme EN 206 limite à 30 % l'utilisation de granulats recyclés pour la classe d'exposition XC1, classe de résistance C25/30, le béton F3 30S30G (substitution de 30 % de granulats naturels par des GBR) a finalement été retenu pour les bétons du chantier. Néanmoins, le pourcentage des gravillons de GBR aurait pu atteindre 50 à 60 %, tout en conservant des résultats satisfaisants (voir les essais en laboratoire).

Tableau 25.1

Analyses en laboratoire des GBR Clamens et classification selon [NF EN 206/CN, 2014]

Essai	Norme		Sable de GBR 0/4		Gravillon de GBR 4/10		Gravillon de GBR 10/20	
Los Angeles	[NF EN 1097-2, 2010]	%					37	LA40
Micro-Deval	[NF EN 1097-1, 2011]	%					29	–
Teneur en fines	[NF EN 933-1, 2012]	%	0,7	–	0,1	–	0,3	–
Aplatissement	[NF EN 933-3, 2012]	%					1,8	F40
Module de finesse	[NF EN 12620, 2008]	–	3,2	–				
Polluants organiques	[NF EN 1744-1, 2014]	–	négatif		–			
Absorption d'eau	[NF EN 1097-6, 2014] art. 8 et 9	%	5,8	–	6,4	–	6,6	–
Masse volumique réelle	[NF EN 1097-6, 2014] art. 8 et 9	Mg/m ³	2,33	≥ 2	2,25	≥ 2	2,18	≥ 2
Valeur de bleu	[NF EN 933-9, 2013]	g	0,4	–				
Classification	[NF EN 933-11, 2009]	%			100	Rcu95	100	Rcu95
Soufre total	[NF EN 1744-1, 2014] art. 11	%	0,8	–	0,14	–	0,13	–
Alcalins actifs Na ₂ Oeq	[LPC n° 37, 1993]	%	0,0196	–	0,0247	–	0,0369	–
Sulfates solubles dans l'eau (SO ₄)	[NF EN 1744-1, 2014] art. 10.2	%	0,02	SS0,2	0,04	SS0,2		
Chlorures solubles dans l'acide	[NF EN 1744-5, 2007]	%	0,03	–	0,014	–	0,017	–
Influence sur le temps de prise	[NF EN 1744-6, 2007]	min	0	A10	10	A10	10	A10
					CR _B		CR _B	CR _B

Figure 25.8

Big-bags de GBR : 10/20, 4/10, 0/4



25.2.2. Étude en laboratoire des différentes compositions de béton

Pour des raisons de disponibilité, les études ont été faites au laboratoire EQIOM de Camon (banlieue d'Amiens), Hauts-de-France. Les 8 compositions étudiées sont présentées Tableau 25.2.

Le béton de référence F0, régulièrement produit à la centrale BPE de Roissy, offre une très bonne résistance pour un dosage en ciment modéré, grâce aux granulats de bonne qualité.

Les 7 bétons de GBR sont repérés par leur teneur en GBR. Par exemple, F3 30S30G signifie que 30 % de sable de GBR remplacent 30 % du sable naturel et que 30 % de gravillons de GBR remplacent 30 % des gravillons naturels.

Tous les bétons ont été formulés avec la même quantité de ciment de 280 kg/m³ et d'eau (efficace) de 168 litres/m³, soit un rapport eau/ciment de 0,6.

La consistance et la rhéologie ont été ajustées en modifiant le dosage et le type d'adjuvant, afin d'obtenir un affaissement de classe S4 pendant 60 à 90 minutes. Ainsi, un plastifiant réducteur d'eau a toujours été ajouté à raison de 0,35 % de la masse de ciment et le dosage en superplastifiant a varié entre 0,5 % et 1,05 %, selon la difficulté à garder la maniabilité requise.

Il ressort très clairement des essais que le sable de GBR exerce une grande influence sur les propriétés du béton, car tous les mélanges contenant plus de 30 % de sable de GBR ont vu leurs propriétés affectées (Tableau 25.2) :

- diminution de la résistance à la compression, à la traction et du module d'élasticité ;
- augmentation du retrait (Figure 25.9) ;
- augmentation de la porosité et de la perméabilité aux gaz et, par conséquent, baisse de la durabilité à long terme ;
- porosité fortement dépendante de la présence des GBR, avec une valeur de 15,7 % dans le béton F3 contre 13,5 % pour le béton avec les granulats naturels (F0).

Figure 25.9

Retraits en fonction du temps

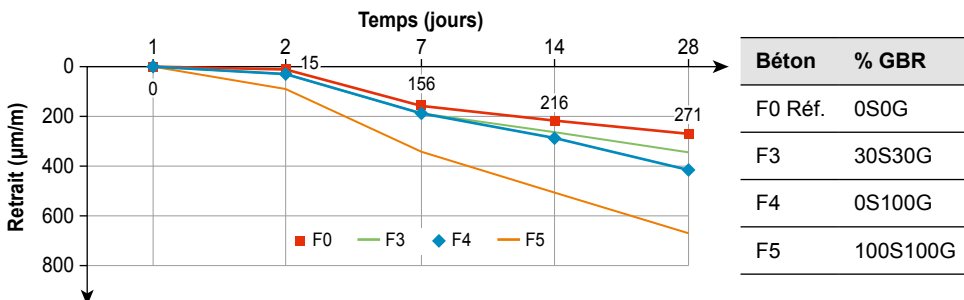


Tableau 25.2

Résultats des essais en laboratoire des 8 compositions de béton

Béton	F0 Référence	F1 30S0G	F2 0S30G	F3 30S30G	F4 0S100G	F5 100S100G	F6 10S10G	F7 100S0G
N° échantillon	150 639	150 632	150 633	150 634	150 635	150 636	150 637	150 638
Sable naturel 0/4 calcaire concassé de Ferques (kg)	924	647	924	647	924		832	
Gravillon naturel 4/20 calcaire concassé de Ferques (kg)	999	999	699	999			899	999
Sable de GBR 0/4 Clamens (kg)		277		277		924	92	924
Gravillon de GBR 4/10 Clamens (kg)			100	100	333	333	33	
Gravillon de GBR 10/20 Clamens (kg)			200	200	666	666	67	
CEMII/B-S 42,5 N CP1 Héming (kg)	280	280	280	280	280	280	280	280
Eau (efficace) (l)	168	168	168	168	168	168	168	168
ChrysoDelta CER (%)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35		0,35
Chryso Optima 175 (%)	0	1,05	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,9
Température air T0 (°C)	16	13,8	15,4	15,3	15,2	14,1	15,7	11,4
Température béton T0 (°C)	17,1	15,5	17	17,1	17,7	15	16,7	12,4
Affaissement T0 (mm)	165	190	190	180	200	200	160	180
Affaissement T30 (mm)	135	180	180	180	200	200	130	180
Affaissement T60 (mm)	100	165	180	160	185	200	115	170
Affaissement T90 (mm)	80	160	175	120	185	180	90	170
MV (kg/m ³)	2 409	2 376	2 362	2 340	2 272	2 112	2 361	2 278
Teneur en air (%)	1,5	2,3	1,8	2,3	1,7	6	2,3	2,5
Rc 1J (MPa)	4,05	5,8						
Rc 7J (MPa)	33,2	34,3	32,6	32,9	25,8	17,3	28,1	23,1
Rc 28J (MPa)	49,3	47,9	43,8	43,8	33,5	24	40,5	33,2
Résistance à la flexion (MPa)	3,56	3,27	3,47	3,29	2,8	2,1	2,9	
Retrait à 28J (µm/m)	271	377	236	346	407	663	361	
Module d'élasticité à 28J (MPa)			39 722	38 047	32 482	39 200		
Porosité (%)	13,8	14,1	15	15,7	18,6	21,5	14,9	

25.3. Construction de murs et de trottoirs à Genevilliers

25.3.1. Production du béton

Clamens a fourni au total 100 tonnes de sable de GBR 0/4 et 200 tonnes de gravillons de GBR 4/10 et 10/20 :

- la centrale de BPE a préalablement préparé un mélange à 33 % de gravillons de GBR 4/10 et 67 % de gravillons de GBR 10/20, car un seul silo était disponible pour les gravillons de GBR ;
- sélection du béton : il a été décidé de réaliser le chantier expérimental avec un béton contenant 30 % de sable de GBR et 30 % de gravillons de GBR, selon la formule F3. Les raisons sont que les gravillons de GBR ont un « moindre » impact sur les propriétés du béton que le sable de GBR, qui altère sensiblement la rhéologie, la résistance, en plus du coût et de la durabilité. Néanmoins, il eut été possible d'utiliser jusqu'à 50 % de gravillons de GBR.

Selon la norme [NF EN 206-1/CN, 2014], le béton F3 est désigné par : « BPS NF EN 206-1/CN HB Voile C25/30 CEM IIB/S 42,5 N CE CP1 NF, D_{\max} 20 mm Recyclé, S3 Affaissement 100 à 150 mm, XF1-XC3-XC4-XD1, CL 0,4 ».

Le béton a été malaxé pendant 58 secondes jusqu'à atteindre la stabilisation du wattmètre, conformément à la norme (qui spécifie 55 secondes de malaxage minimum).

25.3.2. Livraison et mise en place du béton

Le béton a été transporté par camions toupie de 7,5 m³ jusqu'au chantier de Genevilliers situé à 30 km de la centrale de Roissy. Le temps de transport par l'autoroute A1, souvent encombrée au nord de Paris, a varié entre 1 et 2 heures : la rhéologie du béton a alors été ajustée en utilisant un mélange de plastifiant et de superplastifiant pour assurer au béton une consistance S3.

Sur chantier, il a fallu une heure pour couler le béton dans des trottoirs et des murs armés (Figures 25.10 et 25.11). Pour les trottoirs, un pigment jaune a été ajouté au béton pour obtenir une couleur « ocre savane ». Le béton a été coulé sans difficulté. La température de l'air, début février, était assez basse (4 à 8 °C). L'entrepreneur n'a pas signalé les problèmes liés au béton de GBR durant les phases de coulage.

Une inspection en octobre 2016 a montré que les ouvrages en béton de GBR coulées en 2015 ne présentaient aucune pathologie. Les parements des murs sont satisfaisants, avec un très petit bullage. Sur les trottoirs, il n'y a qu'une seule fissure transversale située là où un joint n'avait pas été scié.

Figure 25.10

Construction de trottoirs avec un béton de GBR pigmenté de couleur « ocre savane »



Crédit photo : Eqiom.

Figure 25.11

Construction de différents murs en béton de GBR



Crédit photo : Eqiom.

25.4. Conclusion

Les granulats de béton recyclé (GBR) contiennent non seulement les granulats naturels originaux, mais aussi de la pâte de ciment hydraté. Cette pâte réduit la masse volumique, augmente la porosité et donc l'absorption d'eau des GBR.

Il est généralement admis que si l'on n'utilise que du sable naturel, alors jusqu'à 30 % de gravillons naturels peuvent être substitués par des gravillons de GBR sans que cela n'affecte significativement les propriétés mécaniques du béton. Si le taux de substitution augmente, le retrait et le fluage augmentent, et la résistance à la traction et le module d'élasticité diminuent. Cependant, la résistance à la compression n'est pas significativement affectée.

D'ailleurs, si la résistance et la maniabilité sont affectées, il est facile d'augmenter la teneur en pâte/ciment et le dosage en plastifiant/superplastifiant.

Dans le cas présent, les GBR proviennent d'un programme de déconstruction sélectif (blocs issus de pieux en béton), ce qui a permis de produire un sable et des gravillons de GBR de bonne qualité. C'est pourquoi 30 % de sable de GBR ont pu être utilisés dans les bétons. Plus généralement, avec des granulats de qualité moindre, la tendance serait de sacrifier le sable, mais cela crée alors un déséquilibre de flux pour l'entreprise de recyclage...

L'utilisation accrue de GBR relève d'une stratégie et d'une volonté. On peut rappeler des mots célèbres comme « Just do it » ou « Yes we can » pour se convaincre que les challenges techniques peuvent être affrontés. Les travaux de rénovations publiques et de logements représentent une grande part des futurs chantiers de déconstruction, et d'énormes quantités d'anciens bétons seront alors prochainement disponibles.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les ingénieurs et techniciens du Centre d'Applications des Matériaux et le service qualité de Holcim/Eqiom, le responsable de la centrale BPE de Roissy, et l'entreprise GAMEIRO qui a réalisé le chantier.



Chapitre 26.

Immeuble de bureaux : dalle intérieure

R. Deborre¹, E. Garcia²

Résumé – Ce chapitre présente le point de vue conjoint d'un promoteur immobilier – Nacarat (Groupe Rabot-Dutilleul) – et d'un producteur de BPE – Lafarge Bétons France – sur l'utilisation expérimentale de granulats de béton recyclé (GBR) dans la construction d'un immeuble de bureaux situé en région parisienne.

Une première expérimentation réussie avait été réalisée dans le Nord de la France en 2015. Elle portait sur l'utilisation d'un laitier de haut-fourneau cristallisé. En 2016, le groupe Rabot Dutilleul a souhaité réitérer cette expérience en région parisienne, en utilisant cette fois des granulats issus du secteur du BTP, c'est-à-dire provenant de bétons de déconstruction.

Le projet sélectionné était un immeuble de bureau ordinaire. Il ne s'agissait pas de modifier le design du projet, mais simplement d'y inclure l'expérimentation envisagée.

Les entreprises étaient disposées à coopérer, du moment que la mise en œuvre du béton respectait les normes en vigueur et que le prix initialement négocié n'était pas révisé.

Le choix s'est rapidement porté sur la réalisation d'une dalle intérieure de plancher.

Le fournisseur du Béton Prêt à l'Emploi (BPE) disposait du matériel nécessaire pour fabriquer et pour tester le béton de GBR. La commande était de 80 m³ (BPS à base de GBR conformes à la norme NF EN 206/CN). La centrale de BPE Lafarge Bétons France possédait un gravillon de GBR de type 1, référencé Aggneo BPE 6/20, conforme aux normes [NF EN 12620+ A1, 2008] et [NF P 18-545, 2011]. Ce granulats avait été élaboré sur l'installation de recyclage de Lafarge Granulats France de Gennevilliers (92230).

1. Nacarat (groupe Rabot Dutilleul), Euralille.

2. Lafarge Bétons France (groupe LafargeHolcim), Clamart.

26.1. Présentation du projet de l'immeuble D1, Parc de l'Étoile

Il s'agit d'un immeuble de bureaux construit par Nacarat, promoteur immobilier filiale du Groupe Rabot Dutilleul. Les travaux ont démarré en mai 2016 à Villeneuve-la-Garenne en région parisienne. En soutien au Projet National RECYBETON, Nacarat a accepté d'utiliser des granulats de béton recyclé (GBR) dans une partie du projet en cours de construction, dans les limites des taux autorisés par les normes et règlements en vigueur.

26.1.1. Principales caractéristiques du projet

Les principales caractéristiques du projet sont résumées ci-après :

- adresse : Parc de l'Étoile, bâtiment D1, 54 avenue du Maréchal Leclerc, 92390 Villeneuve-la-Garenne ;
- type de bâtiment : R+2 sur sous-sol semi-enterré ;
- date de livraison des locaux : janvier 2017 ;
- propriétaire et occupant : département des Hauts-de-Seine ;
- description des locaux : 1 825 m², certifié RT2012, 69 bureaux, 3 salles de réunion, 2 toilettes, 1 unité PMI (protection maternelle infantile) au rez-de-chaussée ;
- promoteur : Nacarat ;
- Architecte concepteur : Préconcept Architectes ;
- Principaux intervenants : Artis Construction, Sofialex ;
- Fournisseur du béton : Lafarge Bétons France, groupe LafargeHolcim.

Figure 26.1

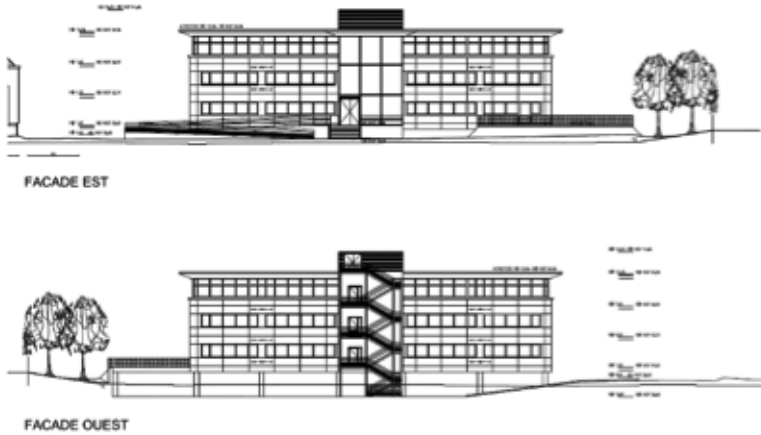
Bâtiment D1 du « Parc de l'Étoile », travaux achevés



Crédit photo : Nacarat.

Figure 26.2

Façades latérales du bâtiment D1, « Parc de l'Étoile » (dessiné par Nacarat)



26.1.2 Contexte des travaux

L'avantage de choisir un bâtiment en cours de construction était le gain de temps pour réaliser l'expérimentation. En effet, la décision d'utiliser un béton de GBR a été prise en mars 2016, et le béton a été coulé en mai 2016.

Les principaux inconvénients étaient que : la ou les dalles qui pouvaient être coulées avec le béton de GBR n'étaient pas définies ; la conception du bâtiment n'avait pas intégré cette option ; la construction du bâtiment avait démarré avant la demande du Projet National RECYBETON ; les fondations étaient déjà coulées ; le chantier ne devait pas être retardé par les essais de formulation réalisés par ailleurs ; etc.

Enfin, la politique du groupe Rabot Dutilleul était de respecter à la fois les normes en vigueur et le marché signé avec les différents intervenants du chantier. Aucun surcoût ne devait être généré, sinon l'expérimentation n'aurait pu se faire. De plus, il ne fallait pas mettre en péril la viabilité de l'immeuble car le client (Département des Hauts-de-Seine), bien que fortement intéressé par l'économie circulaire, n'était pas demandeur de ce type d'expérimentation pour ce projet.

Après avoir considéré ces contraintes, et en concertation avec les entreprises Artis Construction et Sofialex, Nacarat a rapidement accepté la demande et aussi que le béton de GBR soit fourni par Lafarge Bétons France.

26.2. Matériaux et formulation

Dans ce programme, 80 m³ de béton, où 20 % de la masse des gravillons étaient des GBR, ont été coulés pour une dalle intérieure du bâtiment. Les GBR

provenaient de chantiers de déconstruction de la région parisienne. La centrale « Lafarge Bétons France » de Nanterre (banlieue ouest de Paris) a fourni le béton du projet.

26.2.1. Granulats de béton recycle (GBR)

La centrale BPE disposait d'un gravillon recyclé Aggneo BPE 6/20 n° 1, conforme aux normes [NF EN 12620+ A1, 2008] et [NF P 18-545, 2011]. Ce GBR provenait de la plateforme de recyclage « Lafarge Granulats France » de Gennevilliers.

Tableau 26.1

Propriétés du gravillon de GBR 6/20 classé CR_b

Essais	Norme ou méthode	Résultats	Date
Absorption d'eau (%)	[NF EN 1097-6, 2014]	3,57	06/08/2015
Masse volumique (Mg/m ³)	[NF EN 1097-6, 2014]	2,32	06/08/2015
Los Angeles (10/14)	[NF EN 1097-2, 2010]	32	21/07/2015
Micro Deval (10/14)	[NF EN 1097-1, 2011]	22	21/07/2015
Réduction temps prise (constituants) (min)	[NF EN 1744-6, 2007]	6 min	21/07/2015
Teneur en éléments flottants	[NF EN 933-11, 2009]	FL0,2	21/07/2015
Teneur en matériaux bitumineux	[NF EN 933-11, 2009]	R _a 1	21/07/2015
Teneur en éléments de maçonnerie	[NF EN 933-11, 2009]	R _b 10	21/07/2015
Teneur en béton et mortier (%)	[NF EN 933-11, 2009]	97	21/07/2015
Teneur en verre (%)	[NF EN 933-11, 2009]	0	21/07/2015
Teneur en granulats non liés (%)	[NF EN 933-11, 2009]	2	21/07/2015
Autres (%)	[NF EN 933-11, 2009]	0	21/07/2015
Verres et Autres	[NF EN 12620, 2008]	XRg0,5	21/07/2015
Chlorures	[NF EN 1744-1, 2014] art 7.8 ou 9	Néant	21/07/2015
Chlorures solubles dans l'acide (%)	[NF EN 1744-5, 2007]	0,01	21/07/2015
Soufre total (%)	[NF EN 1744-1, 2014] Art.11	0,12	21/07/2015
Sulfates soluble dans l'eau (SO ₄)	[NF EN 1744-1, 2014] Art.10.2	SSB ou SSC	21/07/2015
Alcali-réaction	[NF P 18-542, 1988]	PR	21/07/2015
Alcalins actifs (Na ₂ O _{Eq}) (%)	[LPC n° 37, 1993]	0,0104	21/07/2015

Source : Lafarge Granulats France.

Tableau 26.2

Granularité du gravillon de GBR 6/20

Classe granulaire 6,3/20		[NF P 18-455, 2011] article 10 (résultats du 21/07/2015)										
	d/2	d		D/1,4	D		1,4D	2D				
	3,15	6,3	10	12,5	15	16	20	22,4	28	40	f	FI
V _{SS}	5	15			70		98					20
V _{SI}		0			40		83		98	100		
moy. Xf	2	3	16	36	51	65	88	96	100	100	0,6	10

Source : Lafarge Granulats France.

Le gravillon de GBR Aggneo utilisé dans ce projet provenait de chantiers de déconstruction situés dans un rayon de quelques kilomètres autour de la plateforme de Gennevilliers. Sa production a nécessité le tri contrôlé des déchets, selon un cahier des charges bien précis. Le recours à ces matériaux contribue à réduire la consommation des ressources naturelles, en réutilisant les déchets générés par la déconstruction des ouvrages en béton dans les zones urbaines.

26.2.2. Béton de GBR

La formulation du béton avec les gravillons de GBR Aggneo est une pratique courante chez Lafarge Bétons France, qui produit chaque année plusieurs centaines de milliers de mètres cubes de ce béton grâce à son réseau de 250 centrales de BPE.

Voici les propos de Lafarge Bétons France : « Hier, nous avons en effet fourni Sofialex avec un béton Aggneo BPS C25/30 CEMI+Cv D20 S3 XC4 XF1 contenant 20 % de gravillons de GBR. C'est le taux maximum autorisé par la norme NF EN 206/CN pour la classe d'exposition XF1, avec un GBR de type 1 (CR_B). Le client avait demandé un béton fin (D_{max} 14 mm). Il savait que le granulats recyclés avait un D_{max} de 20 mm, mais cette modification, ainsi le taux de 20 %, n'étaient pas un problème pour lui ».

Tableau 26.3

Formulation du béton BPS C25/30 CEMI+Cv D₂₂ S3 XF1 gravillons de GBR
(Lafarge Bétons France)

Caractéristiques	Données techniques
Classe d'exposition	XF1
Résistance en compression à 28 jours	25 MPa
Dosage en liant équivalent	≥ 273 kg/m ³ pour D _{max} = 22,4
Rapport E _{eff} /liant équivalent	≤ 0,6
Consistance	S3
Type de sable	silico-calcaire, 0/4 alluvionnaire partiellement concassé corrigé par un sable alluvial correcteur 0/1 avec un sable correcteur 0/1 alluvionnaire
Type de gravillons	silico-calcaire 8/22 alluvionnaire partiellement concassé GBR 6/20 type 1 (teneur en gravillon de 20 %)
Type de liant	CEM I 52,5 N + cendres volantes (indice d'activité 0,6)
Type d'adjuvant	Plastifiant réducteur d'eau
Origine de l'eau	Eau décantée, conforme EN 1008

26.3. Exécution des travaux et retour d'expérience

26.3.1. Exécution des travaux

La dalle intérieure a été coulée en mai 2016 à l'aide d'une pompe à béton. Une équipe de compagnons a réglé son épaisseur.

Figure 26.3

Coulage de la dalle avec une pompe à béton



Crédit photo : Nacarat.

Figure 26.4

Réalisation de la dalle et réglage de son épaisseur



Crédit photo : Nacarat.

26.3.2. Commentaires des différents intervenants

26.3.2.1. *Société Sofialex*

« Le coulage et la mise en place n'ont pas montré de différences significatives par rapport à un béton traditionnel. Cependant, la qualité de la finition était moins bonne qu'avec un béton conventionnel (retrait plastique) ».

24.3.2.2. *Nacarat : le promoteur*

« Nous étions inquiets au départ, parce que le client n'avait pas été averti de cette expérimentation, même si elle était conforme aux normes. Puis nous nous sommes sentis soulagés voire même frustrés parce que le béton avait un aspect très classique, sans particularités « visibles » dues à l'expérimentation ».

26.3.2.3. *Lafarge Bétons France : le fournisseur du béton*

« Lafarge Bétons France a été heureux de s'associer, à la demande de Nacarat, à un projet favorisant l'économie circulaire dans un contexte local. Dans le cadre du Projet National RECYBETON, Lafarge Bétons France, avec d'autres partenaires et dans un autre chantier expérimental de construction, a mis en œuvre des bétons dont certains avaient une teneur en GBR de 100 % (voir chapitre 22 « Dallage : Chaponost »). »

26.4. Besoins de recherche

Il semble qu'aucune recherche supplémentaire ne soit aujourd'hui nécessaire pour développer l'emploi des GBR dans les bétons de bâtiments répondant aux normes actuelles, du moins s'ils respectent les réalités économiques des chantiers.

26.5. Perspectives pour de nouveaux projets

L'économie circulaire est un enjeu majeur de la construction des nouveaux bâtiments. Le béton peut encore y jouer un rôle important, avec d'autres matériaux de construction faiblement émetteur de CO₂, dans la mesure où l'emploi des matériaux réutilisés ou recyclés est maximisé.

Cette expérience révèle que le défi technique n'est certainement pas aussi grand que généralement redouté (pour des raisons culturelles ?), au regard de l'ensemble de la chaîne de valeur. C'est peut-être beaucoup plus simple que prévu ? Cela semble avoir été le cas ici.

C'est pourquoi, selon nous, il serait opportun, en particulier pour la région parisienne, de demander aux entreprises, aux sous-traitants et aux partenaires industriels, de fournir un béton contenant le plus possible de GBR, sans que le prix de départ ne soit pour autant impacté.

Enfin, si un client nous demandait de mener une expérience qui va au-delà des normes existantes, nous serions tentés d'entreprendre cette aventure de façon totalement transparente avec nos principaux partenaires impliqués dans notre système d'écoconstruction.

26.6. Conclusion

L'objectif de ce projet était d'expérimenter l'utilisation d'un béton de GBR pour le coulage d'une dalle intérieure de bâtiment en région parisienne. Les limites imposées étaient ne pas aller au-delà des seuils fixés par les normes techniques en vigueur et de ne pas dépasser le budget d'un projet initial.

Le béton de GBR a été fourni par Lafarge Bétons France. Il avait les caractéristiques techniques suivantes : BPS C25/30 CEMI+Cv D20 S3 XC4 XF1 Aggneo avec 20 % de gravillons de GBR (taux maximum autorisé par la norme [NF EN 206/CN, 2014] pour la classe d'exposition XF1 avec un granulats recyclé de type 1). L'approvisionnement du GBR n'a posé aucun problème à l'entreprise.

En revanche, la réticence initiale du maître d'œuvre était réelle, sans doute à cause de l'idée préconçue que la qualité des matériaux recyclés est moindre. Même lorsque le béton utilisé répond aux normes en vigueur, il subsiste certaines craintes que la « fraction recyclée » reste visible et que l'aspect du béton ne soit pas attrayant. Dans le cas présent, après que le béton de GBR ait été coulé, tous les opérateurs ont été rassurés techniquement et commercialement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Projet National RECYBETON, qui a accompagné cette expérience. Nous tenons également à remercier nos collègues opérationnels et les entreprises impliquées, qui nous ont aidé à mener à terme ce projet, et qui nous ont fait confiance.

Chapitre 27.

Recyclage dans l'industrie des produits préfabriqués en béton

P. Francisco¹, P. Rougeau¹

Résumé—Depuis plusieurs années déjà, certaines usines de préfabrication proposent des produits en béton incorporant des granulats de béton recyclé (GBR). Ces granulats sont récupérés pour partie du lavage des excédents de béton frais, mais ils proviennent plus généralement des produits testés en usine dans le cadre du contrôle qualité, et des produits non-conformes. Cela représente quelques pourcents de la production totale constituée d'une part par les produits non-armés tels les blocs, les dalles et les bordures, et d'autre part par les produits armés tels les tuyaux, les poutres et autres éléments structuraux. Après concassage, triage et caractérisation, ces GBR sont utilisés pour fabriquer de nouveaux produits préfabriqués en béton, en remplacement d'une partie des granulats naturels. Actuellement, les GBR proviennent principalement de sources internes aux usines.

Afin d'augmenter le taux de GBR, d'autres sources externes peuvent aussi être utilisées : déchets de produits en béton, excédents de bétons provenant des chantiers, bétons de démolition, etc. Ils présentent des caractéristiques variables en termes de taille maximale, d'absorption d'eau ou de teneur en fines, paramètres qui doivent alors être contrôlés afin de respecter la constance des performances finales requises pour les produits préfabriqués en béton.

Les exigences et spécifications concernant les possibilités d'utilisation des granulats de béton recyclé dans les produits préfabriqués en béton sont décrites dans la norme européenne EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton », norme adaptée sur ce point aux dispositions propres à chaque pays [NF EN 13369, 2013].

Des exemples d'utilisation de GBR dans l'industrie de la préfabrication française sont présentés ci-après.

1. CERIB, Epernon.

27.1. Introduction

Depuis plusieurs années, certaines usines de produits préfabriqués en béton proposent des produits incorporant des granulats de béton recyclé (GBR). Cette pratique concerne aussi bien des produits non-armés, tels les blocs, les dalles et les bordures que les produits armés, tels les éléments structuraux.

L'industrie des produits en béton est pleinement engagée dans le défi de l'économie circulaire, en recourant notamment à l'utilisation de ressources durables. Il existe une grande variété d'applications concernant l'utilisation de matières premières secondaires en béton [Petitpain *et al.*, 2017]. Leur emploi est presque toujours techniquement possible et généralement viable économiquement. Les matières premières recyclées contribuent ainsi à une utilisation plus rationnelle des ressources naturelles, tout en respectant les performances des produits.

Les GBR utilisés dans ce contexte proviennent essentiellement de deux sources :

- des bétons issus des usines de préfabrication ;
- des bétons issus de la démolition de structures ou de chantiers de construction.

27.2. Recyclage des bétons issus des usines de préfabrication

D'une manière générale, toutes les industries génèrent des déchets qui peuvent être recyclés en matières premières secondaires. Pour l'industrie du béton préfabriqué, il s'agit essentiellement de matériaux inertes, tels le béton et les granulats, mais aussi, plus marginalement, d'autres matériaux plus communs, tels les papiers, cartons, plastiques, palettes et bois de palettes, fers, etc. Pour cette industrie, dans sa globalité, les bétons et granulats secondaires représentent des tonnages conséquents, de l'ordre de 500 000 tonnes par an. Pour une usine importante, ces tonnages peuvent atteindre 2 000 tonnes par an [Bresson, 2003]. En moyenne, en raison de l'augmentation de la production et du développement de la variété des composants fabriqués, les quantités générées par usine varient entre 200 et 2 000 tonnes par an. Cela représente environ 1,7 % de la masse de tous les bétons préfabriqués, c'est-à-dire des produits non-armés et armés.

L'origine et la nature de ces matériaux recyclés varient largement selon les modes de production ou de conditionnement des pièces fabriquées. Il s'agit :

- des résidus provenant du nettoyage des malaxeurs, des bennes de transport, des trémies, des machines, des moules et des ateliers ;
- des formules de béton non conformes ou des quantités excédentaires ;

- des produits frais défectueux retirés des machines ou altérés lors des manipulations, du stockage et du chargement ;
- des produits détruits lors des essais de contrôle ;
- des restes de granulats inutilisés ;
- des résidus en poudre provenant des traitements de surface, tel le sablage ;
- des résidus solides issus des bassins de décantation.

À l'heure actuelle, il existe trois voies pour transformer ces matériaux en GBR en vue de leur réutilisation dans les bétons ou les travaux de voirie :

- le traitement interne à l'usine sur des installations permanentes ou semi-permanentes, qui permet d'élaborer des GBR destinés à être recyclés rapidement dans de nouveaux produits en béton ;
- le traitement ponctuel par campagnes de concassage-criblage d'un stock important de matériaux entreposés sur le site de l'usine ;
- l'évacuation vers des installations fixes spécialisées dans le traitement des matériaux de démolition (travaux publics, entreprises de recyclage, carrières).

Le traitement interne est évidemment la meilleure façon de préserver l'environnement car il évite de nombreux transports. Il devient même économique si les coûts de traitement (amortissement de l'installation, management, exploitation et entretien) demeurent inférieurs aux coûts des granulats substitués, en comptant les frais de transport et d'évacuation évités. Pour ce faire, il est toutefois nécessaire de mettre en place une organisation et des moyens matériels adaptés aux types et aux volumes produits, aux conditions de production et à la configuration de l'usine.

À titre d'exemple, une entreprise de produits préfabriqués en béton réalise des dalles en béton (dalles de jardin, dalles pour toitures terrasse, etc.). Les déchets de fabrication sont stockés à l'abri des intempéries (Figure 27.1). Une ou deux fois par an, lorsque le stock devient suffisant (environ 1 000 tonnes), une campagne de concassage est effectuée. Un concasseur du type de ceux utilisés pour les granulats routiers est acheminé sur le site de production. L'opération de concassage dure trois jours. La taille des granulats récupérés est fixée à 0/6 mm. Ces nouveaux granulats sont utilisés pour réaliser des produits en béton de grande diffusion, comme les pavés par exemple.

Figure 27.1

Rebus de production destinés à être concassés et recyclés



Crédit photo : Marlux France.

27.3. Recyclage des déchets de béton de construction et de démolition

À proximité de la plupart des grandes villes existent maintenant des plateformes spécialisées dans le traitement des Déchets de Construction et de Démolition (DCD). Ces sites reçoivent tous types de matériaux inertes (bétons, enrobés, graves) provenant directement des chantiers ou des plateformes de récupération et de tri des matériaux de construction, ainsi que les bétons qui ne sont pas recyclés dans les usines de produits en béton.

Ces sites sont gérés par des sociétés spécialisées (entreprises de travaux publics, de recyclage ou carrières), à l'aide de gros équipements, sur de grandes plateformes (anciennes carrières, friches industrielles) permettant un stockage séparé des différents matériaux inertes. Ces installations sont capables de gérer de gros tonnages (200 000 à 300 000 tonnes par an), avec des matériels fixes ou semi-mobiles tels concasseurs à percussion puissants (200-400 kW), cribles vibrants, stations de tri (pour éliminer le bois, les plastiques, le verre), séparateurs magnétiques (pour récupérer l'acier) et parfois aussi des équipements de lavage du sable (ou des séparateurs à air).

À titre d'exemple, une société de produits préfabriqués en béton réutilise des GBR issus de poteaux électriques. Avec l'enfouissement progressif des lignes électriques, la société Enedis (ex.-ERDF) a lancé plusieurs campagnes de recyclage des poteaux électriques en béton, en concertation avec certains Conseils Départementaux et des plateformes de recyclage. C'est le cas

par exemple du département de la Sarthe où, chaque année, plus de 3 500 poteaux sont réduits en granulats pour diverses utilisations sur des chantiers de construction. L'installation de recyclage concernée est capable de séparer l'acier et le béton des poteaux, de sorte à valoriser complètement ces poteaux. Les matériaux recyclés sont ensuite utilisés en remblaiement de tranchées, pour le corps des plateformes industrielles ou en sous-couches de chaussées. Ainsi, tous les constituants qui composent ces « déchets » sont transformés en matières premières pour de nouvelles utilisations.

Cette société de produits préfabriqués en béton basée dans le Maine-et-Loire (Normandie) gère la collecte et le recyclage des poteaux en béton du Tarn-et-Garonne. Après chaque opération de dépose (consécutive à l'enfouissement des réseaux ou à des remplacements ponctuels), les poteaux récupérés sont transportés vers trois zones de stockage de la région, prévues à cet effet. Ainsi, en 2014, plus de 100 poteaux d'une masse totale de plus de 100 tonnes ont été recyclés par cette société (Figure 27.2). Un premier traitement permet de séparer l'acier et le béton de ces poteaux : l'acier est recyclé en aciérie pour de nouvelles utilisations ; le béton est réduit en blocaille par un second traitement. Ils sont ainsi transformés en matières premières pour de nouvelles applications, notamment dans les travaux publics (remblaiement, sous-couches des chaussées, etc.), mais aussi pour une usine de préfabrication.

Figure 27.2

Société de produits préfabriqués en béton (située en Normandie) utilisant des granulats recyclés issus de poteaux électriques en béton pour réaliser des murs à coffrage intégré (MCI) ou prémurs



Crédit photo : CMEG.

Les objectifs industriels sont :

- réduire l’empreinte environnementale des produits en béton ;
- anticiper les futures réglementations ;
- être proactif envers les clients.

La granulométrie des gravillons de GBR destinés à être réutilisés en préfabrication est 4/14 mm (le sable est utilisé pour d’autres applications). Ces gravillons constituent 20 % du total des granulats entrant dans certains produits (Figures 27.3 et 27.4). Chaque année, cette entreprise de bétons préfabriqués utilise près de 400 tonnes de GBR.

Figure 27.3

Produit préfabriqué avec des GBR



Crédit photo : CMEG.

Figure 27.4

Bâtiment utilisant des produits préfabriqués en béton incorporant des GBR



Crédit photo : CMEG.

27.4. Recyclage dans des blocs en béton de grande taille

Depuis 1999, une société française prend en charge, traite et commercialise des matériaux inertes. Cette société dispose de cinq sites de production situés dans les quatre départements bretons. Chaque année, elle traite plus de 20 000 tonnes de matériaux, dont des bétons provenant de la démolition de bâtiments et d'infrastructures (Figure 27.5).

Les plateformes de cette société sont équipées de concasseurs, cribles, pelles et chargeurs. Elles produisent des granulats pour les sous-couches des chaussées ou pour de nouveaux bétons (Figure 27.6). Les matériaux ferreux sont valorisés en aciéries.

Cette entreprise produit notamment des blocs de béton de grande taille ($1,60 \times 0,80 \times 0,80$ m) d'un poids approchant 2,4 tonnes (Figure 27.7). Ces blocs de béton traditionnel sont équipés de dispositifs de levage. Ils s'appareillent les uns les autres pour former des murs et autres systèmes de séparation. Les clients de cette entreprise les utilisent pour délimiter des zones de stockage ou de soutènement.

Ces blocs sont constitués de matériaux traditionnels (ciment, granulats) mélangés en quantité variable, selon l'utilisation, à des GBR provenant de démolition ou encore de retours de toupies de béton prêt à l'emploi. Ces blocs peuvent aussi intégrer des co-produits industriels inertes provenant de fonderies par exemple.

Ils sont fabriqués en usine ou directement sur chantier à l'aide d'une installation mobile. La centrale à béton « Blend » de cette société permet d'intégrer des co-produits industriels ou des GBR dans ces blocs de béton. Le transport est donc réduit au minimum.

Figure 27.5

Déchets inertes de démolition de bâtiments et de retours de toupies de béton prêt à l'emploi



Crédit photo : INERTA.

Figure 27.6

GBR après concassage



Crédit photo : INERTA.

Figure 27.6

Blocs en béton incorporant des GBR



Crédit photo : INERTA.

27.5. Conclusion

Les produits préfabriqués en béton non-armés tels les blocs, les dalles et les bordures, et les produits armés tels les éléments structuraux peuvent être recyclés en GBR. Les exemples pratiques présentés montrent que plusieurs sources de GBR sont compatibles avec les exigences des produits préfabriqués en béton définies par les normes européennes ou françaises.

Ces expériences combinées aux résultats du Projet National RECYBETON permettront d'augmenter la part de granulats recyclés dans les bétons, et d'étendre ainsi le champ des pratiques habituelles.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les sociétés MARLUX France, CMEG et INERTA pour les informations et photos communiquées.

Chapitre 28.

Contrôle qualité dans le contexte français

A. Ben Fraj¹, P. Dantec²

Résumé – Ce chapitre présente les dispositions applicables en France, et ailleurs dans le monde, en matière de contrôle qualité des matériaux et d'exécution des ouvrages de bâtiment et de génie civil. Les règlements et normes en vigueur sont rappelés, avec un certain nombre d'exemples issus des résultats de chantiers expérimentaux réalisés dans le cadre du Projet National RECYBETON. Les contrôles particuliers dédiés à l'incorporation des granulats de béton recyclé (GBR), au niveau des différentes phases de construction (conception, exécution et réception des travaux) sont également décrits.

28.1. Exigences qualitatives de base

28.1.1. Introduction

Le Complément National à la norme européenne sur l'exécution des ouvrages en béton, c'est-à-dire la norme [NF EN 13670/CN, 2013], recouvre les domaines traités par les deux autres documents applicables en France aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil en béton, à savoir : i) le DTU (Document Technique Unifié) n° 21 [NF DTU 21, 2017] « Exécution des structures en béton » ; ii) le nouveau Fascicule 65 [Fascicule 65, 2014] intitulé « Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé et précontraint », publié en 2014. Ces documents ont été mis à jour afin d'y intégrer les dispositions de la norme NF EN 13670/ CN, qui impose la rédaction des spécifications d'exécution en conformité avec le niveau de qualité visée, au regard des exigences de la Classe particulière d'Exécution retenue pour l'ouvrage. La teneur des contrôles effectués varie selon la Classe d'Exécution retenue, qui dépend de l'importance de l'ouvrage ou d'une partie de celui-ci, ainsi que de la « criticité » de son exécution au regard des fonctions attendues.

1. Cerema, Sourdun.

2. Ingénieur Consultant, Courmon d'Auvergne.

Pour la Classe d'Exécution n° 3, en plus de l'autocontrôle et du contrôle interne effectués par l'entrepreneur, il peut être requis un contrôle étendu selon les réglementations nationales ou les spécifications d'exécution. Ce contrôle étendu peut également être effectué par un tiers, désigné contrôleur extérieur indépendant.

Le contrôle qualité est un paramètre clé pour les ouvrages en béton, notamment si des granulats de béton recyclé (GBR) sont utilisés, et en absence de traçabilité. Ainsi, l'utilisation de GBR conduit à une plus grande vigilance, et donc à plus d'essais. Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre aborde les exigences de qualité et de contrôle pour les bâtiments et les ouvrages de génie civil. Elle est centrée sur l'expérience française et donne un aperçu de la normalisation à l'échelle internationale. Dans la deuxième partie, une description des contrôles et des observations spécifiques dédiées à l'incorporation des GBR dans le béton est présentée. Cette description est appliquée aux différentes phases de construction de plusieurs chantiers expérimentaux réalisés dans le cadre du Projet National RECYBETON.

28.1.2. Bâtiment : norme NF DTU 21, spécifications techniques, maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre

La norme NF DTU 21 [NF DTU 21, 2017] prévoit des niveaux de contrôle croissants selon l'importance des travaux et la présence potentielle d'éléments d'ouvrage particulier. Trois catégories de chantiers sont distinguées :

- catégorie A : chantier de petite importance, comprenant au plus deux étages sur rez-de-chaussée, plus un niveau de sous-sol ; cette catégorie concerne en particulier les habitations individuelles indépendantes ou jumelées construites en petit nombre ;
- catégorie B : chantier de moyenne importance ne comportant que des éléments de dimensions courantes et normalement sollicités. Cette catégorie concerne en particulier les bâtiments de moins de 16 étages, un ensemble pavillonnaire important ou une construction industrielle courante. La quantité de béton mise en œuvre n'y dépasse pas 5 000 mètres cubes ;
- catégorie C : chantier de grande importance comportant des éléments structuraux de dimensions courantes et normalement sollicités. Cette catégorie concerne les bâtiments de plus de 16 étages, les entrepôts industriels ou commerciaux soumis à des charges lourdes ou à un trafic intense, ainsi que les complexes sportifs de grandes dimensions.

Les éléments d'ouvrage particuliers PA, PB et PC sont utilisés dans les projets des catégories A, B et C :

- porte-à-faux importants ;
- planchers de reprise ou éléments fortement sollicités ;
- poteaux élancés ;

- planchers de grande portée ;
- ouvrages nécessitant des techniques d'exécution délicates ;
- ouvrages dont la résistance caractéristique de calcul requise pour le béton coulé sur site est au moins de 35 MPa à 28 jours.

Ces éléments doivent être indiqués sur les plans de structure.

Les contrôles d'exécution adoptés pour les éléments d'ouvrages particuliers PB et PC ne peuvent pas être inférieurs à ceux de catégories d'ouvrage B ou C dont ils relèvent.

Les niveaux de contrôle sont calibrés selon les exigences relatives aux Classes d'Exécution de la norme NF EN 13670/CN [NF EN 13670/CN, 2013]. À savoir, sauf indications contraires des DPM (documents particuliers du marché), les chantiers de catégories A, B ou C relèvent respectivement des Classes d'Exécution 1, 2 ou 3. Pour la catégorie d'ouvrage PA, le contrôle d'exécution sera au moins de niveau 2.

Les contrôles du béton imposés reposent à la fois sur les contrôles du producteur de matériaux et sur les contrôles par échantillonnage ou par lots définis dans les documents particuliers du marché (DPM). Ils sont réalisés par l'entrepreneur et interprétés selon les dispositions prévues à l'annexe A (norme) du DTU 21.

En ce qui concerne les parements, le DTU 21 fait référence aux exigences du fascicule FD P18-503 [NF FD P18-503, 1989]. Les exigences portent sur la planéité et la texture (bullages et défauts localisés).

Le contrôleur technique désigné a pour mission de contribuer à la prévention des divers aléas techniques susceptibles d'être rencontrés lors de la construction de l'ouvrage. Ce contrôleur intervient à la demande du Maître de l'Ouvrage, à qui il rend un avis au regard des problèmes relevant du domaine technique. Cet avis porte notamment sur les problèmes concernant la solidité de l'ouvrage et la sécurité des personnes. Il est obligatoire pour tous les Établissements Recevant du Public mais aussi pour les immeubles de hauteur importante contenant des structures ou des fondations enterrées et dans les zones de sismicités particulières. Même s'il est facultatif, ce contrôle est souvent demandé par le Maître de l'Ouvrage pour des besoins d'assurabilité de la construction ou pour s'assurer de sa durabilité.

Le contrôleur technique est principalement chargé de vérifier la conformité aux exigences des normes, à tous les stades de la construction.

Les relations entre Maître de l'Ouvrage public et Maître d'Œuvre privé sont régies par la loi « MOP » n° 85-704 du 12 juillet 1985 (Loi applicable aux marchés publics) [Loi n° 85-704, 1985], qui définit les principales missions.

28.1.3. Ouvrages de Génie civil : fascicule 65, contrôleur extérieur

Le Fascicule 65 [Fascicule 65, 2014], intitulé « Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé et précontraint » s'applique à la fois aux ouvrages en béton et aux ouvrages provisoires nécessaires à leur réalisation. Il constitue le cahier des clauses techniques générales et définit les exigences générales applicables à la construction des ouvrages pour une durée d'utilisation du projet des ouvrages de 100 ans. Il est complété pour chaque marché par un Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP).

En l'état actuel, la version 2014 du fascicule 65 [Fascicule 65, 2014], non approuvée officiellement, doit être rendue contractuelle et jointe aux pièces du marché pour être rendue applicable.

La gestion de l'exécution fait l'objet du chapitre 4 et impose la documentation à fournir par le titulaire du marché aux différentes étapes de la construction : préparation, exécution, achèvement. Cette documentation est constituée d'une part par les spécifications d'exécution (programme, note de calculs, plans, dessins, etc.) et d'autre part, par les plans qualité et de respect de l'environnement. Les différents sous-articles du fascicule listent les procédures d'exécution et de respect de l'environnement que doit produire l'entreprise titulaire du marché. Le management de la qualité repose sur les dispositions stipulées dans la Classe d'Exécution n° 3 de la norme [NF EN 13670/CN, 2013], qui s'appuie d'une part, pour les produits de construction, sur les exigences de la conformité aux normes et au marquage « CE » et d'autre part, pour l'exécution, sur un contrôle intérieur organisé par l'entreprise titulaire du marché et un contrôle extérieur placé sous la responsabilité du maître d'œuvre. Des tableaux compatibles avec ceux de la norme [NF EN 13670/CN, 2013] résument les contrôles sur les matériaux et sur les produits (définition et présentation des essais), ainsi que les contrôles d'exécution (épreuves et essais de convenance et de contrôle). Des contrôles particuliers peuvent également être ajoutés au Cahier des Clauses Techniques Particulières du marché, selon les techniques spécifiques de mise en œuvre. Un plan de contrôle particulier définit, pour l'opération, la répartition entre les différentes actions organisées en contrôle intérieur et extérieur.

En outre, la gestion de la qualité s'appuie sur une liste de points d'arrêt prévus dans le Fascicule, complétée et adaptée aux spécificités du projet de construction, et énoncée dans le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP). Les points d'arrêt relatifs aux bétons concernent les spécifications des bétons et l'épreuve d'étude, la validation de l'épreuve de convenance et éventuellement la réception de l'élément témoin, l'acceptation des centrales, l'autorisation de bétonnage d'une partie d'ouvrage, l'acceptation des parements.

La levée de ces points d'arrêt par le Maître d'Œuvre justifie la conformité des contrôles au regard des exigences contractuelles, sur la base des actions

effectuées par l'entreprise pour le contrôle interne et par le Maître d'Œuvre pour le contrôle extérieur.

Les différents articles du Fascicule 65 [Fascicule 65, 2014] précisent les spécifications d'exécution applicables et les dispositions prévues en matière d'études, de convenance et de contrôle notamment sur les bétons et les parements (voir chapitre 8 du Fascicule). Les principaux éléments du chapitre 8 sont repris ci-après :

- les bétons doivent être conformes à la norme [NF EN 206/CN, 2014] ;
- le béton de chaque partie d'ouvrage relève d'un ensemble de classe d'exposition et doit respecter toutes les exigences requises pour chaque classe ;
- le béton peut être prescrit par des spécifications de composition *via* l'application de valeurs seuil, applicables en fonction de la classe d'exposition, ou par des spécifications de performance liées aux classes d'exposition. Dans ce cas, il s'agit de dérogations partielles aux exigences de composition et selon les valeurs maximales des indicateurs de durabilité mesurés il est possible de réduire l'enrobage ;
- tous les constituants du béton doivent être conformes aux normes en vigueur, en particulier aux normes [NF EN 12620 + A1, 2008] et [NF P18-545, 2011] pour les granulats. Selon la norme [NF EN 206/CN, 2014], des gravillons de béton recyclé (GBR) de type 1 peuvent être utilisés, s'ils proviennent de la démolition d'ouvrages de génie civil dont la traçabilité est garantie, et pour les bétons de classe de résistance inférieure à C35/45 en classes XC1, XC2, XC3, XC4 ou XF1, avec un taux de substitution de 20 % maximum ;
- le béton est soumis à une épreuve d'étude sur la base de référence d'utilisation ou de gâchées réalisées en laboratoire permettant de vérifier les performances et la robustesse de la formule nominale par rapport aux spécifications du marché et à la méthode d'exécution envisagée ;
- l'entrepreneur fournit un programme de bétonnage énumérant les dispositions prises pour assurer la qualité d'exécution et la durabilité, en plus des conditions relatives à l'exécution des parements ;
- le béton est soumis à une épreuve de convenance réalisée en centrale dans les mêmes conditions que le chantier avec en particulier les mêmes constituants, même matériel de fabrication, de transport et de mise en œuvre. Les résultats obtenus lors de cette épreuve de convenance y compris le cas échéant l'acceptation de l'élément témoin (conformité des parements) constituent un point d'arrêt ;
- la production a lieu dans une usine de BPE certifiée ayant le droit d'usage de la marque NF-BPE (certification bétons structurels) ou son équivalent avec des exigences supplémentaires, comme indiqué dans l'annexe B contractuelle du Fascicule. Dans le cas d'une production in situ ou dans une usine de béton préfabriqué, la centrale doit satisfaire les spécifications énoncées dans l'annexe B ;

- les bétons subissent un contrôle de conformité au moment du coulage par l'entrepreneur, sur la base d'un lotissement définit par le marché pour chaque partie de l'ouvrage. Chaque lot est considéré conforme si les résultats obtenus répondent aux valeurs de résistance caractéristique et de consistance requise, selon une interprétation statistique basée sur le nombre de prélèvements par lot. En ce qui concerne les valeurs de durabilité, les critères de conformité sont spécifiés, comme le sont les valeurs pour les bétons traités thermiquement ;
- chaque prélèvement est soumis à une mesure de consistance, sert à préparer trois éprouvettes pour la détermination de la résistance à la compression à 28 jours, et subit une mesure de teneur en air pour les bétons contenant un agent entraîneur d'air ;
- les spécifications d'exécution sont définies pour les étapes de coulage impliquant : la vibration, les reprises de bétonnage, l'exécution des surfaces non coffrées, le décoffrage et le décintrement, la mise en place de béton particulier, la cure et la protection, etc. ;
- concernant les parements, parois et surface non coffrées, les exigences s'appuient sur les référentiels existants et notamment en ce qui concerne les parements des fascicules de documentation [NF FD P 18-503, 1989] et [NF FD CEN/TR 15739, 2010]. Les parements sont classés comme : simples, fins ou ouvragés.

28.1.4. Béton de GBR : normes granulats et béton

28.1.4.1. À l'échelle internationale

L'utilisation de granulats recyclés dans les routes et le béton est aujourd'hui une préoccupation internationale, comme indiqué dans les normes et guides de méthodologie recueillis dans la cadre du Projet National RECYBETON. Quarante documents provenant de vingt pays et des différents continents, à l'exception de l'Afrique, ont été analysés. Les pays les plus expérimentés dans le recyclage de GBR sont les Pays-Bas, l'Allemagne, l'Autriche, le Royaume-Uni, le Japon, les États-Unis et le Canada (province de Québec). Ils représentent la moitié des documents analysés. Le rapport « Synthèse de documents internationaux sur l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons », réalisé dans le cadre du Projet National RECYBETON [Bodet *et al.*, 2015], détaille les pratiques internationales. Les conclusions suivantes peuvent être reprises ici :

- en Allemagne, les GBR de meilleure catégorie sont utilisés avec des taux de substitution variaient entre 25 et 45 % pour les classes d'exposition X0, XC, XF1, XF3 et XA1 ;
- en Belgique, seules les GBR de la meilleure qualité sont incorporés à un taux de 20 % dans les bétons C16/20 pour les classes d'exposition X0 et XC1 ;
- au Danemark, seules les classes d'exposition X0 et XC1 sont concernées. Le taux d'incorporation est de 30 % pour les sables de GBR, et de 100 %

pour les gravillons moyens et grossiers de GBR. Leur utilisation est limitée aux bétons C30/37, et il existe des exigences supplémentaires ajoutées dans les codes de calcul (10 % de sable et 20 % de gravillons maximum, pour contrôler l'impact sur le retrait, le fluage et le module d'élasticité) ;

- en Autriche, l'utilisation de GBR contenant des briques en béton est autorisée ;

- en Espagne, un projet de règlement vise à limiter le taux de GBR à 20 %, en tenant compte de coefficients de correction pour le retrait, le fluage et de module d'élasticité ;

- en Italie, le taux d'incorporation varie entre 5 et 100 %, pour les bétons C45/55 à C8/10. En outre, quelques précisions sur leur origine sont nécessaires ;

- en Norvège, les GBR doivent provenir des constructions contrôlées avant la démolition. Pour garantir la résistance à l'infiltration d'eau, au gel-dégel et aux chlorures, les propriétés des GBR doivent être spécialement contrôlées ;

- aux Pays-Bas, un grand panel de possibilités existe ; le taux de substitution de 50 % est possible pour toutes les classes d'exposition et il peut atteindre 100 % si l'on exclut les classes XD et XS. La classe de résistance est limitée à C35/45. Pour plus de 50 % des GBR, les règles de conception doivent être vérifiés. Aux Pays-Bas, les sables de GBR sont également autorisés ;

- au Royaume-Uni, deux types de GBR sont distingués, selon leur origine ; maçonnerie (GR) et béton (GBR). Les GBR sont autorisés jusqu'à 20 % pour la classe de résistance maximale C40/50 en environnements X0, XC et XF1. L'utilisation de GR doit être approuvée par l'organisme de certification. Il n'y a aucune restriction si la classe de résistance n'excède pas C16/20. Il faut noter que le protocole qualité WRAP (Waste & Resources Action Programme) doit être suivi pour que les matériaux ne soient plus qualifiés de déchets ;

- en Russie, le taux de substitution autorisé est de 100 % pour les bétons C16/20. Ce taux diminue à 10 % pour la classe de résistance supérieure et un essai de durabilité est nécessaire dans un environnement avec un risque de gel-dégel ;

- en Suède, la pratique est similaire à celle de la Norvège ;

- en Suisse, l'utilisation de GBR contenant au moins 25 % en masse de constituants Rc est autorisée pour les environnements X0 et XC. Dans ce cas, la désignation de « granulats naturels » est autorisée, même en présence de granulats recyclés. Les environnements sont limités à X0 et XC1 pour les GBR contenant au moins 5 % en masse de briques recyclées. Leur utilisation dans une autre classe d'exposition nécessite des études préliminaires ;

- au Japon, la classification des GBR dépend de leurs propriétés physico-chimiques (absorption et impureté) et leur utilisation est fonction du type de béton dans la structure ;

- en Chine, il y a 3 classes de granulats recyclés (3 gravillons et 3 sables). Comme pour le Japon, l'utilisation de GBR dépend de la classe de résistance du béton et un taux maximum de 50 % s'applique si aucune donnée technique n'est disponible ;
- en Australie, deux classes de granulats recyclés sont considérées, respectivement pour le béton et pour la route. Le taux maximum autorisé est de 100 % et 30 % pour les bétons C25/30 et C40/50 respectivement ;
- en Nouvelle Zélande, la classification des GBR est semblable à celle du Royaume-Uni ;
- au Brésil, le taux de substitution est limité à 20 % pour la classe de résistance maximale C40/50 ;
- aux États-Unis et au Québec, l'utilisation de granulats recyclés concerne particulièrement les applications routières ;
- sauf en Suisse et en Norvège, l'utilisation de GBR n'est pas autorisée pour le béton précontraint.

28.1.4.2. À l'échelle nationale

Les deux normes de référence pour les granulats sont [NF EN 12620 + A1, 2008] et [NF P18-545, 2011].

La norme NF EN 12620 + A1 contient les spécifications européennes, ainsi que la liste des caractéristiques cataloguées pour le marquage « CE ». La norme NF P18-545 est d'application volontaire et précise les spécifications européennes pour les diverses applications. En outre, cette norme établit le lien entre les normes produits NF EN et les spécifications auxquelles doivent répondre les granulats.

Ces deux normes permettent de classer les GBR selon les différents critères ci-dessous :

- classification des différents constituants selon la norme [NF EN 933-11, 2009] sur la base d'un tri manuel d'une prise d'essai en les répartissant dans une liste de constituants ;
- mesure de la teneur en sulfate soluble dans l'eau, selon la norme [NF EN 1744-1 + A1, 2014] ;
- modification du temps de début de prise du béton, selon la norme [NF EN 1744-6, 2007] ;
- mesure des chlorures solubles dans l'acide, selon la norme [NF EN 1744-5, 2007].

Le Complément National de la norme [NF EN 206/CN, 2014] stipule les dispositions applicables à l'utilisation des GBR en France.

Trois types de gravillons de GBR sont définis selon leur classification et les fréquences des essais associés :

- Type 1 : toutes les caractéristiques sont CR_B ;
- Type 2 : toutes les caractéristiques sont CR_B ou CR_C ;
- Type 3 : toutes les caractéristiques sont CR_B ou CR_C ou CR_D .

Durant la période initiale, qui correspond à la production sur une période d'au moins 12 mois et à une quantité d'au moins 10 000 tonnes, la fréquence minimale d'échantillonnage et d'essais des GBR doit être conforme aux spécifications des Tableaux NA.2, NA.3 et NA.4, en sélectionnant la fréquence qui conduit au plus grand nombre d'échantillons. Par la suite, en régime de production continue, le producteur respecte au moins une des fréquences d'essai (temporelle ou quantitative) répertoriées dans les Tableaux NA.2, NA.3 et NA.4 (voir Tableaux 28.1 à 28.3), conformément aux dispositions énoncées dans le manuel « Maîtrise de la Production des Granulats » à l'issue de la période initiale.

Tableau 28.1

Annexe NA.2 [NF EN 206/CN, 2014] – Constituants des granulats recyclés

Code	Catégorie des principaux constituants [NF EN 12620 + A1, 2008]	Constituants secondaires				Fréquence du type d'essai ⁽¹⁾	
		Catégories NF EN 12620 + A1				Temporel	Quantitatif (en tonnes)
CR _B	Rcu ₉₅	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XR _{g0,5-}	FL _{0,2-}		
CR _C	Rcu ₉₀	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XR _{g1-}	FL ₂₋	2/mois	1/2 000
CR _D	Rcu ₇₀	Rb ₃₀₋	Ra ₁₀₋	XR _{g2-}	FL ₂₋		

(1) Tout lot de granulat recyclé et dont la production est inférieure aux fréquences d'essais du Tableau.

NA.2 doit faire l'objet d'un essai minimum de classification des constituants. La notion de lot est définie par la norme [NF P 18-545, 2011].

NOTE : Glossaire dédié aux granulats recyclés :

Rc : béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton contenus dans un granulat recyclé ; Ru : granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques contenus dans un granulat recyclé ; Rcu correspond à Rc + Ru ; Rg : verres contenus dans un granulat recyclé ; Rcu_g correspond à Rc + Ru + Rg ; Ra : matériaux bitumineux contenus dans un granulat recyclé ; Rb : éléments en argile cuite (briques et tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant contenus dans un granulat recyclé (Rb₁ signifie une valeur Rb inférieure ou égale à 1 % de la masse totale de granulats ; X : argiles, sols, métaux ferreux et non ferreux, bois, plastiques et caoutchouc non flottants, plâtre contenus dans un granulat recyclé ; XR_g correspond à X + Rg ; FL : matériaux flottant (exprimé en volume) contenus dans un granulat recyclé

Tableau 28.2

Tableau NA.3 [NF EN 206/CN, 2014] – caractéristiques conventionnelles normalisées des gravillons recyclés

Caractéristiques	Méthode d'essai	Code	Catégorie	Fréquence du type d'essai ⁽¹⁾	
				Temporelle	Quantitative (en tonnes)
Sulfates solubles dans l'eau	[NF EN 1744-1, 2014] article 10.2	CR _B , CR _C , CR _D	Vss 0,2 [NF P 18 545, 2011] Code SS _D Vss 0,7	1/semaine	1/1 000
Masse volumique	[NF EN 1097-6, 2014]	CR _B , CR _C , CR _D	≥ 2,0 t/m ³ ≥ 1,7 t/m ³	1/semaine	1/1 000
Influence sur le temps de début de prise	[NF EN 1744-6, 2007]		A ₁₀ A ₄₀	2/mois	1/2 000
Aplatissement	[NF EN 933-3, 2012]	CR _B , CR _C , CR _D	Fl ₃₅	1/mois	1/4 000
Los Angeles	[NF EN 1097-2, 2010]	CR _B , CR _C , CR _D	LA ₄₀ LA ₅₀	1/2 mois	1/8 000
Chlorures solubles dans l'acide	[NF EN 1744-5, 2007]	CR _B , CR _C , CR _D	À déclarer	2/mois	1/2 000
Absorption d'eau à 24 h (Ab ₂₄)	[NF EN 1097-6, 2014]	CR _B , CR _C , CR _D	À déclarer	1/semaine	1/1 000
Alcalins actifs solubles dans l'eau de chaux selon LPC n° 37	[NF pr XP P 18-544, 2015]	CR _B , CR _C , CR _D	À déclarer	2/mois	1/2 000

(1) Tout lot de granulat recyclé et dont la production est inférieure aux fréquences d'essai du Tableau NA.3 doit faire l'objet d'un contrôle minimum pour chacune des caractéristiques. La notion de lot est définie par la norme [NF P 18-545, 2011].

Tableau 28.3

Annexe NA.4 NF EN 206/CN – caractéristiques des sables recyclés

Caractéristique	Méthode d'essai	Catégorie	Type de fréquence d'essai ⁽¹⁾		
			Temporelle	Quantitative (en tonnes)	
Sulfates solubles dans l'eau	[NF EN 1744-1, 2014] article 10.2	[NF P 18-545, 2011] code SSD Vss0,7	1/semaine	1/1 000	
Masse volumique	[NF EN 1097-6, 2014]	≥ 1,7 t/m ³	1/semaine	1/1 000	
Influence sur le temps de début de prise	[NF EN 1744-6, 2007]		A ₄₀	2/mois	
Chlorures solubles dans l'acide	[NF EN 1744-5, 2007]		À déclarer	2/mois	1/2 000

(1) Tout lot de granulat recyclé et dont la production est inférieure aux fréquences d'essai du Tableau NA.3 doit faire l'objet d'un contrôle minimum pour chacune des caractéristiques. La notion de lot est définie par la norme [NF P 18-545, 2011].

Les fiches techniques produits élaborées par le producteur de granulats permettent de vérifier la conformité des GBR au regard des exigences de la norme.

28.2. Contrôle qualité sur les chantiers expérimentaux

28.2.1. Essais sur les matériaux et bétons

28.2.1.1. Gravillons de GBR

Pour les différents chantiers expérimentaux, les GBR ont fait l'objet des essais spécifiés par les normes béton et granulats.

Les spécifications requises ont été vérifiées, et les résultats obtenus ont servi à classer des gravillons en type 1, 2 ou 3.

Tableau 28.4

Exemple du chantier expérimental de Chaponost – Propriétés des granulats recyclés (Laboratoire Lafarge, Vitry-sur-Seine)

Caractéristiques	Normes associées	Résultats	Codes associés	Catégories associées
Sulfates solubles dans l'eau	[NF EN 1744-1, 2014]	0,06	CR _B , CR _C	SS 0,2
Masse volumique réelle	[NF EN 1097-6, 2014]	2,61	CR _B , CR _C	≥2,0 t/m ³
Absorption avec fines	[NF EN 1097-6, 2014]	9,4	CR _B , CR _C , CR _D	À déclarer
Influence sur le temps de prise	[NF EN 1744-6, 2007]	15	CR _C , CR _D	A ₄₀
LA (10/40)	[NF EN 1097-2, 2010]	29	CR _B , CR _C	LA ₄₀
Alcalis	[LCP n° 37]	0,022	CR _B , CR _C , CR _D	À déclarer

Tableau 28.5

Exemple du chantier expérimental de Chaponost – Propriétés des granulats recyclés selon NF EN 933-11 [NF EN 933-11, 2009]

	R _{cu}	R _c	R _u	R _b	R _a	R _g	X	FL
4/20 recyclé	98 %	87 %	11 %	1,5 %	1,3 %	0 %	0,2 %	0,49 cm ³ /kg
Classification	R _{cu95}		Ra ₁₀		XR _{g0,5}		FL ₂	
	CR _B		CR _B		CR _D		CR _B	

Compte tenu des résultats du classement, les gravillons utilisés sur le chantier de Chaponost sont classés en type 3. Il faut cependant noter que, si le but était de se conformer aux normes en vigueur, ces granulats n'auraient pas été acceptés. Toutefois, aucun problème n'est apparu durant le chantier, ni après son exécution (voir chapitre 22 « Dallage : Chaponost »). Peut-être que l'augmentation de la déformation du béton avec le taux de substitution, plus élevée que signalée dans l'état de l'art (voir chapitre 10 « Propriétés mécaniques instantanées »), est due à la nature de ces GBR spécifiques.

En ce qui concerne les sables de GBR, les résultats pratiques de la campagne d'essai sont conformes aux spécifications figurant dans le Tableau NA.4 de la norme [NF EN 206/CN, 2014].

Tableau 28.6

Exemple du chantier expérimental de Chaponost – Propriétés des sables recyclés (Laboratoire Lafarge, Vitry-sur-Seine)

Caractéristiques	Normes associées	Résultats	Catégories associées
Sulfates solubles dans l'eau	[NF EN 1744-1, 2014]	0,15	SS 0,7
Masse volumique réelle	[NF EN 1097-6, 2014]	2,55	≥ 1,7 t/m ³
Absorption avec fines	[NF EN 1097-6, 2014]	9,8	–
Influence sur le temps de prise	[NF EN 1744-6, 2007]	20	A40

28.2.1.2. Essais sur bétons

Les contrôles sur les bétons ont été effectués à la fois par le producteur de béton aux fréquences prévues par la norme [NF EN 206/CN, 2014] et par l'utilisateur (l'entrepreneur), selon les fréquences énumérées dans la norme NF DTU 21 et le Fascicule 65 pour les bâtiments et ouvrages de génie civil respectivement. Les clauses du marché ou les clauses techniques particulières fournissent les compléments nécessaires pour ces contrôles. Concernant les ouvrages de génie civil, des contrôles supplémentaires sont menés par le contrôleur extérieur, notamment lors des opérations critiques de la construction afin de lever les points d'arrêt.

Dans le cas où des seuils d'indicateurs de durabilité sont spécifiés dans le contrat, les contrôles portent également sur la vérification de la conformité des résultats obtenus aux différentes étapes de la mise au point et de la vérification de la conformité de la formule de béton (études, convenance et contrôle lors de la mise en œuvre).

Les contrôles portent sur la caractérisation des propriétés du béton frais et du béton durci et le cas échéant sur la détermination des propriétés de durabilité.

28.2.2. Contrôle qualité des bétons

La conformité aux exigences de la production est vérifiée en s'assurant que la centrale de BPE a obtenu le droit d'usage du marquage NF BPE (conformément au référentiel de certification [NF 033, révision 24, 2016]) ou un équivalent. Dans d'autres cas, une description du système de contrôle de la production, tel que prévu dans la norme [NF EN 206/CN, 2014], doit être disponible et accompagné d'un relevé des contrôles effectués, permettant de s'assurer de la conformité du béton au sens de cette même norme.

Pour les bétons destinés aux ouvrages de génie civil, la centrale de BPE doit satisfaire aux spécifications supplémentaires énumérées à l'annexe B du Fascicule 65. En cas de fabrication *in situ* ou dans une usine de béton préfabriqué, la centrale de malaxage doit satisfaire les spécifications du référentiel de l'annexe B du Fascicule 65. Vérifier que cette condition a été remplie implique typiquement un audit du système qualité, qui peut ensuite être complété par des essais lors de la fabrication. Au cours de cet audit, il peut être pertinent de vérifier les conditions de stockage des GBR.

Au moment de la livraison, la vérification du bon de livraison permet d'assurer la conformité de la commande. Pour les chantiers de génie civil relevant du Fascicule 65, le bon de livraison est complété par un bon de pesée, ce qui permet de contrôler le respect des exigences de production, notamment en matière de dosage des constituants et de rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{eq}}$ (rapport eau efficace sur liant équivalent). Cette disposition est également imposée aux chantiers de bâtiment de catégorie C étendue aux éléments particuliers PA et PB (voir § 26.1.2).

28.2.3. Contrôle qualité avant coulage : essais de convenance

Avant coulage de l'ouvrage, une épreuve de convenance est organisée afin de vérifier le respect des caractéristiques du béton fabriqué dans les conditions et avec le matériel prévu sur le chantier.

Tableau 28.7

Exemple de programme d'essais pour les essais de convenance dans le cas du bâtiment des archives de Mitry-Mory. t_0 et t_{30} correspondent respectivement au moment où le béton a été livré et 30 minutes après (voir chapitre 22)

Essai	CEMEX bétons et laboratoire	Cerema (chantier)
Température du béton	1 mesure à t_0	1 mesure à t_0
Consistance (affaissement)	1 test à $t_0 + t_{30}$	1 test à $t_0 + t_{30}$
Rc_{2j}	3 éprouvettes t_{30}	–
Rc_{7j}	3 éprouvettes t_{30}	–
Rc_{28j}	3 éprouvettes t_{30}	3 éprouvettes t_{30}
Rt_{28j} (fendage)	3 éprouvettes t_{30}	éprouvettes t_{30}

- affaissement (mm) [NF EN 12350-2, 2012] ;
- Rc : résistance à la compression à 1, 7 et 28 jours (MPa) [NF EN 12390-3, 2012] ;
- Rt : résistance à la traction par fendage à 1, 7 et 28 jours (MPa) [NF EN 12390-6, 2012].

28.2.4. Contrôle des formules de béton

Ces contrôles portent sur la vérification des propriétés du béton frais et durci, en plus de la mesure d'indicateurs de durabilité et de caractéristiques mécaniques, le cas échéant. La liste des essais couramment pratiqués est donnée ci-dessous.

Il convient de noter que la qualité des résultats obtenus au cours de ces essais doit être accompagnée de la certification ou de l'accréditation des laboratoires participants. Par exemple, l'accréditation COFRAC (COmité FRANçais d'ACcréditation) garantit la conformité aux exigences de la norme [NF EN ISO/CEI 17025, 2005] et assure la fiabilité des résultats obtenus.

28.2.4.1. Résistance à la compression, affaissement, teneur en air

- affaissement (mm) [NF EN 12350-2, 2012] ;
- air (%) [NF EN 12350-7, 2012] ;
- Rc : résistance à la compression à 1, 7 et 28 jours (MPa) [NF EN 12390-3, 2014] ;
- Rt : résistance à la traction par fendage à 1, 7 et 28 jours (MPa) [NF EN 12390-6, 2012].

28.2.4.2. Durabilité

- porosité à l'eau à 90 jours (%) [NF P 18-459, 2010] ;
- perméabilité à l'air à 90 jours ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$) [NF XP P 18-463, 2011] ;

- diffusion des chlorures à 90 jours ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) [NF XP P 18-462, 2012] ;
- profondeur de carbonatation à 90 jours (essai accéléré) (mm) [NF XP P 18-458, 2008].

28.2.4.3. Caractéristiques mécaniques : module d'élasticité, retrait

- module d'élasticité (E) à 28 jours (GPa) [ISO 1920-10, 2010] ;
- retrait entre 1 et 28 jours (%) [NF XP P 18-427, 1996].

28.2.4.4. Programme de contrôle

Un programme de contrôle doit être établi afin de permettre la déclaration de la conformité des lots de contrôle sur la base des spécifications du marché, et pour vérifier les propriétés du béton à la mise en œuvre.

Tableau 28.8

Exemple de programme de contrôle dans le cas du bâtiment des Archives de Mitry-Mory (voir chapitre 24 « Bâtiment pour archives administratives : CD 77 »)

Essai	Contrôle du producteur (laboratoire et chantier)	Contrôle externe (chantier)
Température du béton	1 mesure à la centrale	1 mesure
Consistance	1 essai/bétonnage	1 essai/bétonnage
R _{C2j}	3 éprouvettes sur chantier	
R _{C7j}	3 éprouvettes en centrale et 3 éprouvettes sur chantier	
R _{C28j}	3 éprouvettes en centrale et 3 éprouvettes sur chantier	3 éprouvettes sur chantier
R _{t28j} (fendage)	3 éprouvettes sur chantier par bétonnage	3 éprouvettes sur chantier
Retrait total [NF XP P 18-427, 1996]	1 essai	1 essai
Module élastique (28 jours)	3 éprouvettes	3 éprouvettes
Porosité à l'eau (90 jours)		2 éprouvettes
Perméabilité à l'air (90 jours)		2 éprouvettes
Carbonatation accélérée (90 jours)		2 éprouvettes

28.2.5. Contrôle des parements et inspection initiale

Après décoffrage, les parements doivent être examinés afin de vérifier leur conformité aux critères d'acceptation, conformément au référentiel applicable

au type d'ouvrage construit et aux spécifications contractuelles, qui doivent également indiquer les lots soumis au contrôle.

Pour les bâtiments, le référentiel est la norme NF DTU21 [NF DTU 21, 2017].

Pour les ouvrages de génie civil, ce référentiel est le Fascicule 65 [Fascicule 65, 2014].

Selon le type d'ouvrage, il peut s'avérer nécessaire d'effectuer une inspection initiale détaillée afin de relever les défauts et les imperfections constatés à la fin de l'exécution. Une telle inspection détaillée est obligatoire pour les ouvrages d'art et sert à établir un état de référence indispensable au suivi dans le temps de l'ouvrage.

28.3. Conduite pour le recyclage des gravillons de GBR

26.3.1. Taux d'incorporation conformément aux valeurs normalisées

Les taux de substitution maximums autorisés figurent dans la norme NF EN 206/CN [NF EN 206/CN, 2014] (voir Tableau 28.9).

Ces maximums sont limités par les dispositions du Fascicule 65 [Fascicule 65, 2014] : utilisation de gravillons recyclés de type 1, selon la norme NF EN 206/CN [NF EN 206/CN, 2014], provenant de la démolition d'ouvrages de génie civil dont la traçabilité est assurée pour les bétons de classe de résistance inférieure à C35/45 (i.e. XC1, XC2, XC3, XC4 ou XF1), avec un taux de substitution maximum de 20 %.

Tableau 28.9

Taux de substitution maximum (en %) selon le type de GBR [NF EN 206/CN, 2014]

Type de granulat recyclé	Classe d'exposition			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XD1, XS1	Toutes les autres classes d'exposition
Gravillons de GBR de type 1	60	30	20	0 ⁽¹⁾
Gravillons de GBR de type 2	40	15 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾
Gravillons de GBR de type 3	30	5	0	0
Sable de GBR	30	0	0	0

(1) Pour les bétons de chaussées, un taux de substitution de 20 % est autorisé pour les gravillons provenant de la déconstruction des couches de base et de roulement des chaussées routières ou aéroportuaires et dont la traçabilité est assurée.

Ces taux sont vérifiés en arrondissant le taux de substitution au % le plus proche

Pour les projets satisfaisant le taux de substitution maximum autorisé par la réglementation en vigueur, il convient de vérifier que les dispositions relatives au contrôle aient été mises en place par le fournisseur de béton, l'entrepreneur, le Maître de l'Ouvrage et le Maître d'Œuvre (voir Tableau 28.10).

Tableau 28.10

Contrôle des constituants et du béton

	GBR	Fournisseur du béton	Entreprise	Maître de l'ouvrage	Maître d'Œuvre
Bâtiments	Fiche technique produit des granulats avec caractéristiques selon [NF EN 12620 + A1, 2008], [NF 18 545, 2011] et [NF EN 206/CN, 2014]	Respect des contrôles sur les constituants et le béton selon la norme [NF EN 206/CN, 2014]	Contrôle, selon la catégorie de construction et de structure particulière. Respect de la fréquence d'échantillonnage et des spécifications du contrat	Selon les spécifications du contrat (Loi MOP)	Vérification de la conformité du référentiel en phase de contrôle, de conception et de réalisation et de contrôle sur chantier. Contrôle de réception
Ponts fascicule 65	Idem + marque NF (certification des bétons de structure)/ son équivalent ou une procédure de contrôle	Idem + vérification du respect des exigences de l'annexe B du Fascicule 65	Contrôle extérieur conformément aux Tableaux 4.A et 4.B du Fascicule 65. Décomposition en parts de structure selon les spécifications contractuelles	Idem + contrôle extérieur conformément aux Tableaux 4.A et 4.B du Fascicule 65 levée des points d'arrêt	Inspection détaillée initiale et finale de l'exécution

28.3.2. Taux d'incorporation au-dessus des valeurs normalisées

Les retours des projets expérimentaux suggèrent la possibilité d'augmenter le taux de substitution sans encourir d'impacts notables sur la formulation du béton, sur le coulage ou sur la qualité finale des ouvrages. Dans la pratique, ce taux varie de 30 % à 40 % pour les classes d'exposition courantes et pour des granulats de GBR de type 1.

Si le taux de substitution dépasse les valeurs imposées par la norme NF EN 206/CN [NF EN 206/CN, 2014], complétée par les prescriptions figurant dans le Fascicule 65 [Fascicule 65, 2014] pour les ouvrages de génie civil, il est alors nécessaire d'effectuer les contrôles supplémentaires suivants, en plus de ceux décrits dans le paragraphe 28.3.1 (Tableau 28.10) :

- caractérisation des propriétés mécaniques : module élastique, retrait ;

- vérification de la prise en compte des caractéristiques mécaniques dans les notes de calcul pour la partie de la structure concernée, ainsi que des effets ultimes sur le taux d'armatures ;
- plan de contrôle du béton adapté à l'ouvrage particulier et calé sur les exigences d'exécution de la classe 3 de la norme NF EN 13670/CN [NF EN 13670/CN, 2013] ;
- caractérisation d'indicateurs pertinents de durabilité au regard de l'exposition de la structure et des risques de dégradation du béton.

28.4. Conclusion

En conclusion, en matière de contrôle les exigences des référentiels normatifs associés à la production des GBR et à l'exécution des ouvrages permettent si elles sont mises en œuvre correctement de garantir leur qualité et leur durabilité. Ces référentiels prévoient des contrôles pour les opérations de production des GBR, la production et le coulage du béton. Ces contrôles permettent de vérifier la conformité selon les propriétés associées à chaque étape du procédé. En outre, l'ensemble constitue une véritable « boîte à outils », qu'il convient d'utiliser de façon appropriée en fonction des particularités et de la criticité des parties d'ouvrage à réaliser. Cette organisation des contrôles doit être adaptée à chaque opération et concrétisée par un programme de contrôles mis en place avant le commencement des travaux, en associant tous les acteurs du processus de construction. La traçabilité des contrôles et le respect des procédures d'essai garantissent aussi la fiabilité des résultats et de la conformité des ouvrages par rapport aux spécifications du marché.

Il est important de préciser que l'utilisation de GBR mène à plus de vigilance et donc à plus d'essais de contrôle, notamment dans la phase de leur production, afin de garantir une bonne qualité et la durabilité du béton. Néanmoins, les GBR sont soumis au même essai de contrôle que les granulats naturels.

Partie VIII.

Impact environnemental du recyclage du béton

Adélaïde Feraille¹

Dans un contexte de plus en plus contraint en termes de développement durable et d'économie circulaire, il est nécessaire d'évaluer le processus de recyclage du béton sous l'aspect environnemental. C'est l'objectif des cinq chapitres de cette partie de l'ouvrage.

Tout d'abord, rien n'est possible si la ressource en granulats de béton recyclé (GBR) n'est pas clairement identifiée. Ainsi, le chapitre 29 (« Ressource et variabilité des granulats recyclés en France ») est consacré à la caractérisation qualitative et quantitative des ressources françaises en matériaux susceptibles d'être recyclés dans le béton.

Divers scénarios ont été envisagés pour établir l'analyse du cycle de vie (ACV) présentée au chapitre 30, où les impacts environnementaux des bétons de GBR et des bétons de granulats naturels sont comparés. Une analyse multicritère des facteurs qui impactent l'ACV de ces bétons (teneur et type de ciment, taux de substitution des granulats, distances de transport des granulats et du béton) est proposée dans une étude de cas.

Le rejet dans le sol et dans les eaux souterraines de substances issues des matériaux de construction est une préoccupation croissante, prise en compte dans la réglementation européenne sur les matériaux de construction. Le chapitre 31 répond aux deux questions suivantes : « En quoi la lixiviation du béton de GBR peut-elle être différente de celle d'un béton à base uniquement de granulats naturels » et « Le béton de GBR respecte-t-il les seuils fixés pour l'évaluation environnementale des matériaux de construction » ?

1. Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech.

Le chapitre 32 décrit comment le multi-recyclage peut modifier les propriétés du béton, dès le deuxième recyclage. Les résultats montrent une détérioration des propriétés du béton avec le nombre de recyclages, et ils confirment l'intérêt de limiter le taux de recyclage pour contrôler les performances du béton lors du multi-recyclage. Ils suggèrent également qu'à long terme, une séparation du granulats naturel d'origine de la pâte de ciment est souhaitable pour limiter la quantité de pâte de ciment dans le béton multi-recyclé.

L'organisation de l'industrie du BTP est complexe et comprend de nombreux acteurs. Pour garantir le succès de la préservation à la fois de l'environnement, de l'économie et de la société, une coordination entre les différents acteurs est nécessaire. Ainsi, le chapitre 33 examine comment le recyclage des déchets de construction et de démolition pourrait se développer pour produire de nouveaux bétons et devenir une composante majeure de la construction durable.

Chapitre 29.

Disponibilité et variabilité des granulats recyclés en France

L. Mongeard¹, D. Collonge², F. Jezeque³

Résumé – Ce chapitre est consacré à la caractérisation qualitative et quantitative de la ressource en matériaux réutilisables dans le béton. Elle comporte deux volets :

- une étude statistique basée sur l'exploitation de données tirées des rapports réalisés par les Cellules Economiques Régionales de la Construction (CERC) agissant dans le cadre des plans départementaux (ou régionaux) de prévention et de gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics. Cette étude permet d'avoir une évaluation nationale et cohérente par type de déchets, et de proposer plusieurs pistes d'évolution liées aux pratiques observées ;*
- une enquête réalisée auprès de treize plateformes de recyclage représentatives de la diversité nationale, comparant la qualité des granulats recyclés d'un lieu de production à l'autre, avec un focus sur deux plateformes particulières pendant deux ans.*

La première étude exploite les conclusions du suivi des plateformes, dans l'objectif de repérer les moyens d'actions permettant d'augmenter le recyclage du béton dans le béton, en tenant compte des pratiques actuelles. Par ailleurs, pour onze des principales agglomérations françaises, un inventaire géographique des plateformes de recyclage a été dressé afin d'étudier leur répartition spatiale par rapport aux sites de production de béton (centrales de bétons prêts à l'emploi et usines de préfabrication). Ces données ont servi à établir les scénarii d'une analyse du cycle de vie (ACV) des bétons de GBR réalisée sur quatre villes (Lyon, Lille, Strasbourg, Bordeaux, voir chapitre 28). Enfin, les objectifs de recyclage de la loi de transition énergétique de 2015 ont été considérés, en s'intéressant à la concurrence qui risque d'apparaître entre utilisations des GBR dans les travaux routiers (sous-couches de chaussées, remblais, etc.) et dans les bétons.

1. ENS Lyon, Lyon.

2. LafargeHolcim France, Clamart.

3. Sigma Béton, L'Isle d'Abeau.

29.1. Introduction

Le projet national RECYBETON vise non seulement à accroître les connaissances sur le recyclage du béton, mais aussi à mieux connaître le contexte du recyclage des déchets inertes, en termes de flux et de qualité, par nature de matériaux. Les chiffres récents sur les Déchets de Construction et de Démolition (DCD) montrent que leur valorisation est très avancée, contrairement à certaines idées reçues qui circulent encore. Il est donc utile de préciser la ressource nationale disponible en DCD pouvant produire des granulats réutilisables dans le béton, et de répondre à la question suivante : les pratiques de recyclage actuelles, orientées vers la réutilisation en sous-couches de chaussées ou en remblais, sont-elles transposables au domaine du béton, en termes de qualité notamment ? La nature, les quantités, qualités et localisations de ces sources sont des éléments clés pour déterminer si le recyclage du béton dans le béton a un sens ou un intérêt. Ces questions sont abordées dans le présent chapitre.

29.2. Ressource en matériaux inertes recyclables dans le béton (volumes et localisations)

Les estimations présentées sont basées sur les études des Cellules Économiques Régionales de la Construction [CERC, 2018], réalisées dans le cadre du diagnostic nécessaire aux plans départementaux (ou régionaux) de prévention et de gestion des déchets des chantiers du BTP. En mars 2015, ces études avaient été publiées pour 32 départements. Leur méthodologie rigoureuse a permis de récolter des informations détaillées sur les déchets produits. Cette évaluation a été extrapolée à l'échelle nationale, afin d'avoir une estimation des ressources potentiellement recyclables dans le béton pour l'ensemble du pays.

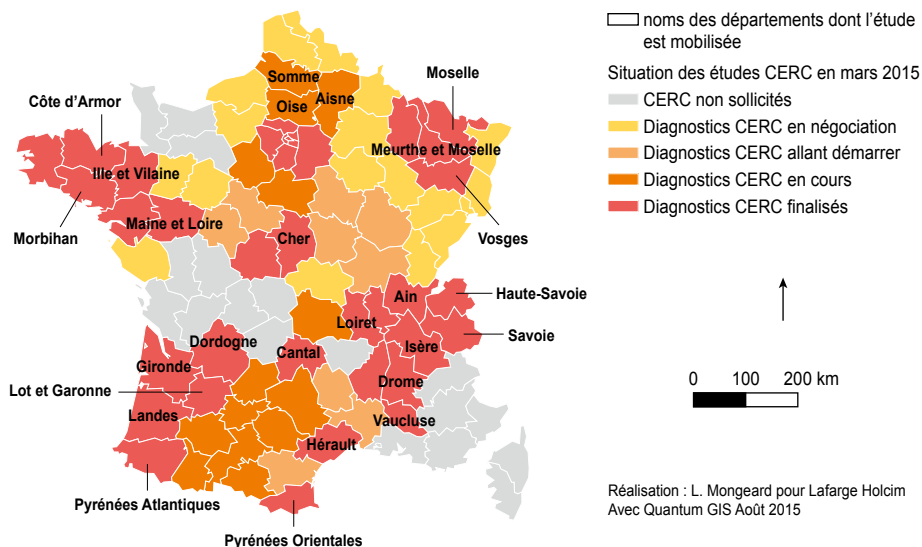
29.2.1. Volumes

Les chiffres généraux concernant la production des déchets issus des activités du BTP à l'échelle nationale sont publiés par l'ADEME [ADEME, 2016a], mais les enquêtes spécifiques ne sont pas fréquentes. Ceux publiés en 2016 font référence à l'étude sur les déchets minéraux de 2012, elle-même établie à partir de l'enquête réalisée en 2008 sur les « déchets du secteur du BTP » [CGDD-SOeS, 2015]. La dernière enquête du ministère est basée sur des données de 2014. Elle a été publiée par SOeS en mars 2017 [CGDD-SOeS, 2017b] et vient d'être intégrée dans la dernière édition 2017 « déchets – chiffres-clés » des rapports de l'ADEME [ADEME, 2016a].

Dans le cadre du projet national RECYBETON, il est apparu opportun de réaliser un inventaire des matériaux recyclables dans le béton à partir de données précises et récentes, recoupées et validées par les acteurs du BTP

Figure 29.1

Sources de l'étude. En rouge ocre, les rapports départementaux publiés en mars 2015 ayant servi à l'évaluation



et du recyclage. Même si les études réalisées par les CERC ne couvrent pas tout le territoire national, leur robustesse est apparue comme un gage déterminant pour établir un inventaire de qualité. En effet, ces études sur les flux de matériaux et les pratiques locales sont réalisées directement à partir des données des plateformes recevant les déchets issus des travaux publics, des chantiers de démolitions, de ceux de construction et des collectivités locales (chiffre d'affaires et volumes). La cohérence entre les tendances locales résultant de l'analyse des questionnaires des CERC et les rapports nationaux a été vérifiée au fur et à mesure que les publications du ministère en charge de l'environnement étaient disponibles.

L'étude a débuté sur l'approche publiée en 2008, avec environ 237 millions de tonnes de déchets inertes issus des travaux de déconstruction [CGDD-SOeS, 2010]. Cette situation a servi de base pour les estimations faites à partir de 2010. Une mise à jour a été publiée en 2015, réduisant l'estimation à 231 millions de tonnes [CGDD-SOeS, 2015]. En 2017, selon les données de la dernière enquête nationale basée sur l'année 2014, une réactualisation à 215 millions de tonnes en matériaux inertes a été publiée, dont 131 millions de tonnes (61 %) de matériaux réutilisés (recyclés ou ayant servi au réaménagement des carrières) [CGDD-SOeS, 2017b]. Certes les chiffres ont été mis à jour, mais les principaux enseignements de l'étude de 2014 n'ont pas changé en 2017 : c'est pourquoi les résultats sont présentés avec une fourchette d'estimation portant sur 2008 et 2014.

En janvier 2018, le GIE « réseau des CERC » a publié les résultats des enquêtes réalisées dans 71 départements (voir le site internet des CERC [CERC]). Les conclusions pour les 32 départements enquêtés en 2014 ont été confirmées, avec les mêmes proportions pour les différentes typologies des déchets de déconstruction.

29.2.1.1. Typologie des déchets

Les constituants des DCD pouvant entrer dans la composition des bétons sont définies et décrits dans les normes [NF EN 12620, 2008] (granulats) et [NF EN 206, 2013] (bétons). Il s'agit des catégories suivantes : béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton (Rc) ; granulats non liés, pierres naturelles, granulats traités aux liants hydrauliques (Ru) ; verre (Rg). Ces familles de constituants – plus ou moins mélangés à d'autres – sont aussi catégorisées dans les différents types de déchets définis par la directive européenne [Décision n° 2014/955/UE]. Il s'agit des :

- déchets de béton : comprenant généralement le béton armé et non armé, les produits en béton, le mortier et une partie des ouvrages en béton (code déchet 17 01 01) ;
- briques (code 17 01 02), tuiles et céramiques (code 17 01 03) ;
- mélanges de béton, briques, céramiques, etc. (code 17 01 07) ;
- verres non recyclables (code 17 02 02) ;
- terres et cailloux (code 17 05 04).

Selon les enquêtes des CERC, les déchets de type briques, tuiles, céramique et verres non recyclables (pouvant causer des problèmes de stabilité chimique au sein du béton) sont plutôt marginaux. Les autres déchets – granulats et agrégats d'enrobés, sols – sont impropres au béton. Dans les terres et cailloux, qui représentent la majorité des déchets de construction, de démolition et des travaux publics (deux tiers des déchets inertes), il est possible de distinguer les tout-venants (graves et matériaux rocheux) des terres et cailloux (17 05 04), ces dernières constituant une ressource secondaire importante en tant que granulats recyclables dans le béton.

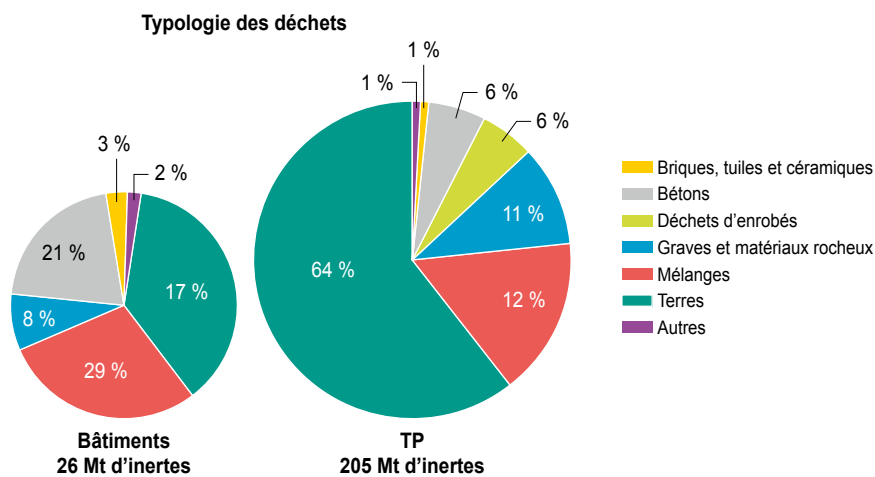
Dans les enquêtes, l'évaluation de la ressource potentielle est menée dans une logique environnementale globale afin d'identifier tous les matériaux disponibles éligibles aux besoins de la construction ; idéalement il faudrait tenir compte aussi des contraintes locales, de l'espace de stockage des déchets, de leur qualité et la temporalité des opérations, qui déterminent l'optimisation de leur utilisation, selon les chantiers et les règles de recyclage adoptées.

La figure ci-dessous (Figure 29.2) donne la répartition des déchets inertes dans les départements étudiés : il s'agit d'une synthèse intégrant des données de 2014, la mise à jour de 2017 [CGDD-SOeS, 2017] et les flux identifiés dans les rapports des CERC. Rappelons que l'étude de 2014 était basée exclusivement sur les taux de déchets ayant transité sur les plateformes de recyclage. La récente publication du GIE-CERC a confirmé ces données (voir le site internet des CERC) [CERC]. Dans le cadre de la Loi Relative à la Transition Énergétique

pour la Croissance Verte [loi n° 2015-992], il est devenu obligatoire d'identifier tous les déchets et leurs proportions respectives : les différences avec les extrapolations du rapport de 2014 sont là aussi marginales.

Figure 29.2

Proportion de déchets inertes selon leur origine, pour le Bâtiment et pour les Travaux Publics (résultats basés sur 32 départements, soit environ 84 millions de tonnes de matériaux inertes)



29.2.1.2. Méthode d'évaluation des flux

Diverses approches ont été menées pour traiter statistiquement les données issues des départements et pour définir la méthodologie permettant d'extrapoler les résultats à l'ensemble du territoire métropolitain. Le raisonnement a été conduit en termes de tendance.

L'estimation trouvée pour la ressource nationale est inférieure ou de l'ordre de 200 millions de tonnes de déchets inertes au maximum. Ce chiffre est plus faible que celui du ministère (215Mt à 231Mt), mais il s'explique par le fait que : i) l'enquête du ministère prend en compte des pratiques non autorisées, qui n'apparaissent pas dans les enquêtes des CERC ; ii) la consolidation des données locales introduit un biais statistique à la baisse. Ce constat montre la difficulté d'identifier les ressources secondaires potentielles à l'échelle nationale, dans un contexte où les estimations sont régulièrement remises en cause.

Un taux de recyclabilité effectif, dans chacune des trois catégories de déchets sélectionnés (béton, mélanges de déchets de béton, grave/pierres) a été considérée, car le recyclage ne se fait jamais en totalité. Les hypothèses retenues sont basées sur les pratiques observées dans différentes plateformes [Jezequel, 2017] (voir § 29.2) et sur les dires d'experts en matière de déchets. Les taux suivants ont ainsi été pris en compte : 60 % pour le béton ; 30 % pour les déchets mixtes inertes ; 75 % pour les graves et les matériaux rocheux.

Les enquêtes des CERC sur les plateformes de recyclage inventorient les déchets selon leur type, en provenance de la déconstruction. Or, une part des déchets de béton vient des centrales à béton (mobiles ou fixes) et des usines de préfabrication. Sur la base des données UNICEM de 2014 (pour être cohérent avec les bilans précédents), et en considérant un taux moyen de déchets de 3 %, on trouve alors que les 20 millions de tonnes de bétons pour la préfabrication et les 37 millions de mètres cubes de béton prêt à l'emploi (BPE) produits chaque année ont généré une masse de déchets de béton de l'ordre de 3,2 millions de tonnes ((volume de BPE × masse volumétrique du béton × 20 Mt + 37 Mt) × 3 % de déchets). De ces 3,2 millions de tonnes, 60 % sont des déchets de béton durci, soit environ 2 millions de tonnes, le reste étant des boues non inertes plus difficiles à valoriser.

29.2.1.3. Évaluation de la ressource potentielle globale

En croisant les résultats des enquêtes, les vérifications de données avec les éléments précédents, on trouve alors (voir Figure 29.3) que sur les 215-231 millions de tonnes de déchets inertes provenant de la démolition, des travaux publics et des industries du béton (BPE et préfabrication) :

- environ 71 millions de tonnes sont des déchets de béton, des mélanges de déchets inertes contenant du béton, des gravas et des pierres ;
- environ 38 millions de tonnes de ces déchets constituent la ressource secondaire potentiellement recyclable dans le béton, dont 12 à 21 millions de tonnes de déchets de béton et de mélanges à base de béton.

Figure 29.3

Ressource potentielle de déchets inertes pour le recyclage des granulats dans le béton (données SOeS 2014/2017 – UNICEM 2014)

Déchets	Bâtiment		TP		BTP	Industrie	Potentiel RECYBETON		
	Quantité	%	Quantité	%			Quantité	%	Quantité
Terres	12	37 %	118	64 %	130				
Mélanges	9	29 %	21	12 %	30		30	30 %	9
Graves et matériaux rocheux	2	8 %	20	11 %	22		22	75 %	17
Déchets d'enrobés	0	0 %	12	6 %	12				
Béton	7	21 %	10	6 %	17	2	19	60 %	12
Briques, tuiles et céramiques	1	3 %	1	1 %	2				
Autres	0	2 %	2	1 %	2				
Totaux	31		184		215		71		38

↑ Rappports CERC (32 départements)
↑ Taux de recyclabilité pour la qualité

29.2.2. Analyse de l'industrie et marges d'évolution dans la construction

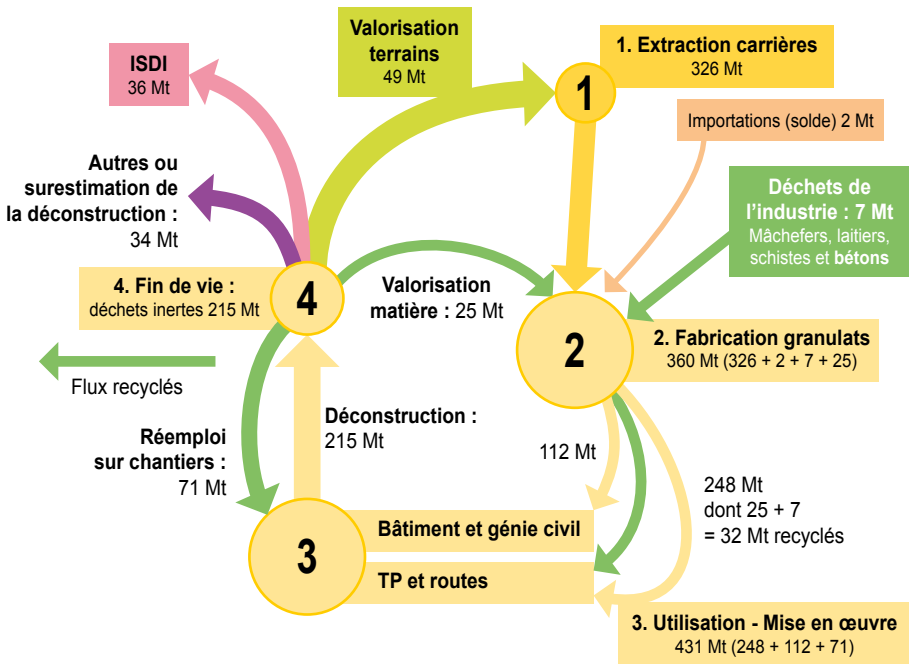
Le diagramme ci-dessous (Figure 29.4), établi à partir des données nationales du ministère de 2014 [CGDD-SOeS, 2017a] et des données de l'UNICEM [UNICEM], synthétise les flux de matériaux de construction par origine et par

type d'utilisation pour la France entière. Les flèches vertes représentent le recyclage :

- étape 1 = extraction des carrières ;
- étape 2 = production de granulats naturels à partir des ressources primaires des carrières, complétée par des ressources secondaires (industrie et DCD) ;
- étape 3 = mise en œuvre dans les ouvrages du Bâtiment-génie civil et des Travaux Publics, en distinguant la part utilisée uniquement dans le béton ;
- étape 4 = fin de vie (démolition) où les déchets inertes sont soit réutilisés directement sur chantier (cycle court avec peu de transport), soit recyclés sur les plateformes dédiées ou dans les carrières pour produire des granulats secondaires, des matériaux de réaménagement ou pour être mis en décharges (ISDI = Installation de stockage des déchets inertes).

Figure 29.4

Évaluation des flux annuels de matériaux de construction (données SOeS 2014/2017 – UNICEM 2014)



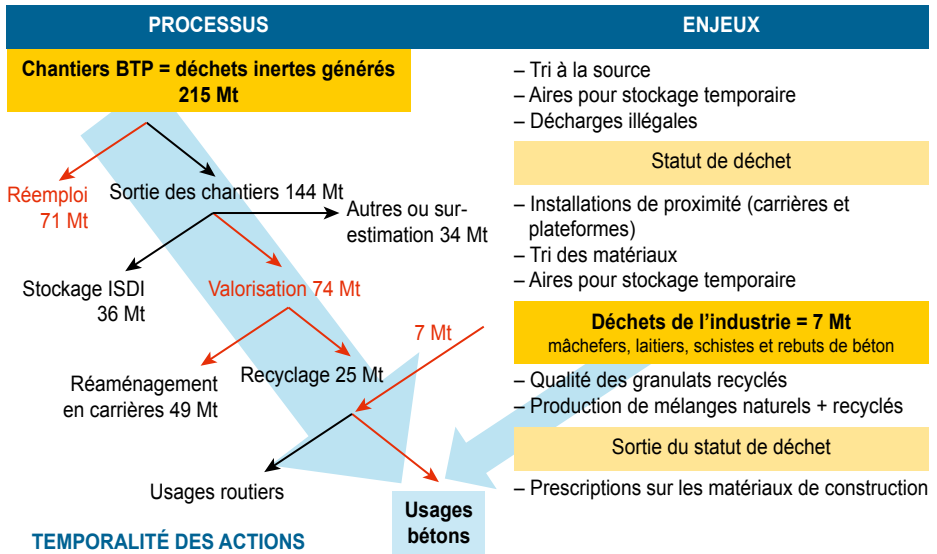
Cette synthèse montre que les pratiques du recyclage fonctionnent efficacement, mais que les ouvrages en béton n'en bénéficient pas réellement.

Les différentes étapes du recyclage des déchets de démolition et des déchets industriels présentées ci-dessous (Figure 29.5) montrent que des marges de progrès existent encore, puisque le secteur du béton ne récupère aujourd'hui

que de faibles quantités de GBR (moins d'un million de tonnes selon les données de 2014).

Figure 29.5

Étapes conduisant au recyclage des déchets inertes (GBR) dans le béton (données SOeS 2014/2017 – UNICEM 2014)



29.2.3. Conséquences de la Loi sur la Transition Énergétique pour une Croissance Verte : pratiques locales à l'échelle des chantiers de construction

La réutilisation des DCD dans les Travaux Publics constitue le flux le plus important du recyclage : il représente globalement 71 à 81 Mt de déchets inertes, dont principalement les terres et cailloux (45 à 50 Mt) et les bétons, les mélanges de matériaux à base de béton et les graves et matériaux rocheux (22-25 Mt au total). La distance de transport entre lieu de production et lieu de réutilisation est un critère prépondérant de ces flux, au regard des pratiques dans les travaux publics. Par ailleurs, les objectifs de la Loi sur la Transition Énergétique pour une Croissance Verte [Loi n° 2015-992 du 17 août 2015] renforcent la nécessité de maintenir tous ces déchets à disposition, dans la mesure du possible, pour ce type de travaux.

Parmi les mesures de cette loi, reprises dans le Code de l'environnement et les règles des marchés publics, il y a la nécessité, lorsque l'État et les collectivités locales sont Maître d'Ouvrage, de prendre en compte les matières et les

déchets résultant des travaux de construction, de démolition et d'entretien des routes. Ainsi, d'ici à 2020 :

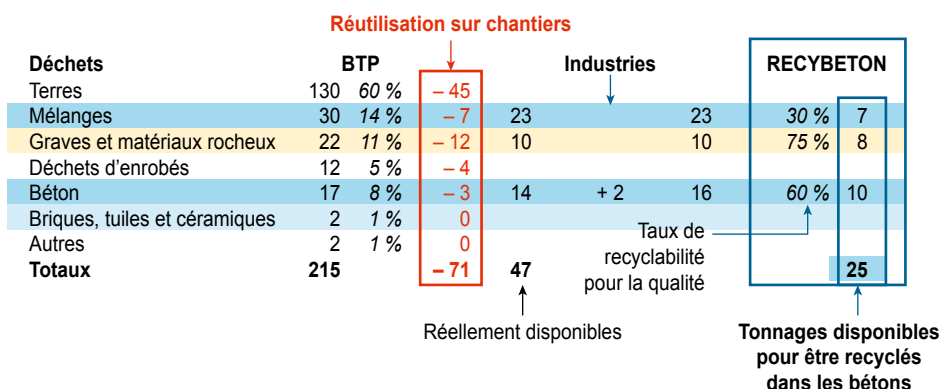
- 70 % des déchets provenant des travaux routiers doivent être recyclés ou valorisés (au sens de la directive 2008/98/CE) ;
- 60 % des matériaux mis en œuvre dans les travaux routiers proviendront du recyclage et de la réutilisation, avec un minimum de 20 % pour les couches de surface et 30 % pour les corps de chaussées.

29.2.3.1. Évaluation de la ressource totale effective

Par conséquent, la ressource potentiellement disponible pour l'industrie du béton doit être réévaluée (Figure 29.3), en excluant la part des déchets qui restera utilisée dans les travaux routiers, pour obtenir le chiffre réel de la ressource disponible en GBR destinés aux bétons. Les calculs sont donnés Figure 29.6.

Figure 29.6

Ressources en GBR effectivement disponibles pour les bétons, sans la part réutilisée dans les travaux publics (données SOeS 2014/2017 – UNICEM 2014)



La comparaison des quantités de GBR réellement disponibles (25 Mt) avec les quantités de granulats (naturels, etc.) actuellement utilisées dans le bâtiment et le génie civil (112 Mt – Figure 29.4) donne un taux de substitution théorique de 22 %. Cette approche est très globale car elle sous-entend que les matières premières et les déchets sont répartis de manière uniforme sur l'ensemble du territoire, ce qui est loin de la réalité (voir chapitre 28 « Analyse du cycle de vie du béton de GBR »). Par ailleurs, deux autres critères doivent aussi être considérés : le calendrier des opérations et la configuration des travaux. L'organisation des travaux ne permet pas toujours de réutiliser les déchets inertes générés, ni l'accès à des aires libres pour les élaborer, même si les matériaux sont disponibles et adaptés.

Par ailleurs, les ouvrages de génie civil dédiés aux aménagements routiers – actuellement non concernés par les règles imposant un taux de recyclage – tels

les glissières de sécurité, les ponts, les tunnels, les fondations, les ouvrages de collecte des eaux, etc. sont majoritairement en béton, et ils ont représenté 39 Mt en 2014. Ces ouvrages constituent un marché potentiel pour les bétons de GBR et, en outre, ils peuvent conduire à des gains de temps et de transports si les opérations de recyclage et de production du béton se font à proximité des travaux. La volonté de promouvoir le béton de GBR et la logique de proximité immédiate pourraient alors converger vers des règles spécifiant le devoir d'intégrer des matériaux recyclés provenant des chantiers eux-mêmes. Néanmoins, cela suppose une évolution des méthodes de gestion et des techniques de travaux, ainsi que des ajustements dans la formulation et la production du béton.

Pour compléter cette réflexion prospective, il faudrait anticiper les flux sur le long terme en tenant compte autant que possible des changements à venir dans nos modes de vie et dans les techniques constructives imposés par les enjeux énergétiques et par la gestion économe de l'espace et des ressources. Par exemple, la densification de l'habitat peut conduire à reconstruire la ville sur elle-même, ce qui entraînerait une augmentation des déchets de déconstruction urbains – qui sont majoritairement de déchets mixtes –. De même, les changements dans les modes de transport peuvent amener à devoir modifier le réseau routier, et à remobiliser les matériaux qui le constituent. Les évolutions ne sont donc pas simples à quantifier aujourd'hui. Toutefois, il faut insister sur un point essentiel qui ressort de l'étude (Figure 29.6) : la première voie pour accroître l'utilisation des GBR dans le béton est d'augmenter le taux de « recyclabilité » des différentes familles de déchets.

29.2.4. Territoire national : nécessité d'optimiser la répartition des sites de recyclage

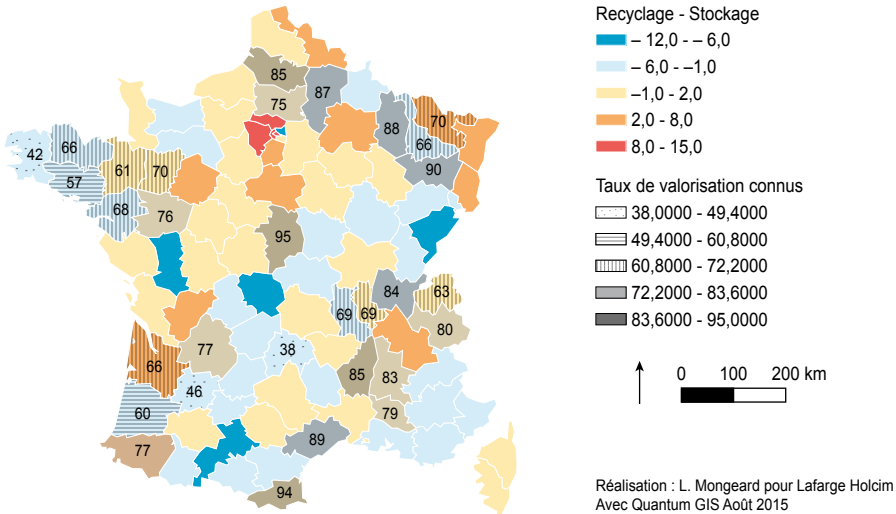
29.2.4.1. Analyse par Départements

À défaut de pouvoir utiliser le site internet lancé fin 2017 [Materrio, 2017] où seront recensées toutes les informations sur le recyclage en France (un des engagements pour la croissance verte signé en 2016 entre l'UNICEM et les Ministères impliqués), la présente étude s'est basée sur les données de celui de la Fédération Française du Bâtiment [FFB]. Les plateformes de stockage et de recyclage des DCD situées à moins de 30 km des zones urbaines ont ainsi pu être identifiées. Une grande hétérogénéité entre départements apparaît. Certains n'ont aucune plateforme de recyclage à moins de 30 km de leur agglomération principale. Les départements les mieux dotés ont aussi les taux de valorisation les plus élevés, et le prix des déchets recyclés peut même dépasser celui des granulats naturels, selon le contexte économique local.

Dans une zone donnée, le recyclage est corrélé au nombre de plateformes adaptées aux volumes de déchets traité. Un système d'information géographique (SIG) a été utilisé dans le cadre d'une thèse (en cours de publication). Il permet d'avoir une analyse territoriale optimisant la localisation des sites de recyclage.

Figure 29.7

Approche par Départements selon le nombre de sites
(plateformes de recyclage – mise en décharge) et taux de récupération



Mise en relation de l'écart entre nombre de sites de recyclage et nombre de sites de stockage dans un rayon de 30 km de l'agglomération principale de chaque département avec les taux de valorisation des 32 départements connus

Ce type d'outils doit aider à anticiper les flux de matériaux en fonction des travaux planifiés, en intégrant les ressources naturelles et subsidiaires, ainsi que les sites de production de béton (centrales de BPE, usines de préfabrication). Malheureusement, ce SIG n'a pu être testé que dans deux régions (Nord de la France et Grand Lyon) et son développement s'est heurté à des difficultés de collecte de données (pour des raisons de confidentialité ou de stratégie).

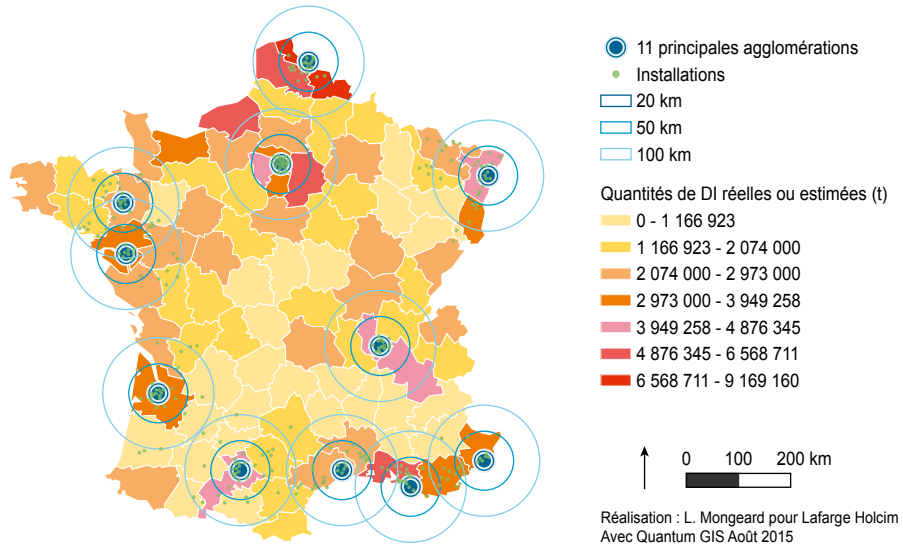
29.2.4.2. Analyse portant sur les onze principales villes de France

L'analyse a été menée également sur 11 grandes villes françaises, et plus spécifiquement sur quatre d'entre elles afin de rassembler des données locales pertinentes destinées à une ACV (Analyse du Cycle de Vie) réalisée par l'Université de Strasbourg [Idir *et al.*, 2015]. Pour chaque zone urbaine considérée, les données concernant la production des granulats (carrières, plateformes de recyclage) et la production des bétons (centrales de BPE et usines de préfabrication) ont été collectées.

Ces données ont permis de définir la répartition spatiale (périmètres) autour de chaque zone urbaine, selon les volumes de déchets inertes recensés, réels ou estimés (Figure 29.8). Par exemple, cette analyse montre que la ville de Strasbourg est mal équipée en plateformes de recyclage, par rapport à sa production de déchets, en raison vraisemblablement de sa proximité avec les nombreuses carrières de granulats naturels de la région.

Figure 29.8

Répartition spatiale des installations de traitement des matériaux inertes à proximité des 11 principales zones urbaines, représentées par des points (noirs ou blancs)



29.2.5. Conclusion sur les ressources en matériaux inertes

- les flux de déchets sont principalement opportunistes : travaux de démolition, construction de routes, de bâtiments, etc. Un contrôle plus strict des pratiques de gestion des déchets orienterait les flux vers les sites autorisés (remblaiement, mise en décharge, tri et recyclage) : actuellement en estime que 10 % de l'ensemble des déchets inertes sont encore mis en décharges sauvages ;
- l'étude a souligné que ces flux de déchets sont très inégalement répartis sur le territoire : une douzaine de zones urbaines concentre les principales ressources en matériaux de démolition. Elles constituent des zones les plus favorables au recyclage et elles peuvent doper l'approvisionnement en GBR dans le secteur du béton. Les simulations spatiales montrent que le réseau actuel – carrières et plateformes de recyclage – fonctionne et qu'il sera encore plus performant avec l'arrivée des évolutions normatives attendues, qui doivent inciter à l'incorporation des GBR dans le processus industriel. Contrairement au secteur routier, l'industrie du béton repose principalement sur des (petites) unités industrielles (usines de préfabrication et de béton prêt à l'emploi). C'est pourquoi il faudra probablement du temps pour que les évolutions techniques soient mises en œuvre ;
- comme pour les granulats naturels, le marché du recyclage reste et restera local et dépendant des acteurs présents, des ressources et de leur localisation, des volumes concernés, des stratégies commerciales,

des équipements et des capacités techniques. Ce constat est logique, car il s'agit de matériaux lourds pour lesquels l'empreinte environnementale est dominée par les transports. Au final, c'est le prix qui sera l'un des paramètres clés pour l'utilisation des GBR dans l'industrie du béton.

29.3. Enquête sur les plateformes de recyclage – étude géographique et temporelle de la qualité

Cette partie s'intéresse à la variabilité des différentes caractéristiques des granulats recyclés (majoritairement des GBR) disponibles sur le marché français, et susceptibles d'être incorporés dans la production des bétons. La première partie de l'étude concerne leur variabilité géographique. La seconde est un examen de leur variabilité dans le temps.

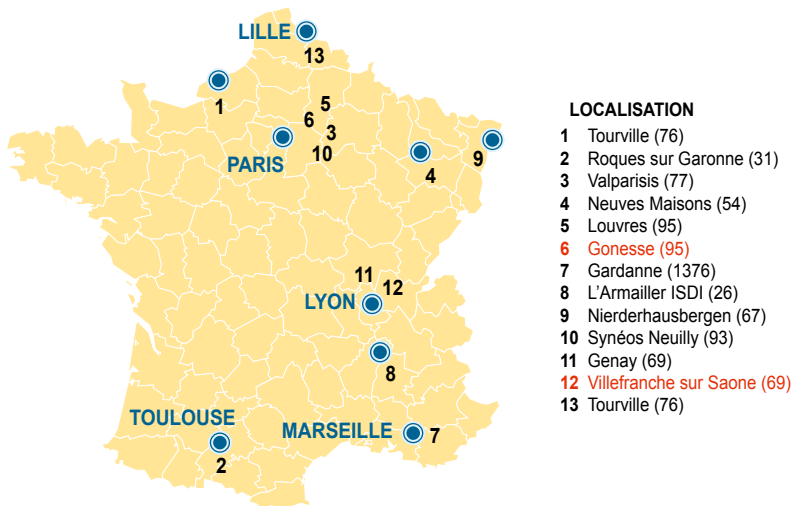
Treize plateformes de recyclage réparties sur le territoire national ont été retenues, avec 16 productions différentes réparties en 45 coupures granulaires (sables et gravillons). L'objectif était de définir la variabilité de la production des granulats recyclés afin de distinguer les paramètres permettant de contrôler la qualité des bétons de GBR produits, en termes de durabilité et de propriétés mécaniques et rhéologiques notamment.

29.3.1. Plateformes de granulats recyclés

Les treize plateformes de recyclage ayant participé à l'étude ont été sélectionnés sur la base du volontariat (Figure 29.9).

Figure 29.9

Cartographie des treize plateformes de recyclage ayant participé à l'étude ; surligné en jaune, les deux plateformes suivies pendant 2 ans



29.3.2. Granulats recyclés étudiés

La liste des matériaux étudiés est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 29.1).

Tableau 29.1

Liste des granulats recyclés testés selon les différentes plateformes

Plateforme	Production n° (1 à 13 – 1 à 16)	Granulat livré	Granulat testé	Commentaire
1	1_1	Sable 0/4 (origine 0/63)	0/4	Granulat d'usine 0/63 mm
		Gravillon 4/12,5 (origine 0/63)	4/12,5	
	1_2	Sable 0/4 (origine 4/63)	0/4	Granulat d'usine 4/63 mm
		Gravillon 4/12,5 (origine 4/63)	4/12,5	
	1_3	Sable 0/4 (origine 20/63)	0/4	Granulat d'usine 20/63 mm
		Gravillon 4/12,5 (origine 20/63)	4/12,5	
2	2_4	Tout venant 0/31,5 CNL	0/4	Fabriqué en laboratoire
			4/10	
3	3_5	Sable lavé 0/4	0/4	Granulats lavés
		Gravillon lavé 4/10	4/10	
		Gravillon lavé 10/20	10/20	
	3_6	Tout venant brut 0/31,5	0/4	Tamisés en laboratoire
			4/10	
4	4_7	Sable recyclé 0/4	0/4	-
		Gravillon recyclé 4/10	4/10	
		Gravillon recyclé 10/20	10/20	
5	5_8	Sable concassé 0/6,3	0/6,3	-
		Gravillon concassé 6,3/12,5	6,3/12,5	
		Gravillon concassé 6,3/20	6,3/20	
6	6_9	Sable recyclé 0/4	0/4	-
		Gravillon recyclé 4/10	4/10	
		Gravillon recyclé 10/20	10/20	

Plateforme	Production n° (1 à 13 – 1 à 16)	Granulat livré	Granulat testé	Commentaire
7	7_10	Sable de béton 0/4	0/4	–
		Gravillon de béton 4/10	4/10	
		Gravillon de béton 10/20	10/20	
8	8_11	Tout venant recyclé 0/20 (R21020)	0/4	Tamisés en laboratoire
			4/10	
			10/20	
9	9_12	Tout venant recyclé 0/22,4	0/4	Tamisés en laboratoire
			4/10	
			10/20	
10	10_13	Sable recyclé 0/5	0/5	–
		Gravillon recyclé 6,3/10	6,3/10	
		Gravillon recyclé 10/31,5	12,5/31,5	
11	11_14	Tout venant 0/20 GRM	0/4	Tamisés en laboratoire
			4/10	
			10/20	
12	12_15	Tout venant recyclé 0/22,4	0/4	Tamisés en laboratoire
			4/10	
			10/22,4	
13	13_16	Sable recyclé 0/6,3	0/6,3	–
		Gravillon recyclé 6,3/14	6,3/14	
		Gravillon recyclé 6,3/20	6,3/20	

29.3.3. Programme des essais

Les GBR échantillonnés sur les sites de production ont été analysés en appliquant les protocoles d'essai dédiés à leur utilisation dans le béton, définies dans la norme européenne [NF EN 12620+A1, 2008] et ses paragraphes spécifiques aux granulats recyclés. Les résultats ont été comparés aux seuils fixés par la norme française [NF P 18-545, 2011]. Ainsi, les granulats provenant d'une même plateforme ou de différentes plateformes ont pu être comparés, qu'ils aient ou non des granularités différentes ou qu'ils soient issus ou non de traitements différents.

Tableau 29.2

Liste des essais et des normes d'essai appliqués aux sables de GBR

Essai	Norme	Coupure testée
Analyse granulométrique par tamisage	[NF EN 933-1, 2012]	0/D fourni ou fabriqué en laboratoire
Essai au bleu de méthylène	[NF EN 933-9, 1999]	0/2 mm
Masse volumique réelle et absorption d'eau	[NF EN 1097-6, 2014] § 9	0,063/4 mm
Absorption d'eau 0/D	[NF EN 1097-6, 2014] § 9 complétée par la note 1 du Tableau 54 de la [NF P 18-545, 2011]	0/4 mm
Sulfate soluble dans l'eau des GBR	[NF EN 1744-1, 2014] § 10.2	0/4 mm
Sulfate soluble dans l'acide	[NF EN 1744-1, 2014] § 12	0/4 mm
Détermination de l'influence d'un extrait de granulats recyclés sur le temps de prise initial du ciment	[NF EN 1744-6, 2007]	0/4 mm

Tableau 29.3

Liste des essais et des normes d'essai appliqués aux gravillons de GBR

Essai	Norme	Coupure testée
Analyse granulométrique par tamisage	[NF EN 933-1, 2012]	d/D fourni ou fabriqué en laboratoire
Aplatissement	[NF EN 933-3, 2012]	4/D
Essai de classification des constituants des gravillons recyclés	[NF EN 933-11, 2009]	8/D des gravillons disponibles de chaque production
Los Angeles	[NF EN 1097-2, 2010] § 5	6,3/10 et 10/14
Masse volumique réelle et absorption d'eau	[NF EN 1097-6, 2014] § 8	6,3/10 et 10/20
Sulfate soluble dans l'eau des GBR	[NF EN 1744-1, 2014] § 10.2	d/D du gravillon disponible de chaque production
Sulfate soluble dans l'acide	[NF EN 1744-5, 2007]	d/D du gravillon disponible de chaque production
Détermination de l'influence d'un extrait de granulats recyclés sur le temps de prise initial du ciment	[NF EN 1744-6, 2007]	d/D du gravillon disponible de chaque production

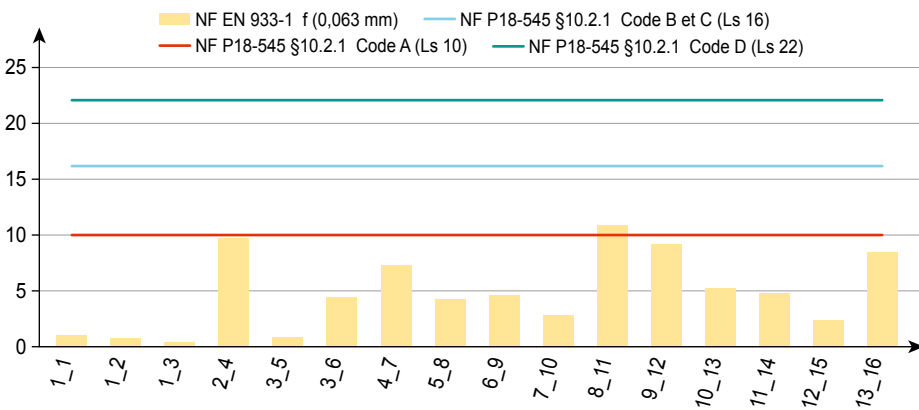
29.3.4. Résultats concernant la variabilité géographique

Les figures ci-après présentent les principaux résultats, avec les différents seuils issus des normes traitant des granulats recyclés (normes produits et normes d'essai).

D'après la norme NF P18-545 (article 10), 15 des 16 sables de GBR sont classés en code f_A (teneur en fines ≤ 10 %, ou ≤ 11 % pour les matériaux de $D > 4$ mm), et 1 seul est classé en code f_B (teneur en fines comprise entre 10 et 16 %). Les sables de GBR ayant des teneurs en fines comprises entre 4,4 et 10,9 % sont des matériaux non lavés.

Figure 29.10

Teneur en fines (%) des sables de GBR, selon la norme NF EN 933-1, et seuils selon la norme NF P 18-545



Pour les gravillons de GBR, 23 des 29 échantillons ont une teneur en fines inférieure ou égale au seuil unique autorisé de 1,5 % pour une utilisation dans le béton (code Gr_A de la norme NF P18-545), 5 pourraient être utilisés dans le béton (< 4 %), et un seul dépasse la valeur de 4 %. La qualification de 5 échantillons ayant une teneur en fines comprises entre 1,5 % et 4 % nécessite un essai au bleu de méthylène sur la fraction $0/125 \mu\text{m}$ (annexe A de la norme NF EN 933-9, et selon le renvoi (1) du Tableau 45 de la norme NF P18-545).

Au niveau de la propreté, 12 des 16 sables de GBR sont classées en code P_A (valeur de bleu inférieure ou égale au seuil unique de 1,5 %, selon l'article 10 de la norme NF P18-545). Ils peuvent donc être utilisés dans le béton. Les GBR non classés le sont aussi en raison d'une teneur en fines trop élevée dans les gravillons. On peut alors imaginer pour ceux-ci la mise en place d'un traitement spécifique (système de lavage ou de séparation des fines) qui permettrait de réduire la teneur en fines et d'améliorer concomitamment leur propreté.

Figure 29.11

Teneur en fines (%) des gravillons de GBR, selon la norme [NF EN 933-1, 2012] et seuil selon la norme [NF P 18-545, 2011]

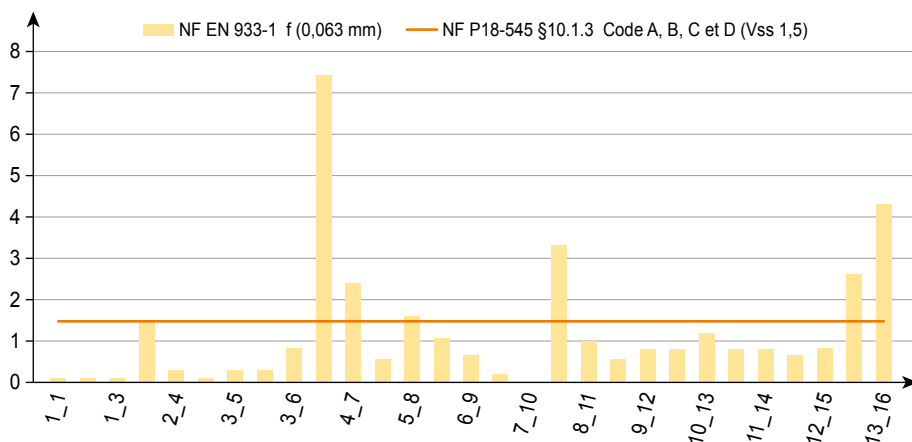
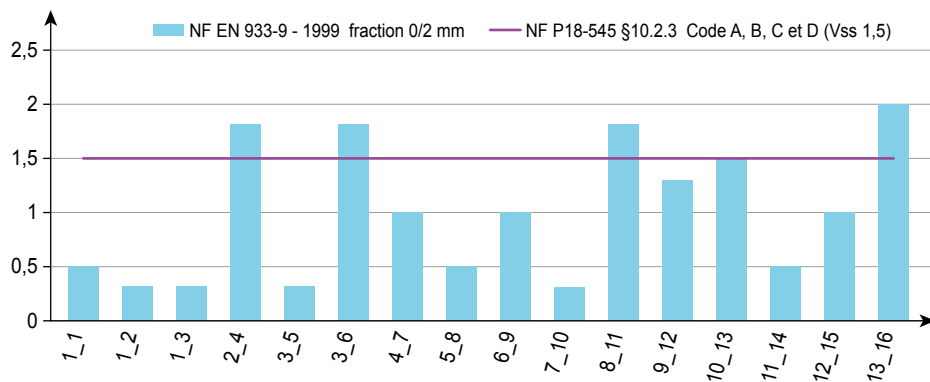


Figure 29.12

Valeur de bleu des sables de GBR selon la norme [NF EN 933-9, 2013] et seuil selon la norme [NF P 18-545, 2011]



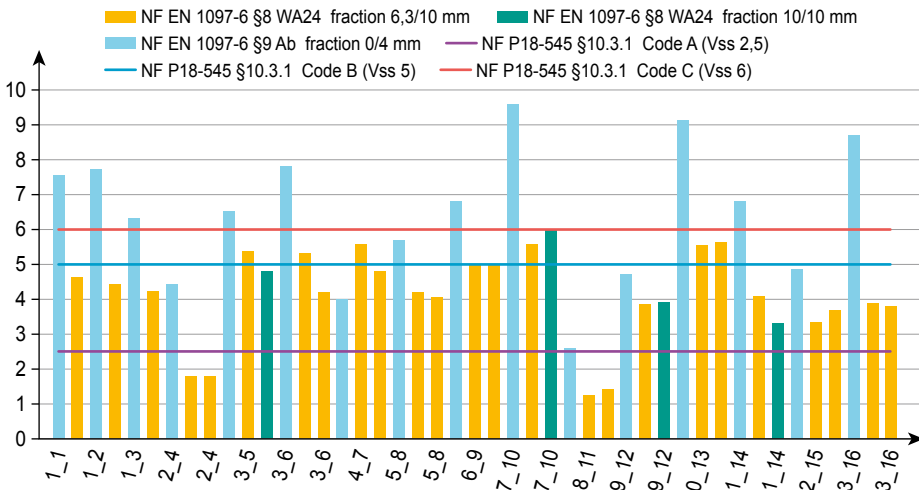
Les coefficients d'aplatissement mesurés ont montré que tous les gravillons de GBR testés ont des formes appropriées pour être utilisés dans le béton. De même, leur coefficient Los Angeles indique qu'ils ont une bonne résistance aux chocs.

L'absorption d'eau des GBR est un point sensible, en particulier pour les sables, comme le confirment les valeurs élevées mesurées durant l'enquête (Figure 29.13). Une utilisation de ces GBR dans le béton nécessite alors des précautions particulières, afin de prévenir les désordres rhéologiques,

mécaniques et de durabilité. La comparaison du coefficient d'absorption d'eau mesuré sur les coupures 6,3/10 mm et 10/14 mm ne montre pas de différence significative. À l'inverse, les absorptions d'eau des sables de GBR sont plus élevées que celles des gravillons de GBR, et ce, que l'on prenne ou non en compte les fines des sables (Figure 29.12). La présence d'une proportion plus élevée de pâte de ciment dans le sable de GBR explique probablement ce résultat.

Figure 29.13

Coefficient d'absorption d'eau des sables de GBR (noir) et des gravillons de GBR 6,3/10 mm et 10/20 mm (lignes pointillées et hachurées) selon la norme [NF P18-545, 2011] et la norme d'essai [NF EN 1097-6, 2014]



La quantification des constituants des gravillons et les teneurs en sulfates solubles dans l'eau des sables et gravillons (Figure 29.14) donnent généralement des résultats conformes. Le croisement des valeurs les moins satisfaisantes montre l'importance d'un tri efficace à la source lors du recyclage, pour réduire au maximum les composants indésirables dans les GBR.

Les essais pour déterminer l'influence d'un extrait de granulat recyclé sur le temps de prise du ciment ont tous donné un résultat inférieur ou égal au seuil le plus restrictif de 10 minutes. Selon l'article 10 de la norme [NF P18-545, 2011], les GBR testés sont donc tous classés en code A_B. La tendance observée est un retard de prise, avec 22 valeurs négatives (retard), 9 valeurs positives (accélération) et 1 valeur nulle, sans qu'aucune corrélation franche n'apparaisse entre sables et gravillons de GBR (Figure 29.15).

Ces résultats montrent que tous ces GBR peuvent être utilisés dans le béton.

Figure 29.14

Teneur en sulfates solubles dans l'eau des GBR (SS en %) selon la norme [NF EN 1744-1, 2014] et seuils de la norme [NF P18-545, 2011]

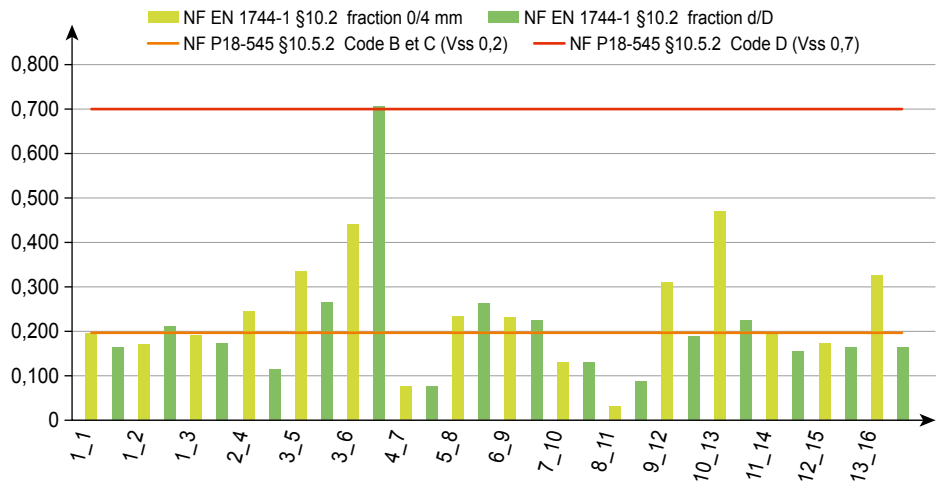
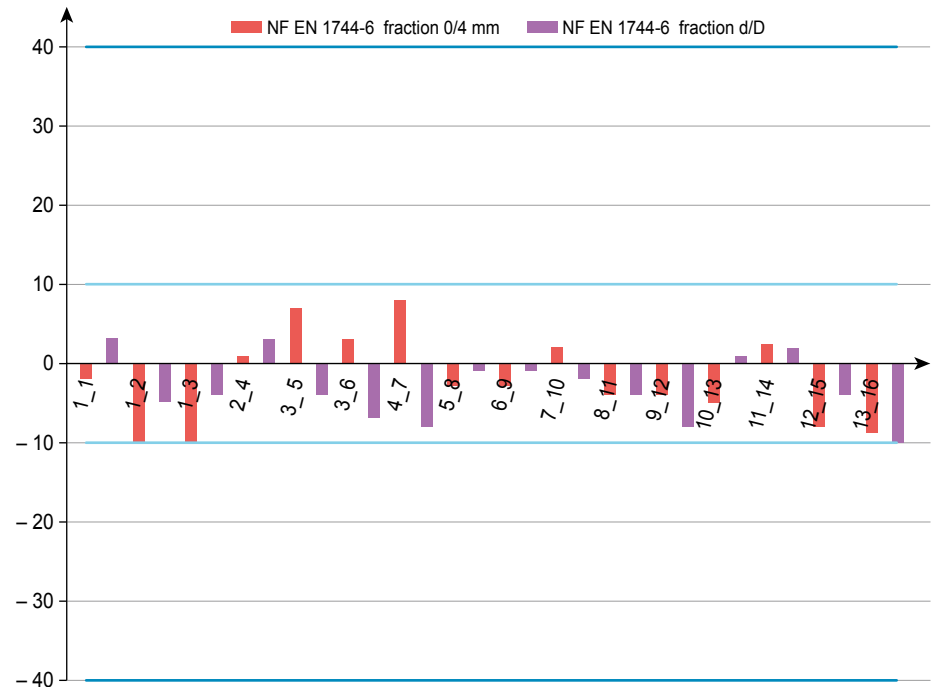


Figure 29.15

Influence d'un extrait de granulat recyclé sur le temps de prise initial du ciment (en minutes) mesuré selon la norme d'essai [NF EN 1744-6, 2007] et seuils correspondants de la norme [NF P18-545, 2011]



29.3.5. Étude de la variabilité sur deux plateformes pendant deux ans

Le protocole d'essais précédent (§ 29.3.3) a été reconduit sur deux des seize plateformes testées, pour étudier la variabilité des GBR sur une période de production de deux ans : l'une est située à Gonesse (95), l'autre à Villefranche-sur-Saône (69). Au cours du premier semestre 2014 (de la période d'étude) cette dernière a été délocalisée à Anse (69), en gardant les mêmes flux de déchets inertes et le même personnel sous le contrôle de la même entreprise (notation Villefranche/Anse)

Concernant la plateforme de Gonesse, sur l'ensemble des caractéristiques mesurées, les sables de GBR, dans leur grande majorité, ont toujours été classés en code D, selon l'article 10 de la norme [NF P18-545, 2011]. Un seul a été classé B. Pour les gravillons de GBR, quatre d'entre eux ont été classés B, six C, un D et deux non classés.

Pour la plateforme Villefranche-sur-Saône/Anse, la plupart des sables de GBR ont été classés D. Un a été classé B, un C et un non classé. Les gravillons de GBR sont classés respectivement B (3 échantillons), C (4 échantillons) et non classés (6 échantillons).

Tableau 29.4

Liste des GBR testés sur les deux plateformes de recyclage

Plateforme n° (nouvelle réf.)	Production n° (1 à 2 – 1 à 12)	Granulat livré	Granulat testé	Commentaire
6 (1)	1_1	Sable de GBR 0/4	Sable 0/4	–
		Gravillon de GBR 4/10	Gravillon 4/10	
		Gravillon de GBR 10/20	Gravillon 10/20	
	1_2	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	–
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_1	Grave recyclé 0/22,4	Sable 0/4 Gravillon 4/10 Gravillon 10/20	Fabriqué au laboratoire

Le béton recyclé

Plateforme n° (nouvelle réf.)	Production n° (1 à 2 – 1 à 12)	Granulat livré	Granulat testé	Commentaire
6 (1)	1_3	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	-
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
	1_4	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	-
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_2	Grave recyclée 0/22,4	Sable 0/6,3 Gravillon 6,3/20	Fabriqué au laboratoire
6 (1)	1_5	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	-
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
	1_6	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	-
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
	1_7	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	-
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_3	Grave recyclée 0/22,4	Sable 0/6,3	Fabriqué au laboratoire
			Gravillon 6,3/20	
	2_4		Sable 0/6,3	
			Gravillon 6,3/20	
6 (1)	1_8	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	-
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_5	Grave recyclée 0/22,4	Sable 0/6,3 Gravillon 6,3/20	

Disponibilité et variabilité des granulats recyclés en France

Plateforme n° (nouvelle réf.)	Production n° (1 à 2 – 1 à 12)	Granulat livré	Granulat testé	Commentaire
6 (1)	1_9	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	–
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_6	Grave recyclée 0/22,4	Sable 0/6,3	Fabriqué au laboratoire
			Gravillon 6,3/20	
6 (1)	1_10	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	–
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_7	Grave recyclée 0/22,4	Sable 0/6,3	Fabriqué au laboratoire
			Gravillon 6,3/20	
6 (1)	1_11	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	–
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_8	Grave recyclée 0/22,4	Sable 0/6,3	Fabriqué au laboratoire
			Gravillon 6,3/20	
6 (1)	1_12	Sable de béton concassé 0/6,3	Sable 0/6,3	–
		Gravillon de béton concassé 6,3/20	Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_9	Grave recyclée 0/22,4	Sable 0/6,3	Fabriqué au laboratoire
			Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_10	Grave recyclée 0/22,4	Sable 0/6,3	Fabriqué au laboratoire
			Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_11	Grave recyclée 0/22,4	Sable 0/6,3	Fabriqué au laboratoire
			Gravillon 6,3/20	
12 (2)	2_12	Grave recyclée 0/22,4	Sable 0/6,3	Fabriqué au laboratoire
			Gravillon 6,3/20	

Figure 29.16

Valeur de bleu des sables de GBR des plateformes de Gonesse et de Villefranche-sur-Saône/Anse, selon [NF EN 933-9, 2013], et seuil selon [NF P18-545, 2011]

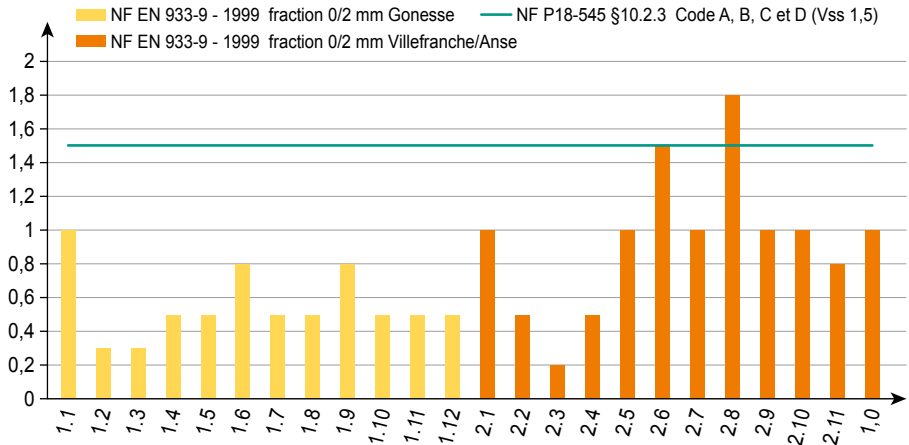
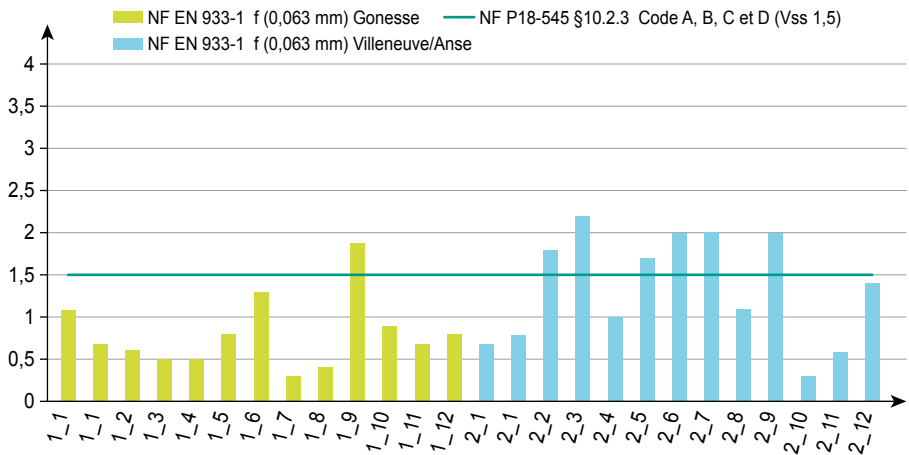


Figure 29.17

Teneur en fines (< 63µm) (%) dans les gravillons de GBR des plateformes de Gonesse et de Villefranche-sur-Saône/Anse, selon [NF EN 933-1, 2012], et seuil selon [NF P18-545, 2011]



Les analyses granulométriques ont parfois montré des teneurs élevées en fines (Figure 29.16 et Figure 29.17) et une granularité hors fuseau. Les coefficients d'aplatissement des gravillons de GBR ont toujours été satisfaisants, représentatifs de formes relativement cubiques et appropriées pour une utilisation dans le béton. Un seul résultat d'essai au bleu de méthylène a été hors spécification. Il s'agit d'un échantillon de sable de GBR préparé au laboratoire.

Les gravillons de GBR étaient composés à 95 % d'éléments en béton et de roches (Rc + Ru). Leur taux de fragments de terres cuites (Rb) est largement

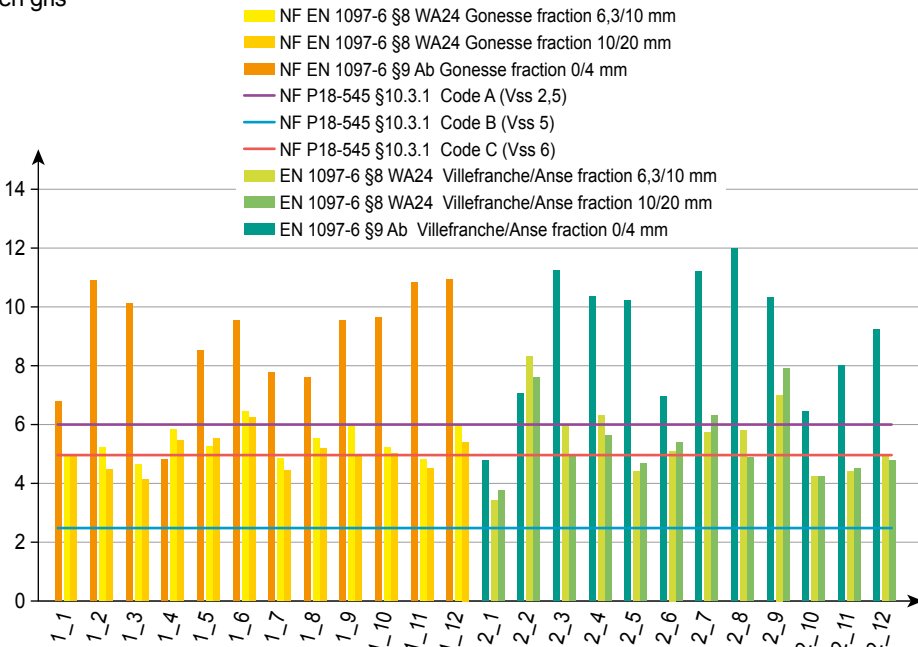
inférieur au seuil le plus restrictif de 10 %. Pour 23 échantillons, la proportion de verre et autres éléments (X + Rg) est inférieure au seuil le plus restrictif de 0,5 %, et un seul échantillon en contient entre 0,5 et 1 %. Aucun des 24 échantillons ne présente au taux d'éléments flottants (FL) supérieur au seuil le plus restrictif de 0,2 cm³/kg. La moitié des gravillons de GBR a une teneur en bitume inférieure à 1 %, l'autre moitié reste en dessous du (deuxième) seuil de 10 %.

En conclusion, les gravillons de GBR testés sont propres, sans composants flottants et ils ne contiennent que très peu de matériaux résiduels : 11 des 24 échantillons sont classés en code CR_B, selon l'article 10 de la norme [NF P18-545, 2011] ; 13 sont classés en code CR_C, 1 seul est hors code. Dans le cas présent, le classement des granulats est principalement influencé par la teneur en éléments bitumineux. À cet égard, il serait opportun de vérifier si les seuils actuels ne sont pas trop restrictifs, c'est-à-dire vérifier l'influence réelle des éléments bitumineux présents dans les GBR sur les propriétés des bétons.

Les gravillons de GBR ont une résistance conforme à une utilisation dans le béton, selon la norme [NF P18-545, 2011] : leur coefficient Los Angeles est proche de la limite entre code A et code B de la norme, article 10. La classe 6,3/10 a donné de meilleurs résultats que la classe 10/20 mm : est-ce que cette différence provient de la résistance du matériau d'origine ou bien du taux de pâte de ciment entre les deux classes testées ?

Figure 29.18

Absorption d'eau des granulats recyclés issus des deux plateformes, selon [NF EN 1097-6, 2014], et seuils selon [NF P18-545, 2011]. Sables en noir, gravillons 6,3/10 mm et 10/20 mm en gris



Reste à voir si la variabilité de ces résultats est à attribuer à la variabilité de la matière première ou à mettre au compte des méthodes d'essai, qui posent des difficultés de mise en œuvre en présence de fines, tout comme pour les sables naturels au demeurant. En tout état de cause, il faut rester attentif à cette difficulté qui risque de limiter, voire d'interdire l'utilisation des GBR pour la réalisation de certains bétons.

L'absorption d'eau des GBR est l'un des principaux paramètres influençant leur classement. Les valeurs mesurées – en particulier sur les sables de GBR – sont nettement supérieures à celles des granulats naturels (Figure 29.18). En règle générale, l'absorption d'eau des sables de GBR est supérieure à celle des gravillons de GBR, avec pour corollaire une masse volumique réelle plus faible. Cela provient de la quantité plus élevée de pâte de ciment dans les sables de GBR. On constate que la présence de fines (< 63 μm) augmente non seulement l'absorption d'eau des sables de GBR, mais aussi la dispersion statistique de ce paramètre. Reste à comprendre l'influence de la nature des fines sur ces résultats : est-ce la matière première ou la méthode d'essai qui provoque cette variabilité, sachant que l'essai est plus difficile à réaliser en présence de fines, comme déjà observé avec les granulats naturels ?

Un autre paramètre clé est la teneur en sulfates solubles dans l'eau des GBR, souvent proche du seuil le plus restrictif de l'article 10 de la norme [NF P18-545, 2011], voire parfois supérieure pour les sables de GBR (Figure 29.19).

Figure 29.19

Teneur en sulfates solubles dans l'eau (%) des sables de GBR issus des deux plateformes étudiées, selon [NF EN 1744-1, 2014], et seuils selon [NF P18-545, 2011]

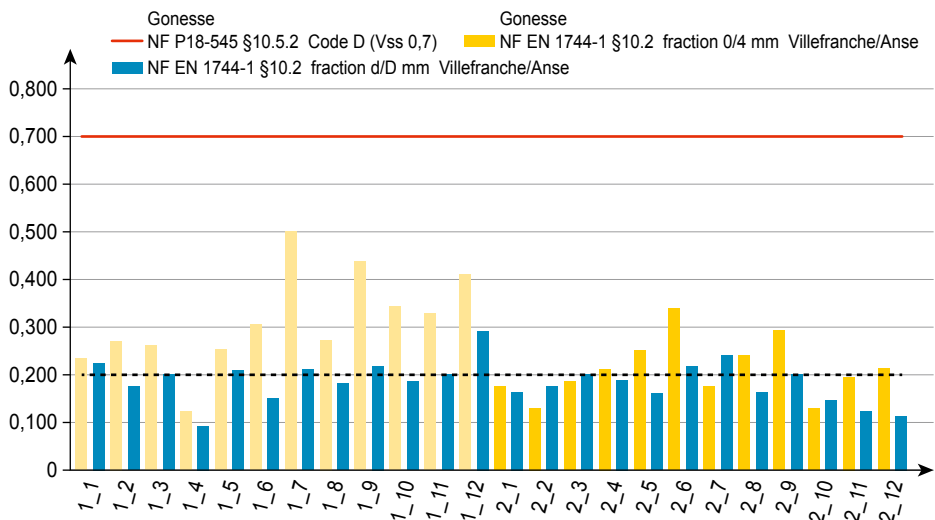


Figure 29.20

Teneur en chlorures solubles dans l'acide des GBR provenant des deux plateformes étudiées, selon la norme d'essai [NF EN 1744-5, 2007]

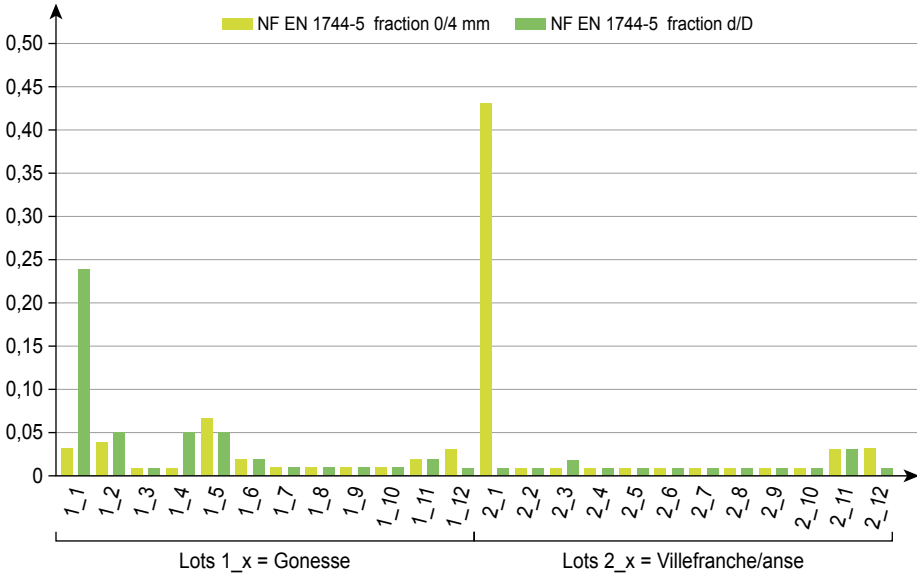
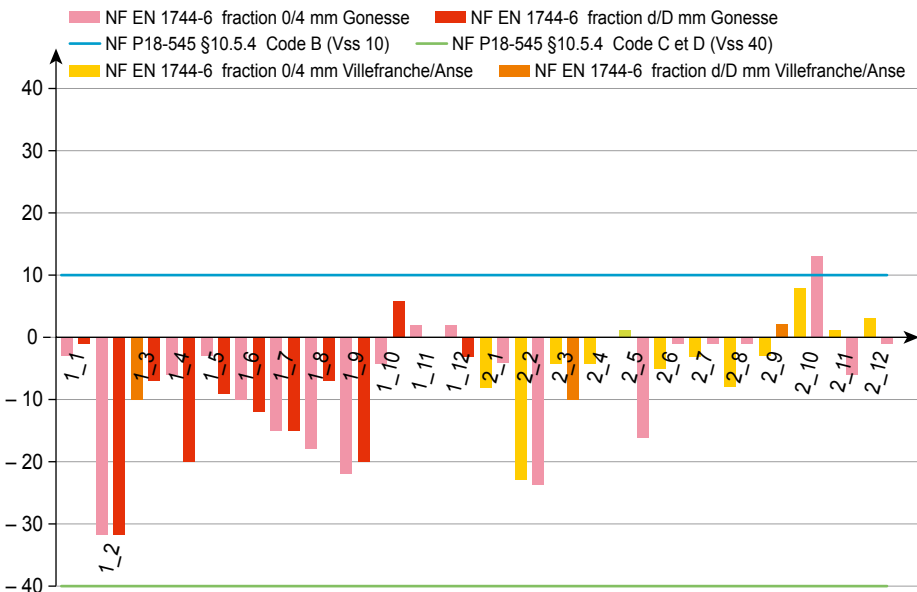


Figure 29.21

Effet de l'extrait de GBR sur la prise initiale du ciment (temps en minutes) – sables et gravillons provenant des deux plateformes étudiées, selon [NF EN 1744-6, 2007] et seuils selon [NF P18-545, 2011]



La norme [NF P18-545, 2011] ne fixe pas de seuil pour la teneur en chlorures solubles dans l'acide des granulats. Dans cette étude, deux résultats s'écartent largement des autres (Figure 29.20), probablement en raison d'une pollution des GBR ou d'un problème lors de l'essai. La question soulevée est l'applicabilité de cet essai en l'état pour les GBR ?

Les essais visant à déterminer l'influence d'un extrait de GBR sur le temps de prise initial du ciment (Figure 29.21) montrent une tendance au retard. La méthodologie utilisée pour cet essai est basée sur l'utilisation de l'eau provenant du rinçage des GBR et non sur les GBR eux-mêmes ; il serait peut-être plus judicieux de tester la prise initiale du ciment directement sur les GBR ?

29.3.6. Conclusion sur la variabilité des granulats recyclés

Pour rappel, cette étude du suivi géographique (treize plateformes) et temporel (deux ans) des GBR a utilisé des matériaux produits pour des usages communs : routes, assises et travaux divers. Cette remarque explique pourquoi certains gravillons contiennent des éléments bitumineux, du moins pour la moitié d'entre eux. Certaines coupures n'ont pas été produites industriellement, mais fabriquées en laboratoire, ce qui a pu créer un certain biais méthodologique. Néanmoins, l'étude révèle que les tendances sont similaires. Elle montre aussi que la production de GBR – malgré la dispersion des ressources et la diversité des pratiques – est aujourd'hui bien maîtrisée et qu'elle conduit à des matériaux de qualité ayant des caractéristiques leur permettant d'être utilisés non seulement en techniques routières, mais aussi dans certains bétons. Les plus grands écarts observés concernent la teneur en fines, la teneur en sulfates et en chlorures solubles, et le coefficient d'absorption d'eau. Des techniques palliatives existent et leur mise en œuvre n'est qu'une question d'économie et de rentabilité locale. L'évolution du marché encouragera les acteurs à proposer des granulats recyclés pour le béton. Cette étude fournit une première base pour identifier la capacité réelle des plateformes à produire des GBR pour le béton.

Enfin, durant cette étude, certaines méthodes d'essai normalisées ont montré qu'elles devraient être modifiées ou ajustées (fines dans les sables de GBR, chlorures, teneur en bitume, etc.).

29.4. Conclusion

Les études présentées dans ce chapitre montrent que la ressource potentielle en matériaux recyclables dans le béton était plus limitée que prévu. Les mécanismes de promotion de ce type de matériaux sont régis par de nombreux facteurs :

- le suivi effectué sur treize plateformes volontaires a montré que là où l'activité de démolition est suffisante pour que le recyclage fonctionne, la

qualité est déjà présente pour répondre au nouveau marché des granulats recyclés pour le béton ;

- une optimisation de la qualité des GBR nécessite tout d'abord une organisation continue et rigoureuse (tri, stockage, etc.) tout au long de la chaîne d'élaboration, depuis l'étape du diagnostic avant démolition, le chantier naturellement, le transport vers les plateformes de recyclage et les étapes essentielles de réception, de tri, de concassage, de séparation sélective et de stockage des GBR produits. Ces étapes sont liées aux volumes impliqués : avoir l'équipement approprié pour traiter le type et la quantité de déchets au bon endroit et au bon moment est le meilleur résumé. Cette optimisation contribuera à l'amélioration du taux de recyclage mentionné en début de chapitre (Figure 29.6) ;
- comme pour la fabrication des granulats naturels, le recyclage des déchets (DCD et déchets industriels) est un tout dont les progrès profitent à chacun des acteurs concernés. Par exemple, de nouvelles techniques de traitement des sols ou des mélanges granulaires peuvent permettre de préserver les GBR, utilisés aujourd'hui pour les usages routiers, pour tenter de mieux les valoriser dans les bétons. C'est ainsi que les progrès accomplis par tous les acteurs du recyclage, quel que soit leur domaine, participeront à l'augmentation de la production de GBR pour le béton.

Au-delà de ces facteurs techniques, d'autres sont liés à la gestion de la ressource elle-même, comme les schémas régionaux des carrières, les plans régionaux de gestion des déchets, etc. Ces outils ont été mis en place dans le cadre d'une nouvelle politique de développement durable souhaitée par le législateur. Désormais, grâce à ces outils de gestion territoriale, les acteurs – collectivités, entreprises, représentants de l'État et citoyens – peuvent développer des plans d'action locaux et des stratégies appropriées en matière de recyclage, pour fixer des objectifs adaptés aux situations locales en fonction des ressources, des travaux et des constructions.

Chapitre 30.

Analyse du cycle de vie du béton de GBR

S. Braymand¹, A. Feraille², N. Serres¹, R. Idir³

Résumé – Le but de cette étude est de confirmer l'éco-respectabilité du béton de GBR (granulats de béton recyclé), en utilisant les critères normalisés de la méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) dédiée aux matériaux de construction (norme EN 15804). Les impacts environnementaux de différents bétons de GBR et de granulats naturels (GN) ont ainsi été comparés. Une analyse multicritère des facteurs contrôlant l'ACV de ces bétons est proposée via des études de cas (dosage et type de ciment, taux de substitution des granulats, distance de transport des granulats et du béton). L'objectif était tout d'abord d'étudier l'influence de la composition du béton (quantité de GBR, dosage en ciment, dosage en eau). Des formules de béton optimisées et de résistances mécaniques proches, ayant des dosages en ciment et en eau efficace égaux, ont été ensuite comparées. Quatre taux de substitution ont été testés (0S0G, 10S10G, 30S30G, 100S100G) et plusieurs distances de transport pour les GBR et les granulats naturels ont aussi été considérées. Ces paramètres ont permis d'étudier la gestion intégrée des flux de Déchets de Construction et de Démolition dans plusieurs villes de France. Enfin, les ACV de différents chantiers expérimentaux ont été réalisées.

L'étude de l'influence de la composition du béton indique que l'utilisation des GBR entraîne une augmentation des impacts environnementaux à différents niveaux, du moins lorsque la résistance mécanique requise est obtenue par ajustement du dosage en ciment. Au niveau du transport, pour des bétons de GBR et de GN ayant un dosage en ciment similaire (formule optimisée), l'utilisation de GBR n'a pas d'effet significatif lorsque les sites de production des granulats naturels, des GBR et du béton, sont proches les uns des autres. Concernant le chantier expérimental présenté, l'ACV des bétons montre que l'origine des granulats (GBR ou GN) joue un rôle relativement faible, en raison de la modeste quantité de béton à forte teneur en GBR utilisée dans la dalle étudiée.

-
1. Laboratoire ICube, Université de Strasbourg.
 2. Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech.
 3. Cerema, Ile-de-France.

Enfin, le bénéfice environnemental de l'utilisation des GBR n'est effectif que lorsque sont ajoutés à une ACV classique les impacts évités, tels que les quantités de granulats naturels économisés et les surfaces de mise en décharge préservées.

30.1. Introduction

Les considérations environnementales qui s'appliquent aux produits, aux services et aux entreprises sont des facteurs de création de valeur ajoutée. Dans ce contexte, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est de plus en plus utilisée comme outil de gestion stratégique et d'innovation. L'ACV est une méthode normalisée de mesure des impacts environnementaux potentiels des produits, des procédés et des services, tout au long de leur vie. L'ACV permet une évaluation globale et multicritères [Feraille-Fresnet, 2016].

Rappelons que l'industrie du BTP génère des impacts environnementaux, économiques et sociétaux importants [Geng *et al.*, 2017 ; Zuo *et al.*, 2012]. En raison de leurs nombres, les gestionnaires des constructions en béton ont donc une « responsabilité environnementale » conséquente. En effet, le secteur de la construction consomme un grand nombre de ressources pour élaborer les matériaux de construction [Limbachiya, 2004 ; Oikonomou, 2005], et les Déchets de Construction et de Démolition (DCD) représentent l'un des plus grands flux de déchets dans les pays développés [Coronado *et al.*, 2011 ; Vandecasteele *et al.*, 2013 ; Torgal, 2013]. Les considérations relatives à l'économie circulaire, notamment la préservation des ressources et la gestion des déchets, incitent alors à réutiliser les bétons dans de nouveaux bétons, sous forme de granulats de béton recyclé.

L'« écorespectabilité » des granulats de béton recyclé (GBR) est souvent évoquée, mais sans être réellement démontrée. En effet, le recyclage des bétons de démolition n'est pas « éco-respectueux » en soi. Il doit être vérifié au cas par cas, car la production de GBR et le choix de la formulation des bétons incorporant des GBR peuvent avoir aussi un impact négatif sur l'ACV du produit élaboré [Torgal, 2013].

L'objectif de ce chapitre est d'étudier si les bétons de GBR sont plus vertueux que les bétons de GN, en se basant sur les critères normatifs de l'ACV appliquée à la « Construction et aux matériaux de construction ». Les bétons de GBR et de GN étudiés ici sont uniquement destinés aux structures/ouvrages. Une analyse de sensibilité au transport complète la comparaison.

Le bénéfice global associé à l'utilisation du béton de GBR n'apparaît que si l'on considère les impacts évités, car les indicateurs habituels de l'ACV sont peu discriminants. C'est pourquoi d'autres critères ou indicateurs sont aussi proposés, tels la prise en compte de la préservation des ressources granulaires naturelles et la limitation des sites de stockage des déchets, qui contribuent à la

réduction des surfaces consommées (critères environnementaux et sociétaux), et le coût du transport des matériaux (calcul des quantités transportées en t · km, critère économique).

30.2. État de l'art

30.2.1. L'ACV : une méthode d'évaluation environnementale

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode qui permet d'établir un bilan environnemental. Elle a été créée pour les produits industriels (la première étude a concerné le conditionnement du Coca Cola®, en 1969) et elle fait depuis l'objet des normes ISO 14040 [Gomes *et al.*, 2013]. La littérature propose un grand nombre d'études portant sur l'ACV des bâtiments durables (traditionnels ou non). L'ACV a suscité un intérêt croissant au cours des quinze dernières années [Geng *et al.*, 2017 ; Vitale *et al.*, 2017 ; Chirjiv *et al.*, 2017 ; Kofoworola et Gheewala, 2008 ; Ji *et al.*, 2016 ; Asif *et al.*, 2007]. Parmi ces études, certaines s'intéressent à des matériaux et des constructions spécifiques [Ortiz *et al.*, 2009 ; Huntzinger et Eatmon, 2009 ; Josa *et al.*, 2004], comme le béton [Park *et al.*, 2012 ; Wu *et al.*, 2014 ; Van den Heede et de Belie, 2012 ; Purnell et Black, 2012 ; Marinkovic, 2013 ; Hájek *et al.*, 2011 ; Kawai, 2011]. Seule l'ACV des bétons de GBR est abordée ici.

L'Analyse du Cycle de Vie repose sur deux principes fondamentaux :

- la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie d'un produit (du berceau à la tombe) ;
- la conduite d'une analyse multicritères (divers indicateurs d'impact sont calculés, ces indicateurs peuvent être imposés par les normes ou varier selon l'étendue de l'étude).

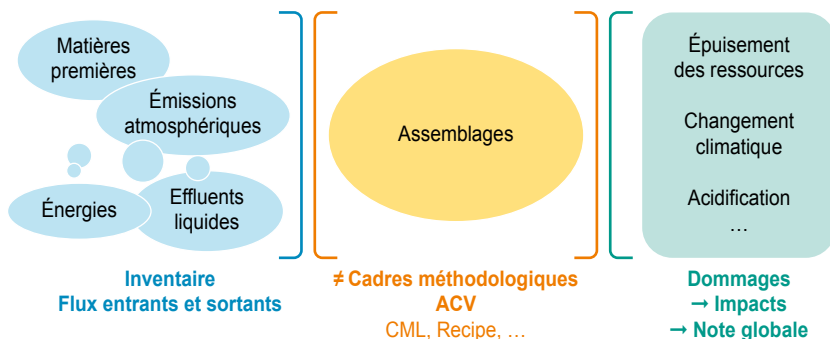
La méthode est divisée en quatre étapes [NF EN ISO 14040, 2006], comme illustré Figure 30.1.

- définition de l'objectif et du champ de l'étude ;
- inventaire du cycle de vie : il consiste en la collecte des données ;
- calcul d'indicateurs à l'aide de différentes méthodes [Jolliet *et al.*, 2010] ;
- interprétation.

L'objectif et le champ de l'étude sont tout d'abord fixés à partir de la définition des caractéristiques de performance du produit, décrites par une notion clairement définie et mesurable appelée Unité Fonctionnelle (UF), puis à partir du flux auquel se réfère la quantité de matières et de consommables utilisés par ce produit, nécessaires pour assurer les besoins de l'unité fonctionnelle.

Figure 30.1

ACV : Principe de l'approche



Aujourd'hui, l'ACV est adaptée aux domaines de la construction et, dans le cas de l'étude présentée ici, elle est basée sur la norme [NF EN 15804, 2012]. Pour cette étude, les méthodes CML⁴, EDIP⁵ et CED⁶ ont été utilisées pour le calcul des indicateurs d'impact. L'adaptation de la méthode est expliquée paragraphe 30.3.

30.2.2. ACV des bétons de GBR : état de l'art

On trouve dans la littérature beaucoup d'études portant sur l'évaluation environnementale du béton de GBR, mais elles n'appliquent pas toutes la méthode d'ACV de la norme [NF EN ISO 14040, 2006]. Par exemple, certains chercheurs se sont basés sur une méthodologie spécifique pour quantifier l'énergie grise ou les émissions de gaz à effet de serre [Wijayasundara *et al.*, 2017 ; Teh *et al.*, 2017]. En outre, même lorsque la méthode normalisée est considérée, elle peut être appliquée selon plusieurs options [Marinković *et al.*, 2017]. Les différentes options conduisent alors à des différences sur de nombreux points, qui rendent les résultats difficilement comparables. Parmi les paramètres considérés se trouvent les frontières du système, le périmètre du cycle de vie (« du berceau à la porte » ou « du berceau à la tombe »), les allocations liées au recyclage, le choix de l'Unité Fonctionnelle, la modélisation de l'ICV (inventaire du cycle de vie : normalisation et agrégation pour le calcul des indicateurs), les bases de données collectées, etc. L'application des recommandations de la norme [NF EN ISO 14040, 2006] ou de la norme [NF EN 15804, 2012] aboutit aussi à des différences, parce que les bases de données ou les limites du système ne sont pas les mêmes [Braga *et al.*, 2017 ; Serres *et al.*, 2016]. Van Den et de Belie considèrent que trois points

4. Centrum voor Milieuwetenschappen de Leiden, Institut de Sciences de l'Environnement de l'université Leiden, Pays-Bas.

5. Environment Design of Industrial Product (Danemark).

6. Cumulative Energy Demand.

influencent principalement l'ACV : la définition de l'unité fonctionnelle reliée à la composition du béton ; la qualité des données recueillies ; la méthode d'ACV appliquée [Van den Heede et de Belie, 2012].

La plupart des auteurs considèrent un système « du berceau à la porte » [Marinković *et al.*, 2017 ; Marinković *et al.*, 2013 ; Serres *et al.*, 2016 ; Braga *et al.*, 2017 ; Kleijer *et al.*, 2017 ; Cuenca-Moyano *et al.*, 2017]. Des systèmes « du berceau à la tombe » ou « du berceau au berceau » sont parfois proposés [Ding *et al.*, 2016 ; López Gayarre *et al.*, 2016].

Diverses méthodes d'ACV sont disponibles, la principale étant la méthode CML (voir Figure 30.1) [Evangelista et Brito, 2007 ; Marinković *et al.*, 2017 ; Serres *et al.*, 2016 ; Braga *et al.*, 2017]. Elle est associée aux logiciels SIMAPRO [Serres *et al.*, 2016] et GABI [Müller *et al.*, 2015], voire à d'autres logiciels. D'autres méthodes telles que EDP, EDIP, BEEP, IPPC peuvent aussi être utilisées [Serres *et al.*, 2016 ; Ding *et al.*, 2016 ; Evangelista et Brito, 2007a]. Des logiciels internes ou des méthodologies basées sur des sommes d'ICV sont également appliquées [Kleijer *et al.*, 2017, Cuenca-Moyano *et al.*, 2017 ; López Gayarre *et al.*, 2016].

Concernant l'Unité Fonctionnelle, la référence la plus fréquente est « un mètre cube de béton ». Parfois, c'est un dosage identique en ciment [Kleijer *et al.*, 2017] ou la même classe de résistance, limitée à 40 MPa [Ding *et al.*, 2016 ; Marinković *et al.*, 2017 ; Braga *et al.*, 2017], qui sont considérées comme référence de l'unité fonctionnelle. Rarement, le dosage en ciment et la résistance sont pris en même temps comme référence [Serres *et al.*, 2016]. Dans ce cas, les proportions granulaires et les dosages en adjuvants sont variables.

La plupart des divergences dans l'application de l'ACV concerne les bases de données utilisées. Même si ECOINVENT est la base de données la plus reconnue en Europe, des bases de données nationales sont toujours utilisées en complément (portugaise, serbe, française, etc.), développées par des fournisseurs ou des universités, pour l'ICV de certains matériaux (ciment, granulats, adjuvant). Parfois, seule une base de données interne est utilisée [Kleijer *et al.*, 2017 ; López Gayarre *et al.*, 2016 ; Braga *et al.*, 2017]. La mise à jour de la base de données est également importante. Concernant le transport, le processus EURO 3 (norme d'émission) peut être utilisé [Müller *et al.*, 2015].

Un point soulevé par les auteurs recensés porte sur l'affectation des impacts environnementaux du recyclage, qui conditionnent la détermination de l'ACV des GBR [Marinković *et al.*, 2013 ; Müller *et al.*, 2015 ; Vrijders et Wastiels, 2017]. Dans la présente étude, cette question ne se pose pas car les ACV sont effectuées en utilisant les bases de données des fournisseurs locaux (français), comme expliqué plus loin.

Une autre source de divergence caractérise aussi les résultats des recherches. Il s'agit de la composition des bétons, qui mène à des conclusions contradictoires sur l'intérêt de l'utilisation des GBR. Plus précisément, la quantité de ciment agit directement sur les résultats de l'ACV. Certains auteurs rapportent que les

bétons de GN et de GBR présentent des impacts environnementaux similaires tant que leur dosage en ciment reste similaire, alors que si un dosage en ciment plus élevé est utilisé, l'impact du béton de GBR est plus élevé [Braunschweig *et al.*, 2011 ; Müller *et al.*, 2015]. Afin d'obtenir des bétons de GBR et de GN de même résistance mécanique, en utilisant la même quantité de ciment, le rapport eau/ciment doit être abaissé en utilisant un superplastifiant (pour résoudre les problèmes de maniabilité). Dans ce cas, les performances environnementales du béton de GBR sont peu affectées [Marinković *et al.*, 2017], car le ciment est le principal consommateur d'énergie/contributeur au réchauffement, du béton [Ding *et al.*, 2016].

Par ailleurs, peu d'études abordent la substitution à taux élevé des granulats naturels par des granulats de GBR. Le plus souvent, les taux de substitution sont inférieurs à 50 % [Knoeri *et al.*, 2013 ; Evangelista et Brito, 2007a]. Parfois, une substitution à 100 % des gravillons est étudiée [Marinković *et al.*, 2017 ; Vrijders et Wastiels, 2017]. Plus rarement, une substitution totale des granulats naturels par des granulats de GBR (sables et gravillons) est proposée pour l'évaluation de l'ACV [Serres *et al.*, 2016].

Une troisième source de divergence est la distance limite pour le transport des GBR et des granulats naturels. Ainsi, l'impact environnemental réel d'un béton de GN ou d'un béton de GBR diffère d'une région à l'autre [Kleijer *et al.*, 2017]. Les distances de transport des granulats considérées dans la littérature peuvent atteindre 100 km. Une faible distance ([Ding *et al.*, 2016]) ou encore une distance nulle ([Evangelista et Brito, 2007b ; Vrijders et Wastiels, 2017]) est souvent prise en compte pour les granulats de GBR, ce qui conduit à une réduction de leur impact. Si les granulats naturels proviennent d'une source éloignée, alors l'impact environnemental des bétons de GBR est diminué, à condition que la plateforme de recyclage se trouve à proximité de la centrale à béton [Ding *et al.*, 2016 ; Marinković, 2013]. Pour des distances de transport équivalentes et des dosages en ciment comparables, l'impact peut être diminué si d'autres paramètres de la formule sont modifiés (rapport eau/ciment, dosage en granulats, etc.) [Serres *et al.*, 2016 ; Müller *et al.*, 2015].

Cet état de l'art montre qu'il n'est pas évident de fonder des conclusions générales en comparant l'éco-efficacité des bétons de GBR et de GN [Vieira *et al.*, 2016 ; Marinković *et al.*, 2017]. Pour compléter l'ACV, certains auteurs ont proposé de prendre en compte les impacts évités. Avec cet indicateur additionnel, le comportement environnemental peut être amélioré, avec une réduction d'impact de 70 à 80 % [Knoeri *et al.*, 2013 ; Ioannidou *et al.*, 2015 ; Ding *et al.*, 2016 ; Habert *et al.*, 2010].

30.3. Résultats RECYBETON

30.3.1. Influence des constituants des bétons de GBR et du transport sur l'ACV : études de cas

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) de bétons de GBR et de béton de granulats naturels a été comparée dans plusieurs contextes, afin de mesurer l'influence des constituants et du transport sur l'ACV des bétons de GBR.

Une première étape a consisté à identifier l'influence des paramètres de la composition du béton, en particulier les dosages en GBR, en ciment et en eau. Dans cette partie, un ciment CEM II a été utilisé.

Ensuite, afin de conserver le même dosage en ciment pour des résistances mécaniques proches, des formules de bétons ont été étudiées en gardant le même volume de granulats (naturels + GBR), le même dosage de ciment et le même rapport E/C, et en visant une même résistance minimale [Deodonne, 2015]. Dans cette partie, un ciment CEM I a été utilisé.

Pour étudier la gestion intégrée des flux de Déchets de Construction et de Démolition sur différents lieux, plusieurs distances de transport des granulats naturels et recyclés ont été considérées, pour différentes villes.

Enfin, certains chantiers expérimentaux de construction décrits dans les Chapitres 22 et 24 ont été évalués avec les mêmes méthodes, et le rôle du GBR utilisé a été analysé. Dans ce cas, les distances de transport réelles ont été prises en compte pour le calcul de l'ACV. Dans cette partie, un ciment CEM II a été utilisé.

30.3.1.1. Cadre de l'étude de l'ACV

Homogénéisation des données d'ACV et méthodes utilisées

Les mêmes bases de données et méthodes de calcul ont été utilisées par les laboratoires participant à cette étude. Par référence à la norme [NF EN 15804, 2012], l'analyse environnementale proposée ici se limite à la phase de production, ce qui fixe les étapes à considérer (du berceau à la porte). Les autres étapes (construction sur chantier, usage, fin de vie) devront être prises en compte lors d'une ACV complète (du berceau à la tombe), mais elles n'entrent pas dans cette étude.

- Base de données et sources

Des bases de données professionnelles ont été utilisées lorsqu'elles étaient disponibles, sinon la base de données ECOINVENT [Ecoinvent, 2011] a été utilisée. Les données retenues sont détaillées ci-après.

Fabrication des constituants

- Ciment : données fournies par l'ATILH⁷ – Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (juin 2011).
- Granulats : données fournies par l'UNPG⁸ – Union Nationale des Producteurs de Granulats (mai 2011).
- Plastifiant, retardateur : données fournies par le SYNAD⁹ – Syndicat National des Adjuvants pour Bétons et Mortiers (mars 2006).

Pour les calculs de flux des GBR, les procédés successifs suivant sont pris en compte : le traitement des DCD, leur mise en forme (criblage-concassage) et les travaux de terrassement du site. Ainsi, tout matériau relevant de l'un de ces procédés a été pris en compte dans cette étude. Le transport en amont des matériaux de déconstruction sur la plateforme de recyclage n'est pas pris en compte dans cette étude.

Pour les granulats naturels, toutes les activités du site de production sont considérées : décapage, découverte et exploitation du site, transformation et commercialisation des granulats, ainsi que le réaménagement final du site.

Transports et électricité

Les processus ECOINVENT ont été utilisés pour l'électricité et le transport, en considérant une « électricité moyenne tension » et un type de transport tel que décrit dans le Tableau 30.1.

Tableau 30.1

Type de transport utilisé

Composants	Type	Processus*
Granulats	> 32 t	Transport, fret, camion > 32 t
Ciment	> 32 t	Transport, fret, camion > 32 t
Adjuvants	< 16 t	Transport, fret, camion 7,5-16 t
Béton	16-32 t	Transport, fret, camion 16-32 t
Chantiers expérimentaux	Route	Transport, fret, camion 16-32 t
Chantiers expérimentaux	Train	Transport, train de fret, Europe sans la Suisse

* Les processus utilisés dans ECOINVENT sont EURO 4 (correspondant à des émissions normalisées) et RER (correspondant à la zone européenne).

7. <http://www.infociments.fr/ciments-chaux-hydrauliques/caracteristiques-applications/les-ciments/declarations-environnementales-produits-ciments-courants-francais>

8. <http://www.unpg.fr/accueil/dossiers/environnement/analyse-de-cycle-de-vie-des-granulats/>

9. <http://www.synad.fr/>

Processus de malaxage du béton

Le processus de malaxage a été défini en utilisant les données du Tableau 30.2. On suppose que les conditions de malaxage sont les mêmes pour les études de composition du béton que pour celles dédiées aux sites expérimentaux.

Tableau 30.2

Données utilisées pour définir le procédé de malaxage

Malaxeur (m ³)	2
Temps de malaxage (s)	55
Production réelle (m ³ /h)	55
Puissance (kW)	220
Énergie consommée (MJ/m ³)	14,4

• Méthode de calcul

Ce travail est basé sur les normes [NF EN 15804, 2012] et [NF XP P 01/064/ CN, 2014]. Trois méthodes ont été utilisées pour le calcul des indicateurs d'impact : CML, EDIP et CED. Elles ont été adaptées à la version française de la norme [NF EN 15804, 2012] avec les indicateurs d'impact rappelés Tableau 30.3. Deux logiciels ont été utilisés, SIMAPRO pour les études sur l'influence de la composition et du transport, et OPENLCA pour l'étude des chantiers expérimentaux.

Compositions et propriétés du béton de GBR : buts et cadre de l'ACV

Les GBR et granulats naturels du Projet National RECYBETON ont été utilisés pour les bétons à teneur en ciment variable et pour les bétons à teneur en ciment constante. Les sables naturels provenaient de Sandrancourt (78¹⁰) et les gravillons naturels de Givet (08)¹¹. Les GBR ont été élaborés à Gonesse (95)¹². Pour les études qui suivent, les distances de transport correspondantes ont été remplacées par des distances plus conformes à la réalité industrielle, etc. Rappelons que les codes des formules de béton (xSyG) sont basés sur la teneur en GBR (Sable et Gravillons). Les teneurs en ciment, en eau et en adjuvants dépendent de l'étape de l'étude décrite ci-dessous.

10. Département des Yvelines.

11. Département des Ardennes.

12. Département du Val d'Oise.

Tableau 30.3

Indicateurs d'impact pris en compte

Indicateur d'impact environnemental	Unité	Méthode
Consommation ressources énergétiques • Énergie renouvelable • Énergie non renouvelable	MJ	Cumulative Energy Demand (CED)
Épuisement des ressources abiotiques	kg Sb eq.	Impact-oriented characterization (CML 2001)
Déchets dangereux	kg	Environmental Design of Industrial Products (EDIP)
Déchets non dangereux	kg	Environmental Design of Industrial Products (EDIP)
Déchets radioactifs	kg	Environmental Design of Industrial Products (EDIP)
Changement climatique	kg CO ₂ eq.	Impact-oriented characterization (CML 2001)
Potentiel d'acidification	kg SO ₂ eq.	Impact-oriented characterization (CML 2001)
Formation d'ozone stratosphérique	kg CFC eq.	Impact-oriented characterization (CML 2001)
Oxydation photochimique	kg C ₂ H ₄ eq.	Impact-oriented characterization (CML 2001)
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq.	Impact-oriented characterization (CML 2001)

- Bétons de GBR et de GN à dosage en ciment variable

Ici, l'étude s'intéresse à l'influence des paramètres de composition du béton, notamment les dosages en GBR ou en GN, en ciment et en eau. Pour ces bétons, l'objectif était d'avoir la même résistance à la compression (C25/30) pour les deux types de bétons (GBR et GN). La composition des bétons est définie dans le Tableau 30.4. L'Unité Fonctionnelle déclarée pour cette analyse est « Production d'un mètre cube de béton dans une usine de béton prêt à l'emploi ».

- Bétons de GBR et de GN à teneur en ciment constante

Les formules optimisées ont été mises au point en utilisant un superplastifiant, de sorte à avoir le même dosage en ciment pour des résistances mécaniques comprises entre 29 et 33 MPa [Braymand *et al.*, 2017a]. À l'échelle du laboratoire, cet objectif a nécessité l'utilisation d'un ciment CEM I. Quatre taux de substitution ont été testés : 0 %, 10 %, 30 % et 100 % (voir Tableau 30.5). Pour cette étude, les taux de substitution ont été calculés en volume. La substitution inclut le sable et les gravillons. L'unité fonctionnelle déclarée pour cette analyse est « production d'un mètre cube de béton dans une usine de béton prêt à l'emploi » et une étape « transports sur chantier » a été ajoutée dans le calcul de l'ACV.

Tableau 30.4

Composition des bétons de GBR et de GN avec dosages en ciment variables

Constituants (kg/m ³)	C25/30 0S0G	C25/30 0S30G	C25/30 0S100G	C25/30 30S0G	C25/30 30S30G	C25/30 100S100G
	Eau ajoutée	190	210	244	213	228
Ciment CEM II	270	276	282	276	277	326
Eau efficace/Ciment	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6
Fillers calcaires	45	31	31	31	31	50
Sable naturel	780	813	806	549	500	–
Sable recyclé 0/4	–	–	–	235	218	673
Gravillon naturel 4/10	267	228	–	190	171	–
Gravillon recyclé 4/10	–	–	163	–	145	304
Gravillon naturel 6,3/20	820	462	–	829	552	–
Gravillon recyclé 10/20	–	296	701	–	167	442
Superplastifiant	1,31	1,51	1,40	1,16	1,08	1,18
Retardateur de prise	0	0	–	1,1	1,1	2,6
Eau efficace	180	185	189	185	185	199

Tableau 30.5

Composition des bétons de GBR et de GN avec dosage en ciment constant

Constituant (kg/m ³)	0S0G*	10S/100G*	30S/30G*	100S/100G*
Eau efficace	169	169	169	169
Eau efficace + eau absorbée	182	192	213	284
Ciment CEM I	260	260	260	260
Granulats naturels	1906	1715	1334	–
Granulats de béton recyclé	–	153	458	1527
Superplastifiant	1,92	1,95	2,08	2,34
Résistance à la compression à 1 jour (MPa)	9,1	11,2	13,5	6,8
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	32 ± 1,1	34,9 ± 2,0	33,1 ± 1,15	29 ± 1

* Taux de substitution en volume.

• Chantiers expérimentaux

Deux chantiers expérimentaux, décrits dans les Chapitres 22 et 24 (chantiers de Chaponost, près de Lyon et du CD77 en Seine-et-Marne), ont été modélisés. Seuls les résultats obtenus sur le chantier de Chaponost sont présentés ici. Les résultats de l'ACV sont similaires pour les deux sites. Le chantier expérimental de Chaponost consiste en un grand dallage découpé en six compartiments, plus une zone pour les essais d'aptitude (même formule que la dalle D6), comme indiqué sur le plan de masse au Chapitre 22 [de Larrard *et al.*, 2014]. L'unité fonctionnelle est ici « fabrication de dallages ». Les différentes compositions des bétons et les volumes de chaque dallage sont détaillés dans le Tableau 30.6.

Tableau 30.6

Composition et volumes des différents bétons de dallage coulés sur le chantier de Chaponost

	D1	D4	D2	D3	D5	D6 + conv.
Constituant (kg/m ³)	REF	30S/0G	0S30G	30S/30G	0S/100G	100S/100G
Granulats naturels	1 796	1 467	1 437	1 151	772	–
Granulats de béton recyclé	–	235	282	514	778	1 379
Ciment	302	306	305	308	346	390
Plastifiant	2,57	3,65	2,60	2,62	2,94	3,32
Retardateur	–	1,54	0,88	1,54	1,04	1,95
Eau	173	188	178	205	205	260
Surface (m ²)	337	355	322	335	323	324
Volume (m ³)	65	64	60	62	62	62

Circuits de transport

• Bétons de GBR avec un dosage variable en ciment

Ici, des circuits courts pour le transport des granulats ont été pris comme hypothèse de travail, comme indiqué dans le Tableau 30.7.

• Bétons de GBR avec un dosage constant en ciment

Une distance moyenne (fixe) de 50 km a été utilisée pour le « transport du ciment », quelle que soit la ville considérée. Pour l'adjuvant (superplastifiant), une distance de 165 km a été choisie (distance à la centrale BPE). Ces valeurs ont été retenues après consultation des professionnels. Pour les granulats et les bétons, plusieurs distances de transport ont été retenues. Elles ont été limitées à 35 km maximum, tant pour le site de production des granulats que pour la centrale de béton prêt à l'emploi.

Tableau 30.7

Quantité totale de transport (t · km) de chaque constituant

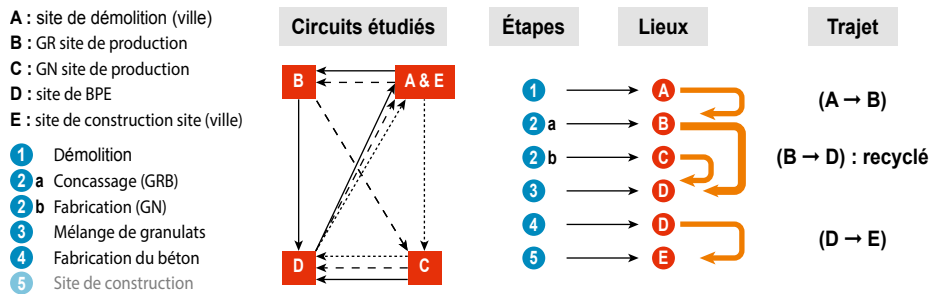
Formules C25/30	Quantité de transport (t · km)
0S0G	19,8
0S100G	20,7
0S30G	18,7
100S100G	23,8
30S0G	20,1
30S30G	21,7

Ces distances ont été calculées pour plusieurs villes (Strasbourg, Lyon, Lille et Bordeaux) et pour plusieurs circuits. La définition des circuits et l'un des circuits sont présentés Figure 30.2.

Ces circuits sont déduits des pratiques actuelles de la centrale BPE : production de chaque granulat sur son site propre puis transport vers la centrale (circuit 1) ou pré-mélanges de GN et de GBR sur le site de production du GN. Dans ce cas, les GBR peuvent être produits sur une plateforme de recyclage (circuit 2) ou sur le site de production des granulats naturels (circuit 3). Ainsi, les combinaisons de circuits, les villes et les taux de substitution conduisent à une analyse de sensibilité des paramètres. Pour cette étude de sensibilité, les distances présent en compte ont été calculées à partir de la moyenne des trois distances les plus proches de chaque type de circuit (avec un maximum de 35 km).

Figure 30.2

Cadre des circuits de transport – un exemple de circuit



La centrale à béton BPE est située à Sérézin, la cimenterie à Val-d’Azergues, les GBR proviennent de Pierre-Bénite et les granulats naturels de la carrière de La-Petite-Craz à St-Laurent-de-Mure. Les distances de transport correspondantes sont données dans le Tableau 30.8. Les transports sont effectués par camions.

Tableau 30.8

Distance de transport de chaque constituant

Ciment : Val-d'Azergues → Sérézin (centrale BPE)	55 km
GBR : Pierre-Bénite → Sérézin (centrale BPE)	15 km
GN : St-Bonnet → Sérézin (centrale BPE)	20 km
GN : Petite-Craz → Sérézin	20 km
Chantier : Sérézin (centrale BPE) → Chaponost	22 km

Afin de calculer les impacts liés aux transports, les masses transportées ont été définies en utilisant la masse volumique théorique des matériaux (Tableau 30.9).

Tableau 30.9

Estimation des masses transportées

	Masse volumique théorique	Masse transportée (kg)
REF	2 274	137 930
0S30G	2 206	131 200
30S30G	2 183	121 740
30S0G	2 202	125 798
0S100G	2 105	123 752
100S100G	2 035	113 887

30.3.1.2. ACV du béton de GBR à teneur en ciment variable

La Figure 30.3 montre que l'utilisation de GBR dans des bétons augmente l'impact environnemental de différents indicateurs. Ce résultat est dû essentiellement à l'augmentation du dosage en ciment dans les formules testées, car une résistance mécanique identique était requise. La part de chaque processus est donnée Figure 30.4. Il est essentiel de préciser que cet effet pénalisant lié à l'augmentation du taux de substitution n'est pas généralisable à tous les bétons de GBR. Les effets observés et leur analyse ne sont valables que pour les compositions étudiées.

Figure 30.3

ACV des bétons de GBR à teneur en ciment variable

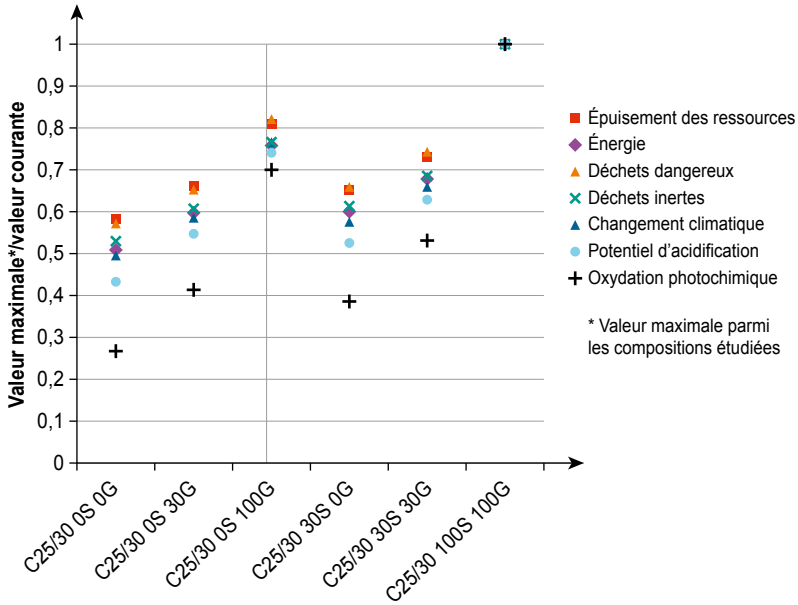
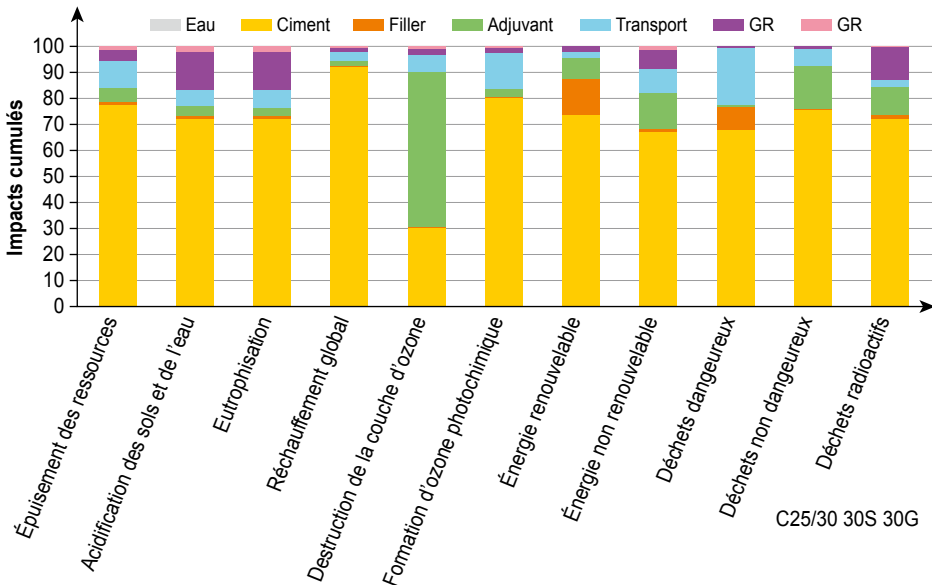


Figure 30.4

ACV – Part de chaque processus – cas 30S30G



30.3.1.3. ACV du béton de GBR à teneur en ciment constante

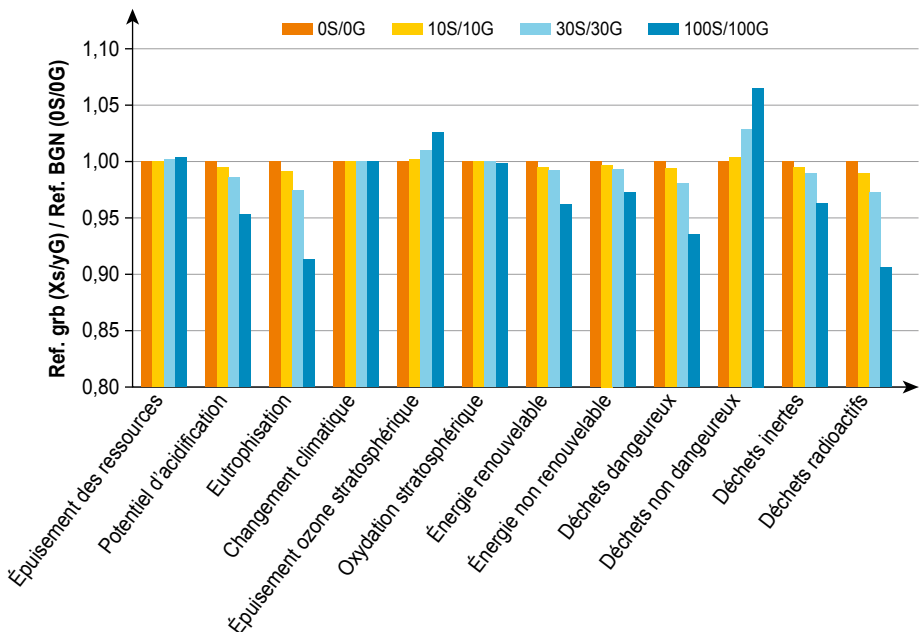
Avant de quantifier l'influence du taux de substitution selon la distance de transport, il faut tout d'abord calculer l'ACV des bétons (référence) mis en œuvre sans transport des granulats (0S0G à 100S100G, circuit 0) ni transport du béton (Tableau 30.10). Aucune différence significative n'est alors observée entre bétons de granulats naturels et de GBR (Figure 30.5).

Lorsque la composition est formulée à dosage en ciment constant, l'utilisation de GBR n'améliore ni ne détériore les indicateurs d'impact. Cela confirme l'effet de dilution dû à la part du ciment qui réduit les différences observées entre les granulats de différentes origines, d'autant plus que le ciment utilisé dans cette étude est un CEM I.

En outre, l'ACV des granulats ne montrent pas des différences importantes selon leur origine¹³. Seuls quelques indicateurs (acidification atmosphérique, eutrophisation, ozone photochimique) montrent que l'utilisation de granulats issus de roches massives est significativement préjudiciable. Pour toutes les autres valeurs, les indicateurs des bétons de GBR sont légèrement supérieurs à ceux des bétons de GN. Comme les bétons ont été formulés à volume granulaire équivalent, la masse de granulats utilisés dans les bétons de GBR est donc inférieure (voir Tableau 30.5), ce qui explique la légère compensation observée.

Figure 30.5

Influence du taux de substitution sur l'ACV



13. <http://www.unpg.fr/accueil/dossiers/environnement/analyse-de-cycle-de-vie-des-granulats/>

Tableau 30.10

Résultats de l'ACV des bétons de GBR de référence, à dosage en ciment constant

Indicateur d'impact	Unité	Circuit 0 – sans transport des granulats ni du béton			
		0S0G	10S10G	30S30G	100S100G
Épuisement des ressources abiotiques	kg Sb eq	$5,70 \times 10^{-1}$	$5,700 \times 10^{-1}$	$5,710 \times 10^{-1}$	$5,720 \times 10^{-1}$
Potentiel d'acidification	kg SO ₂ eq	$6,890 \times 10^{-1}$	$6,850 \times 10^{-1}$	$6,790 \times 10^{-1}$	$6,560 \times 10^{-1}$
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq	$9,600 \times 10^{-2}$	$9,520 \times 10^{-2}$	$9,350 \times 10^{-2}$	$8,770 \times 10^{-2}$
Changement climatique	kg CO ₂ eq	$2,390 \times 10^2$	$2,390 \times 10^2$	$2,390 \times 10^2$	$2,390 \times 10^2$
Formation d'ozone stratosphérique	kg CFC-11 eq	$1,390 \times 10^{-5}$	$1,400 \times 10^{-5}$	$1,410 \times 10^{-5}$	$1,430 \times 10^{-5}$
Oxydation photochimique	kg C ₂ H ₄ eq	$5,560 \times 10^{-2}$	$5,560 \times 10^{-2}$	$5,560 \times 10^{-2}$	$5,50 \times 10^{-2}$
Énergie renouvelable	MJ	$2,800 \times 10^1$	$2,780 \times 10^1$	$2,770 \times 10^1$	$2,690 \times 10^1$
Énergie non renouvelable	MJ	$2,20 \times 10^3$	$2,250 \times 10^3$	$2,240 \times 10^3$	$2,200 \times 10^3$
Déchets dangereux	kg	$6,430 \times 10^{-2}$	$6,390 \times 10^{-2}$	$6,310 \times 10^{-2}$	$6,020 \times 10^{-2}$
Déchets non dangereux	kg	4,65	4,67	4,78	4,95
Déchets inertes	kg	$4,800 \times 10^{-1}$	$4,780 \times 10^{-1}$	$4,750 \times 10^{-1}$	$4,620 \times 10^{-1}$
Déchets radioactifs	kg	$7,400 \times 10^{-3}$	$7,330 \times 10^{-3}$	$7,200 \times 10^{-3}$	$6,700 \times 10^{-3}$

30.3.1.4. Sensibilité au transport de l'ACV

L'analyse de la sensibilité au transport de l'ACV a été divisée en trois étapes :

- influence du taux de substitution en GBR pour la combinaison ville/circuit la plus défavorable (combinaisons de circuits pour chaque ville et chaque composition) ;
- influence du choix du circuit pour un taux de substitution de 30 % et différences entre circuit avantageux et désavantageux. Un taux de substitution de 30 % a été choisi car il correspond à la valeur supérieure admise dans les normes actuelles ;

- différence entre l'influence du taux de substitution pour un circuit sélectionné entre les 4 villes.

Les valeurs les plus élevées sont observées pour la ville de Lille, qui présente les circuits avec le plus d'écart (voir Tableau 30.11).

Tableau 30.11

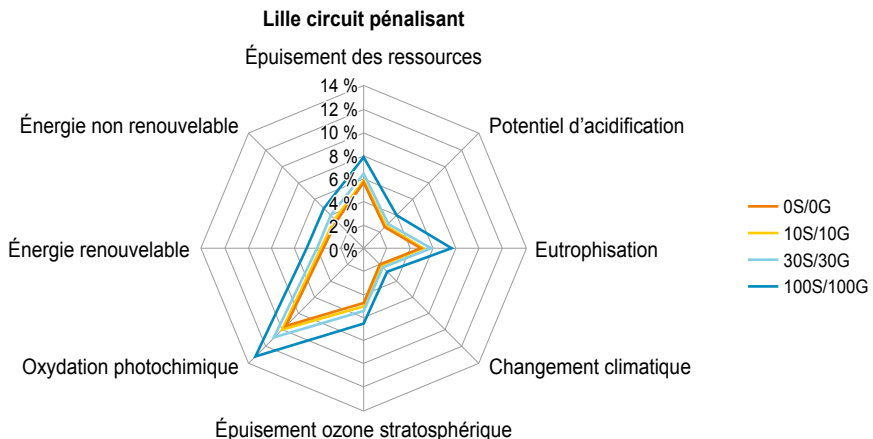
Combinaisons conduisant au paramètre t · km transportés le plus élevé et le plus bas – Lille

Béton de GBR/Béton de GN	t · km le plus élevé	t · km le plus bas
0S0G	Circuits 1, 2, 3 (égalité, pas de GBR)	
10S10G	Circuit 3	Circuit 1
30S30G	Circuit 2	Circuit 1
100S100G	Circuit 3	Circuit 1

Les résultats de l'analyse comparative de l'influence de la composition et du transport sur l'ACV des bétons de GBR et de GN sont présentés Figure 30.6 pour les combinaisons pénalisantes présentées dans le Tableau 30.11. La contribution du transport est évaluée en comparant l'ACV du transport à l'ACV du procédé complet. Le procédé complet inclut l'ACV calculée précédemment (ACV des bétons de GBR/GN à dosage en ciment constant), plus l'ACV du transport des granulats (GN et GBR) et du transport du béton de la centrale de BPE à la ville.

Figure 30.6

Contribution du transport vs l'ACV du processus complet



Constatons tout d'abord que la contribution du transport à l'ACV est faible, excepté pour certains indicateurs, comme indiqué Tableau 30.12. Ensuite, même pour les indicateurs « élevés », l'utilisation de GBR en remplacement

des granulats naturels ne change pas significativement la contribution du transport sur l'ACV (augmentation maximale de 10 % entre béton 0S0G et béton 100S100G). Il est important de noter que les résultats dépendent de la base de données utilisée. Comme expliqué précédemment, ECOINVENT a été utilisé, bien qu'il ne dispose pas de données dédiées au secteur de la construction. La Figure 30.7 montre le chemin par lequel ECOINVENT établit le processus lié au transport dans l'ACV.

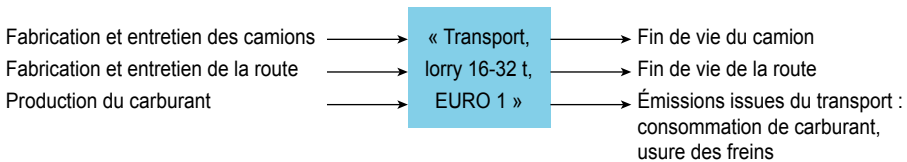
Tableau 30.12

Contribution du transport vs ACV totale – indicateurs de déchets – Lille

Part du transport (%)	Déchets			
	dangereux	non dangereux	inertes	radioactifs
0S0G	48	14	53	0.8
10S10G	49	14	54	0.9
30S30G	52	15	57	1
100S100G	58	18	63	1.3

Figure 30.7

Description du module « Transport, camion 16-32 t, EURO 4 » de ECOINVENT



L'entretien des infrastructures routières, la consommation de carburant et les émissions liées au transport lui-même sont inclus dans ce module, sachant que l'entretien des infrastructures peut conduire à des indicateurs « déchets dangereux » ou « déchets inertes » élevés dans la part du transport de l'ACV (Figure 30.6). Mais la « valeur élevée » de cette part des indicateurs doit être rapprochée de la valeur absolue transportée, en kg : on a alors un facteur de 10 à 100 entre déchets dangereux ou inertes et déchets non dangereux, ce qui relativise l'analyse précédente.

Dans la deuxième étape, pour compléter l'analyse précédente, la part du transport dans les différents circuits est présentée Figure 30.8 et Figure 30.9 pour Lille et Lyon, et pour le béton 30S30G. Elle indique que pour ce taux de substitution, le choix des circuits n'influence pas significativement la part du transport dans les valeurs d'ACV, même pour Lille, qui présente la plus forte disparité entre circuits. Pour Lyon, le choix du circuit est sans importance.

Figure 30.8

Contribution du transport dans l'ACV totale : Lille – différents circuits

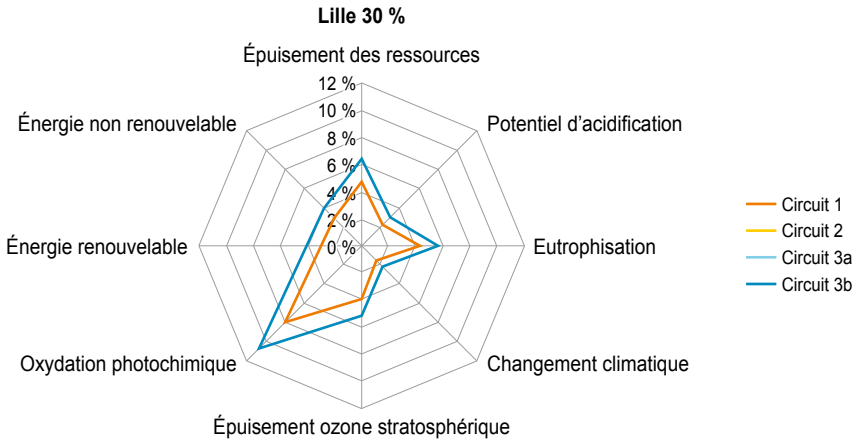
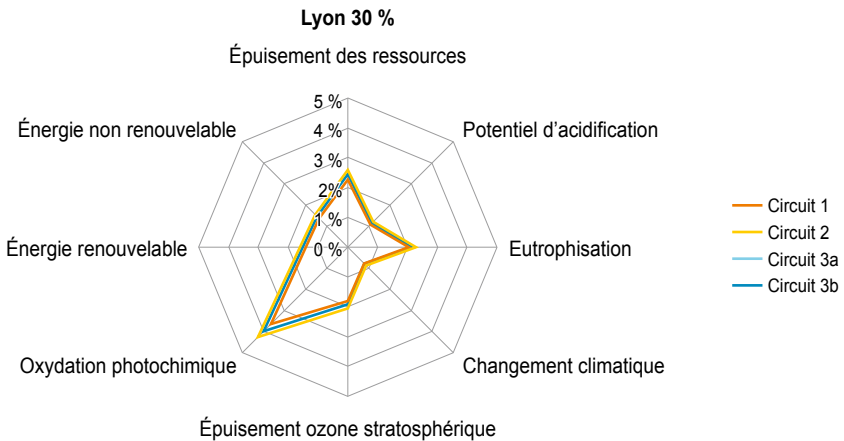


Figure 30.9

Contribution du transport dans l'ACV totale : Lyon – différents circuits



De la même manière, le Tableau 30.13 donne les différences de valeurs d'ACV du transport entre le circuit le plus long et le circuit le plus court, pour chaque taux de substitution, et les valeurs de l'ACV de transport pour le circuit le plus pénalisant. La part du ciment dans l'ACV (au dosage utilisé) est également présentée et comparée aux valeurs d'ACV du circuit de transport et de la composition les plus pénalisants (circuit 3, 100S100G). Ces résultats, comparés à ceux du Tableau 30.10, indiquent que l'influence du circuit reste faible, comparée à celle du ciment, sur les indicateurs de l'ACV. La Figure 30.10 illustre la part de chaque procédé pour une combinaison négative circuit – ville (Lille), et confirme les résultats du Tableau 30.13. La part du ciment atteint 60 à 80 % pour les principaux indicateurs.

Tableau 30.13

Comparaison des circuits les plus longs et les plus courts et rapport transport/ciment

Ville de Lille		260 kg de ciment CEM I	Scénario de transport le plus pénalisant – scénario de transport le moins pénalisant			ACV du transport le plus pénalisant*	Rapport entre ACV du transport le plus pénalisant* /masse de ciment
			10S10G	30S30G	100S100G		
Indicateurs	unités						
Épuisement des ressources abiotiques	kg Sb eq	$4,88 \cdot 10^{-2}$	$3,67 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$	$3,42 \cdot 10^{-2}$	$5,03 \cdot 10^{-1}$	9,70 %
Potentiel d'acidification	kg SO ₂ eq	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$	$5,84 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$5,89 \cdot 10^{-1}$	4,44 %
Eutrophisation	kg PO ₄₃₋ eq	$7,04 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$4,94 \cdot 10^{-3}$	$7,57 \cdot 10^{-2}$	9,30 %
Changement climatique	kg CO ₂ eq	6,62	$4,94 \cdot 10^{-1}$	1,47	4,61	$2,29 \cdot 10^2$	2,89 %
Formation d'ozone stratosphérique	kg CFC-11 eq	$9,59 \cdot 10^{-7}$	$7,21 \cdot 10^{-8}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$6,73 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	8,88 %
Oxydation photochimique	kg C ₂ H ₄ eq	$8,31 \cdot 10^{-3}$	$6,36 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-3}$	$5,94 \cdot 10^{-3}$	$5,08 \cdot 10^{-2}$	16,36 %
Énergie renouvelable	MJ	1,42	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$9,88 \cdot 10^{-1}$	$1,69 \cdot 10^1$	8,39 %
Énergie non renouvelable	MJ	$1,13 \cdot 10^2$	$8,38 \cdot 10^1$	$2,52 \cdot 10^1$	$7,89 \cdot 10^1$	$1,83 \cdot 10^3$	6,16 %
Déchets dangereux	kg	$8,46 \cdot 10^{-2}$	$6,22 \cdot 10^{-2}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$6,07 \cdot 10^{-2}$	$3,45 \cdot 10^{-2}$	245,13 %
Déchets non dangereux	kg	1,07	$7,82 \cdot 10^{-1}$	$2,48 \cdot 10^{-1}$	$7,78 \cdot 10^{-1}$	1,60	66,95 %
Déchets inertes	kg	$7,7 \cdot 10^{-1}$	$5,64 \cdot 10^{-1}$	$1,81 \cdot 10^{-1}$	$5,68 \cdot 10^{-1}$	$2,06 \cdot 10^{-1}$	376,70 %
Déchets radioactifs	kg	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$6,33 \cdot 10^{-5}$	$1,87 \cdot 10^{-5}$	$5,87 \cdot 10^{-5}$	$5,48 \cdot 10^{-3}$	1,55 %

* L'ACV du transport le plus pénalisant est obtenue pour le béton 100S100G et le circuit 3.

Comme indiqué Tableau 30.5, le ciment utilisé pour cette partie de l'étude était un CEM I. Ce choix, nécessaire pour atteindre les performances, accentue le poids du ciment.

Afin de pouvoir comparer l'influence de la situation territoriale, la troisième étape présente la part du transport pour le circuit 1, les quatre villes et les quatre formules de bétons. Seuls quatre indicateurs sont représentés ici, afin

de faciliter la compréhension. On peut observer que l'évolution des indicateurs en fonction du taux de substitution est différente selon la ville. Cela provient de la distance entre la carrière de granulats naturels et la centrale de BPE.

Figure 30.10

Part de chaque procédé dans le cas du circuit 2 – Lille – 30 % de GBR

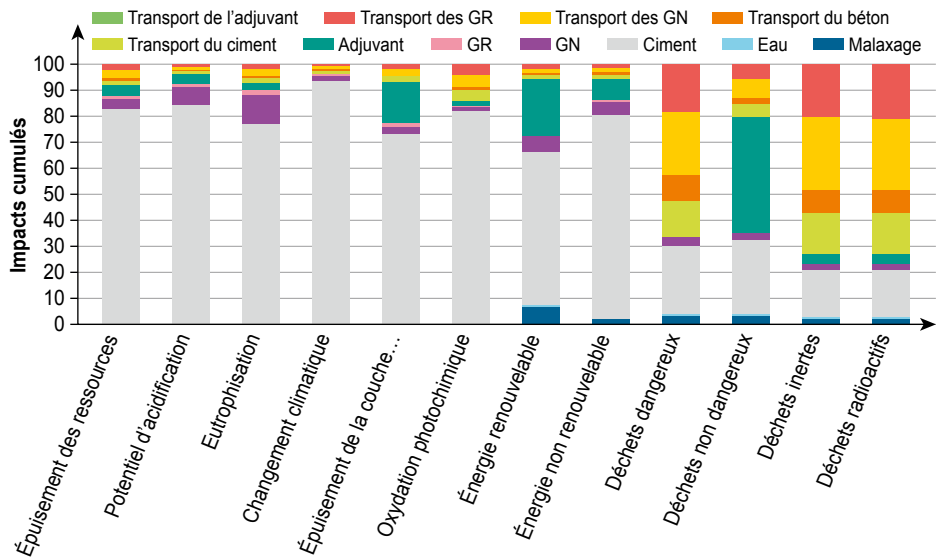
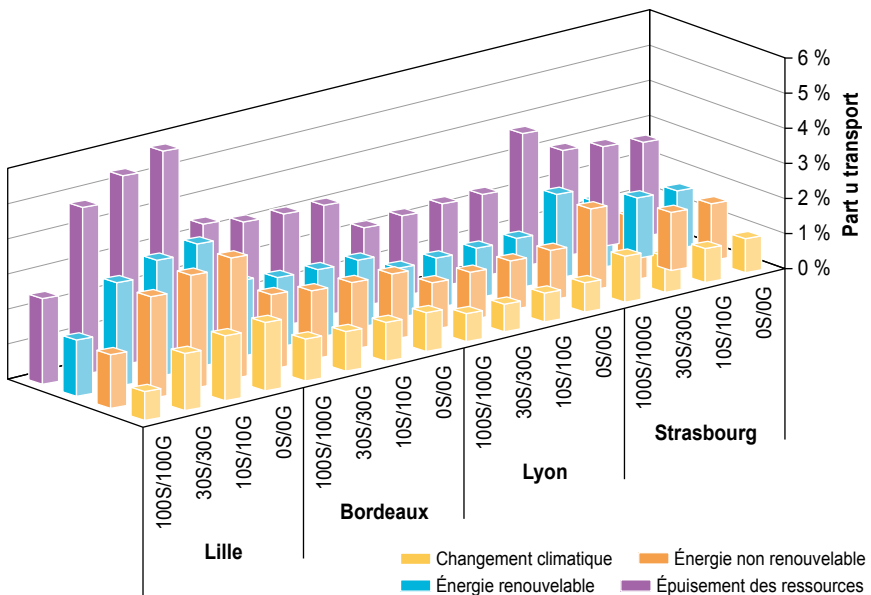


Figure 30.11

Part du transport pour la ville et le taux substitution – circuit 1



30.3.1.5. ACV du chantier expérimental de Chaponost

Les Figures 30.12 et 30.13 affichent la comparaison environnementale entre le chantier de Chaponost tel qu'il a été réalisé (avec des GBR) et tel qu'il aurait été réalisé avec uniquement des granulats naturels (REF), et la part à attribuer à chaque processus dans les deux cas. On observe que les différences sont faibles. Pour à la fois l'acidification atmosphérique, les changements climatiques et l'eutrophisation, le ciment représente la majorité des impacts (Figure 30.13). Les granulats jouent un rôle relativement faible. L'électricité représente la majorité des indicateurs déchets radioactifs, énergies renouvelables et appauvrissement de l'ozone stratosphérique ; c'est aussi une part importante des déchets dangereux et de l'énergie non renouvelable. Cela est dû à une compilation spécifique du processus d'électricité dans le calcul d'ACV ; la valeur obtenue avec OPENLCA est la valeur totale de l'électricité consommée par tous les processus. Le calcul est différent avec SIMAPRO utilisé dans la partie précédente de l'étude de cas. SIMAPRO alloue l'électricité à chaque processus distinct (granulats, ciment, malaxage). Enfin, le transport représente la majorité des impacts pour l'oxydation photochimique et les déchets non dangereux et potentiellement dangereux. Comme expliqué au paragraphe 30.3.1.4, la prise en compte de l'amortissement des infrastructures, telle que réalisée dans la base de données ECOINVENT, induit des indicateurs importants de déchets pour ce processus « transport ». Si ce n'était pas le cas, le transport ne représenterait probablement pas la majorité des impacts pour les déchets non dangereux et potentiellement dangereux. Les tendances pour les deux configurations sont assez similaires.

Ce résultat est dû au fait que les granulats, qu'ils soient naturels ou recyclés, contribuent faiblement aux différents indicateurs d'impact environnementaux, et que les distances de transport sont similaires. La teneur en ciment varie avec le taux de substitution et elle augmente significativement pour le dallage D5 et plus encore pour le dallage D6 (voir Tableau 30.6 et Figure 30.14). D6 ne représente que 16,5 % du volume réalisé. L'augmentation du dosage en ciment a donc un effet moins prononcé qu'observé précédemment (voir § 30.3.1.2).

Figure 30.12

Comparaison environnementale – Chantier de Chaponost

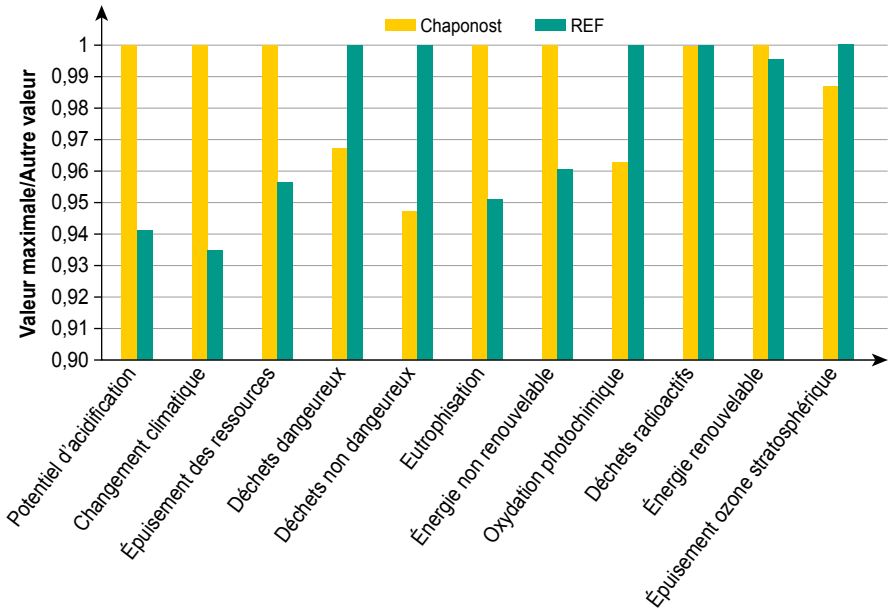


Figure 30.13

Part de chaque processus dans le cas du chantier réalisé avec le béton de référence (sans GBR) et dans le cas du chantier réalisé avec des GBR

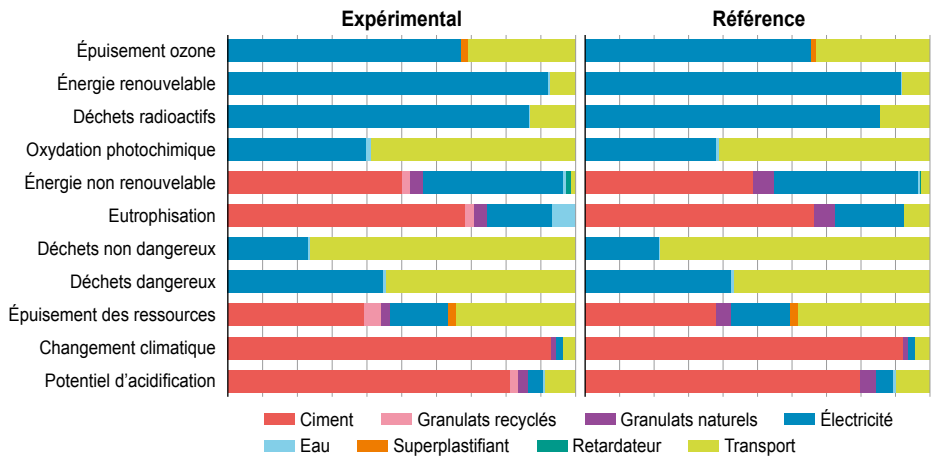
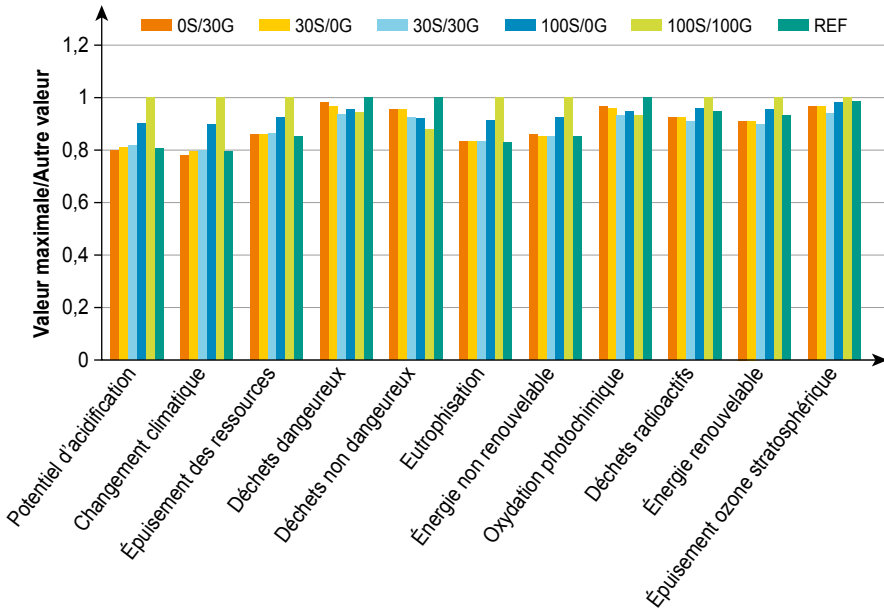


Figure 30.14

Influence de la composition des dallages sur l'ACV



30.3.1.6 Conclusion sur l'étude de cas

L'ACV de l'étude de cas présentée ici montre que l'utilisation de GBR dans le béton ne constitue ni un obstacle, ni une incitation, tant que l'augmentation du dosage en ciment est limitée ou nulle. En effet, peu de différences sont observées entre bétons de GBR et de GN lorsque le dosage de ciment reste proche. Bien que la part du transport des granulats et du béton dans l'ACV globale puisse être importante pour certains indicateurs, l'écart observé en fonction des circuits étudiés ou de la composition reste modéré.

Cette conclusion, qui indique qu'aucun bénéfice substantiel n'est lié à l'utilisation de GBR dans le béton, contredit les conclusions d'autres chercheurs [Knoeri *et al.*, 2013 ; Vrijders et Wastiels, 2017 ; Serres *et al.*, 2016]. Dans leurs études, ces auteurs trouvent que l'utilisation des GBR est bénéfique, non pas à cause d'un apport favorable du recyclage à l'impact environnemental, mais plutôt en raison des impacts évités (calcul supplémentaire à une ACV) [Knoeri *et al.*, 2013] [Vrijders et Wastiels, 2017] ou des compositions réalisées avec le même dosage en ciment et des quantités de granulats différentes [Serres *et al.*, 2016].

Par contre, en ce qui concerne l'influence du dosage en ciment, les conclusions de nombreux auteurs sont les mêmes que celles de cette étude. Si le dosage en ciment du béton de GBR est plus élevé que celui du béton de GN, alors les indicateurs environnementaux sont plus pénalisants pour le béton de GBR

en raison de la contribution négative du ciment à tous les types d'impacts [Braunschweig *et al.*, 2011 ; Weil *et al.*, 2006 ; Marinković *et al.*, 2013 ; Müller *et al.*, 2015]. Le choix de formuler des « bétons de GBR ayant même dosage en ciment », comme dans cette étude, est également proposé dans une autre étude [Marinković *et al.*, 2017].

Concernant l'influence des transports, les auteurs considèrent souvent une grande distance de transport pour les granulats naturels, mais pas pour les GBR [Marinković *et al.*, 2013 ; Vrijders et Wastiels, 2017 ; Ding *et al.*, 2016 ; Evangelista et Brito, 2007a], ce qui renforce alors l'intérêt du béton de GBR. Dans cette hypothèse, les résultats de l'ACV indiquent que de nombreux impacts environnementaux (consommation d'énergie, réchauffement global, eutrophisation, acidification, oxydants photochimiques) dépendent des conditions de transport (type et distance) [Marinković *et al.*, 2013]. Dans la présente étude, les distances de transport des GBR sont souvent supérieures à celles des granulats naturels, compte tenu de l'emplacement des carrières et des plateformes de recyclage dans les régions étudiées. Si d'autres régions étaient proposées (Paris, par exemple), les résultats seraient différents. [Müller *et al.*, 2015] ont montré que dans une région où les granulats naturels ne sont pas disponibles à proximité, alors que la distance de transport des GBR est faible, l'utilisation des GBR devient une option intéressante du point de vue de l'ACV.

Dans la présente étude, aucune autre option de production des GBR n'a été examinée et, par conséquent, aucune autre affectation de l'impact environnemental du recyclage des GBR n'a été proposée. Ainsi, aucune différence significative entre l'ACV des granulats naturels et des GBR n'a été observée. Il est alors logique que, avec le même dosage en ciment et pour des distances de transport proches, l'ACV des GBR et des granulats naturels soit assez semblable.

Notons que certains auteurs incluent les considérations territoriales dans leurs recherches sur la production durable et le recyclage des granulats [Blengini *et al.*, 2012 ; Faleschini *et al.*, 2016 ; Jullien *et al.*, 2012 ; Silva *et al.*, 2017]. Différentes affectations du procédé de recyclage et de la part imputable aux GBR sont également discutées [Vrijders et Wastiels, 2017].

Précisons, comme beaucoup d'auteurs ([Marinković *et al.*, 2017 ; Braunschweig *et al.*, 2011 ; Weil *et al.*, 2006 ; Vieira *et al.*, 2016 ; Van den Heede et de Belie, 2012]) que les conclusions de cette étude ne sont valides qu'avec les attributions, les hypothèses, les bases de données et les compositions proposées ici. Il serait hasardeux de généraliser les conclusions obtenues, étant donné que les résultats de l'ACV dépendent de nombreux facteurs détaillés dans l'état de l'art.

30.3.2. Indicateurs d'impact supplémentaires (taxes évitées et indicateurs économiques)

30.3.2.1. Limites de l'ACV dans le cas étudié

Comme indiqué précédemment (paragraphe 30.3.1), l'ACV ne montre pas de différences significatives entre GBR et GN en utilisant les indicateurs d'impact proposés par la norme [NF EN 15804, 2012]. En particulier, l'indicateur d'épuisement des ressources n'est pas représentatif du contexte territorial. C'est un indicateur global, mais les ressources en granulats naturels ne sont pas partout les mêmes sur le territoire. Selon la méthode CML, l'appauvrissement en granulats doit être évalué par l'inventaire du silicium, bien que cette ressource ait un très faible appauvrissement. Par conséquent, aucune différence significative n'est observée entre composition pour ce marqueur (et pour le calcium aussi). En outre, la consommation de surfaces de terrain en raison du stockage des déchets n'est pas évaluée dans la norme [NF EN 15804, 2012].

30.3.2.2. Indicateurs environnementaux et sociétaux

Afin de confirmer le caractère éco-respectueux des bétons de GBR, d'autres comparaisons peuvent être effectuées. Par exemple, les critères « préservation des granulats naturels » et « évitement du stockage de déchets » peuvent promouvoir l'utilisation des GBR dans le béton. Ainsi, si l'on considérait un indicateur d'impact supplémentaire différent des indicateurs normalisés, comme la quantité de granulats naturels non prélevés dans l'environnement, on constaterait que le chantier de Chaponost a permis d'éviter le prélèvement de 260 tonnes de granulats dans le sol. Même si cet indicateur n'est pas normalisé au sens de l'EN 15804, il représente bien une réalité de ces travaux de construction.

Un indicateur semblable est utilisé dans l'éco-comparateur SEVE¹⁴, conçu pour les professionnels de la route. D'autres indicateurs sont proposés dans la littérature, tel l'indicateur CMR (consommation de ressources minérales primaires, kg) [Ding *et al.*, 2016] ou des indicateurs pour l'évaluation de l'accessibilité des ressources. Dans ce cas, l'indicateur prend en compte l'impact d'autres paramètres, sociétaux et anthropiques, comme la proximité d'une zone urbaine [Ioannidou *et al.*, 2015 ; Habert *et al.*, 2010].

Un autre critère « stockage de déchets évité » a été utilisé en prenant pour les GBR une masse volumique apparente de 1 200 kg/m³. Dans l'exemple du chantier de Chaponost, 260 m³ de « déchets » n'ont pas été stockés. Ce critère doit également être rapproché de la diminution des surfaces de décharge/stockage non contrôlée. Il faut noter qu'afin de respecter la norme ACV, pour

14. <http://www.usirf.com/les-actions-de-la-profession/developpement-durable/eco-comparateurseve/>

considérer ce critère, l'étape de déconstruction des bâtiments ou des routes devrait être inclus dans les procédés pris en compte pour le calcul d'ACV (Unité Fonctionnelle). Des critères similaires sont proposés dans la littérature [Knoeri *et al.*, 2013 ; Mousavi *et al.*, 2017].

30.3.2.3. *Évaluation du paramètre $t \cdot km$ dans le transport des granulats : un indicateur économique dépendant de la territorialité*

Une analyse indépendante de la méthode d'ACV utilisée pourrait également être proposée. Cette analyse a été faite pour les bétons de GBR ayant un dosage en ciment constant transportés sur les trajets décrits Figure 30.12 (Tableau 30.14). L'analyse comparative des circuits, en $t \cdot km$ (voir équation 30.1) indique, pour la majorité des villes étudiées, que le circuit qui consiste à préparer séparément les GBR et les GN sur leur plateforme respective, puis à les transporter vers la centrale de BPE, est la solution la moins pénalisante (circuit 1). Le choix de préparer un pré-mélange sur le site de production des GN conduit à augmenter la valeur de la $t \cdot km$. Selon les villes, la solution la plus défavorable serait, soit de concasser les GBR sur la plateforme de recyclage avant de les transporter vers le site de production des GN (circuit 2), soit de concasser des GBR sur le site de production des GN (circuit 3). Les conclusions de cette analyse sont similaires à celles obtenus au paragraphe 30.3.1.4.

Le cas particulier de Paris n'est pas considéré ici, en raison du transport fluvial des granulats souvent utilisé dans cette ville, et donc d'une modélisation différente des circuits.

Certaines villes présentent des configurations particulières. Par exemple, le circuit 1 de Strasbourg n'est pas le moins pénalisant, alors que c'est celui qui comprend le moins d'étapes. Lille a une configuration territoriale différente qui conduit à des contrastes importants, en termes de $t \cdot km$, entre les différents circuits, avec une nette préférence pour le circuit 1. Pour cette ville, il existe très peu de sites de production de granulats naturels à proximité du centre, et un taux élevé de GBR permet de réduire l'impact du transport. On comprend ainsi pourquoi l'augmentation de la teneur en GBR pénalise tous les circuits à l'exception du cas de Lille (et de Lyon, dans une moindre mesure) et pour le circuit le moins pénalisant. La cause en est l'éloignement des sites de granulats naturels. À l'exception de Lille où le circuit 1 est très avantageux, l'écart de $t \cdot km$ entre circuits ne dépasse pas 15 % pour les pré-mélanges.

$$t \cdot km = M_{GBR} \times D_{GBR} + M_{GN} \times D_{GN} + M_C \times D_C \quad (30.1)$$

avec

- M_{GBR} = masse de GRR ; D_{GBR} = Distance de transport du GBR ;
- M_{GN} = masse de granulats naturels ; D_{GN} = Distance de transport du granulats naturel ;
- M_B = masse du béton ; D_B = Distance de transport du béton

Tableau 30.14

Calcul de la t · km de chaque circuit pour les quatre villes étudiées

t · km	Strasbourg	Lyon	Lille	Bordeaux
Circuits désavantageux : valeurs maximales pour chaque ville				
0S0G	Circuits 1, 2, 3			
	16,033	13,925	40,574	19,107
10S10G	Circuit 3	Circuit 2	Circuit 3	Circuit 3
	17,707	14,733	42,737	21,333
30S30G	Circuit 2	Circuit 2	Circuit 2	Circuit 2
	20,582	16,345	46,969	23,026
100S100G	Circuit 1	Circuit 3	Circuit 3	Circuit 3
	25,108	17,620	59,137	26,982
Circuits avantageux : valeurs minimales pour chaque ville				
0S0G	Circuits 1, 2, 3			
	16,033	13,925	40,574	19,107
10S10G	Circuit 3	Circuit 1	Circuit 1	Circuit 1
	16,577	13,867	38,047	19,989
30S30G	Circuit 3	Circuit 1	Circuit 1	Circuit 1
	17,665	13,754	33,007	22,049
100S100G	Circuit 3	Circuit 1	Circuit 1	Circuit 1
	21,477	13,357	15,362	40,574

Aucune conclusion générale ne peut donc être avancée, quelle que soit la ville considérée. Une étude territoriale est alors nécessaire pour déterminer les circuits les plus avantageux ou pénalisants, pour le taux de substitution envisagé. Ce critère « économique » pourrait figurer dans une ACV particulière, mais l'approche de comparer l'impact environnemental et économique n'a encore fait l'objet que de peu de travaux [Braga *et al.*, 2017 ; Geng *et al.*, 2017].

30.4. Besoins de recherche

Afin de compléter l'étude proposée ci-avant, il serait intéressant d'analyser la possibilité d'un nouveau circuit incluant le pré-mélange de GN et de GBR sur la plateforme de recyclage. Une distribution différente des sites de GBR pourrait

aussi être considérée, et une extension de l'étude de la sensibilité au transport dans des configurations particulières conduisant à une augmentation des distances de transport permettrait de déterminer si un circuit devient critique par rapport à un autre. Dans l'étude présentée ici, des configurations avec un déficit de granulats naturels et d'autres modes de transport n'ont pas été étudiées et il pourrait être intéressant de le faire. Dans ce cas, un modèle basé sur l'équation (30.1) utilisée pour un circuit spécifique (pré-mélange sur la plateforme de recyclage) pourrait être proposé pour une composition de béton donnée ; la valeur limite du taux de substitution pourrait être déterminée. Dans la même veine, une comparaison avec les situations territoriales d'autres grandes villes européennes pourrait élargir le champ d'application de la présente étude.

Un circuit court correspondant à une démolition/recyclage/réutilisation sur le même chantier pourrait aussi être envisagé.

Le Projet National RECYBETON propose également d'utiliser un ciment incorporant la fraction fine du béton recyclé (voir chapitres 4 et 5). L'ACV de ce béton devrait être aussi étudiée dans le prolongement du projet.

30.5. Conclusion

Les résultats de l'ACV réalisée selon la norme [NF EN 15804, 2012] ne démontrent pas clairement l'éco-respectabilité des bétons de GBR proposés dans cette étude, quel que soit le taux de substitution utilisé. Plusieurs raisons en sont la cause. Tout d'abord, en appliquant les recommandations de cette norme, les GBR et les granulats naturels ne montrent pas de différences significatives quant à leur propre ACV. Ensuite, certaines des compositions sont formulées à teneur en ciment variable parce qu'il est fréquent de formuler le béton avec une teneur en ciment qui augmente avec le taux de substitution des GN par des GBR, afin de garantir la résistance mécanique. Cela provoque une augmentation des indicateurs d'impact, en raison de la teneur en clinker notamment. Enfin, même si la teneur en ciment reste la même entre béton de GBR et de GN, lorsque le contexte local conduit à une proximité entre ville (centrale à béton) et sites de production des GN et des GBR, l'utilisation de GBR n'est pas justifiée par une diminution du transport et des impacts qui en résultent. Néanmoins, pour les bétons formulés à même dosage en ciment, l'étude a montré que le taux de substitution optimal de GBR et le circuit de transport le plus favorable pouvaient être estimés par une analyse basée sur le critère de la $t \cdot km$. Les résultats des indicateurs de l'ACV seront alors proportionnels aux valeurs de la $t \cdot km$.

Il faut noter que l'éco-respectabilité des bétons de GBR n'est pas remise en cause par cette étude. Le bénéfice environnemental de l'utilisation des GBR est assuré par le calcul des impacts évités (quantité de GN préservée ou consommation de surfaces de terrain évitée). L'éco-respectabilité d'un béton doit être analysée par une approche globale prenant en compte les

indicateurs de l'ACV pour déterminer les impacts, et par le calcul d'impacts supplémentaires. En outre, si les sites de production des granulats naturels sont très éloignés, la livraison des GBR sur le site de production du béton sera bénéfique pour l'ACV.

Enfin, les conclusions présentées ici ne peuvent être généralisées à d'autres cas où les compositions de béton, les distances de transport et, notamment, la méthode d'ACV seraient différentes.



Chapitre 31.

Lixiviation des granulats et des bétons recyclés

E. Vernus¹, L. Gonzalez¹, D. Blanc², R. Bodet³, J.-M. Potier⁴

Résumé—Le relargage de substances à partir des matériaux de construction dans le sol et dans les eaux souterraines est une préoccupation croissante prise en compte dans le cadre de la Réglementation Européenne des Produits de Construction. Cette question est particulièrement sensible lorsque des déchets sont intégrés dans la composition des matériaux de construction. L'évaluation environnementale réglementée des émissions de substances dangereuses issues des produits de construction a été débattue par le comité technique de normalisation TC 351 du CEN (Comité européen de normalisation), qui a défini des procédures de lixiviation harmonisées pour tester les matériaux de construction.

Les principales questions en la matière posées dans le cadre du Projet National RECYBETON sont : « En quoi les caractéristiques de lixiviation des bétons incorporant des granulats de béton recyclé (GBR) peuvent-elles différer de celles des bétons ne contenant que des granulats naturels ? » ; « Est-ce que les bétons de GBR satisfont aux valeurs seuils fixées pour l'évaluation environnementale des matériaux de construction ? »

Au cours des deux dernières décennies, la communauté scientifique, notamment l'organisation ISCOWA (International Society for the Environmental and Technical Implications of Construction With Alternative Materials) s'est intéressé à l'évaluation environnementale des matériaux de construction contenant des déchets, afin d'apprécier l'acceptabilité environnementale de l'utilisation de matériaux alternatifs dans la construction. Les granulats recyclés sont, avec les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères et les cendres volantes de charbon, les trois principaux déchets concernés par ces études.

-
1. PROVADEMSE, Villeurbanne.
 2. INSA Lyon, DEEP, Villeurbanne.
 3. UNPG, Paris.
 4. SNBPE, Paris.

Dans le cadre du Projet National RECYBETON, les principales caractéristiques de lixiviation des GBR et des bétons de GBR décrites dans la littérature ont été recensées. Des essais de lixiviation ont été réalisés sur des bétons conformes aux formules du Projet National (voir annexe). L'objectif principal était de comparer les caractéristiques de lixiviation des bétons de GBR à celles d'un béton de granulats naturels témoin.

La France n'a pas encore établi de méthodes d'essai ni fixé de valeurs seuils pour évaluer l'acceptabilité environnementale des matériaux de construction contenant des déchets. Les caractéristiques de lixiviation des matériaux du Projet National RECYBETON ont donc été déterminées selon les protocoles néerlandais et allemands, et leur conformité a été vérifiée au regard des conditions d'acceptabilité environnementale définies par ces deux pays.

31.1. Introduction

L'utilisation des déchets et des coproduits industriels dans l'industrie de la construction a été étudiée et s'est développée depuis une quarantaine d'années. Certains de ces travaux ont conduit à de réelles avancées techniques et commerciales, comme l'utilisation de cendres volantes de charbon, de laitiers de hauts fourneaux ou de fumées de silice dans le ciment et le béton, avec un impact positif pour la préparation des bétons. Le plus souvent, seules les propriétés techniques et les opportunités économiques ont été les vecteurs du recyclage des déchets dans les matériaux de construction. Les aspects sanitaires et environnementaux n'ont été pris en compte que progressivement dans certains pays et en particulier en Europe au travers de la « Directive sur les Produits de Construction » remplacé ensuite par le « Règlement Européen sur les Produits de Construction » [CEE, 2011].

Certains Déchets de Construction et de Démolition (DCD) ont des propriétés techniques intéressantes permettant de les valoriser en tant que matières premières secondaires. Cependant, ils peuvent aussi contenir des constituants potentiellement dangereux et leur nocivité dans les matériaux de construction doit être évaluée.

Les méthodes de lixiviation qui s'appliquent aux matériaux de construction incorporant des DCD sont tout d'abord présentées, ainsi que les principaux résultats des travaux scientifiques recensés dans la littérature sur le comportement à la lixiviation des GBR et des bétons de GBR. Les expériences menées dans le cadre du Projet National RECYBETON, pour évaluer l'acceptabilité environnementale de l'utilisation des GBR en substitution des granulats naturels dans les bétons, sont ensuite décrites, avec les conclusions associées.

31.2. État de l'art

Le relargage dans le sol, les eaux souterraines, les eaux de surface et l'eau de mer de substances dangereuses issues des matériaux de construction a été défini dès 1989 par la « troisième exigence essentielle » de la Directive européenne sur les Produits de Construction. Les méthodes de détermination des émissions et des rejets ont été harmonisées par le comité européen de normalisation. Cependant, à ce jour, seuls quelques États membres ont établi une législation nationale sur l'acceptabilité environnementale de l'utilisation des DCD dans la construction. Ces pays sont les Pays-Bas, la Belgique, le Danemark, la Finlande, la Suède, la Norvège, l'Autriche et l'Allemagne.

Les DCD sont les matières premières secondaires les plus couramment utilisées dans les travaux publics (remblais routiers). La France a publié des directives pour l'utilisation de matériaux alternatifs dans la construction routière [SETRA, 2011 ; CEREMA, 2016]. Actuellement, une autre directive est en cours de préparation sur l'utilisation de ces matériaux dans la construction (autre que la construction routière). Des études scientifiques sur le relargage des constituants issus des matériaux de construction contenant des déchets sont menées dans l'objectif de fixer les bases de la réglementation nationale. La plupart de ces travaux sont réalisés par des chercheurs d'Europe du Nord.

Ces études visent à mieux comprendre l'effet de la présence des GBR au sein des bétons, en particulier sur l'accroissement de teneur en métaux lourds (Cr, Pb, As, Ba, Cu, Mo, Sb, Ni, Zn) et anions (sulfates, chlorures) et leur relargage potentiel consécutif. Afin de caractériser le comportement de ces éléments, des essais de lixiviation ont été réalisés en tenant compte de paramètres spécifiques, tels le pH, le rapport liquide/solide, les concentrations d'équilibre, le temps de mise en contact, etc. Pour analyser les résultats, les auteurs ont parfois utilisé la modélisation géochimique afin de déterminer les réactions qui se produisent lors de la lixiviation des éléments, selon leur spéciation en solution et en phase solide.

31.2.1. Examen de la bibliographie sur les essais en laboratoire

La plupart des essais menés à l'échelle du laboratoire ont cherché à évaluer l'influence du pH et de la diffusion contrôlée, à moyen et long terme, sur le comportement à la lixiviation de bétons base de granulats naturels ou contenant des granulats de béton recyclé (GBR).

Par exemple, les essais effectués par [Engelsen *et al.*, 2009, Engelsen *et al.*, 2010 ; Galvin *et al.*, 2012 ; Galvin *et al.*, 2013 ; Chen *et al.*, 2013] ont porté sur la dépendance du pH vis-à-vis de la lixiviation des éléments contenus dans des bétons de GBR et des bétons de granulats naturels.

[Engelsen *et al.*, 2009 ; Engelsen *et al.*, 2010] ont montré que la quantité de métaux lourds lixiviés était faible lorsque le pH était élevé, quels que soient

les matériaux testés, en raison des interactions avec les hydrates. Pour les éléments formant des oxyanions, la solubilité la plus faible a été observée à pH 4-6 et la solubilité la plus élevée à pH 8-11. À pH supérieur à 12, ces oxyanions peuvent être intégrés aux CSH, mais aussi à d'autres phases hydratées telles l'ettringite, l'hydrocalumite/hydrocalcite, les monophases (AFm), ce qui réduit le processus de lixiviation [Chrysochoou et Dermatas, 2007]. Pour les éléments formant des cations, la lixiviation était la plus faible à pH 7-10 et la plus forte à pH inférieur à 7.

Le comportement chimique des éléments contenus dans le béton a été modélisé par [Engelsen *et al.*, 2010] afin d'identifier les mécanismes de leur rétention. Les résultats ont montré qu'il n'y avait aucune différence entre le comportement à la lixiviation des deux types de béton étudiés (à base de granulats naturels et de GBR).

[Galvin *et al.*, 2014] ont quantifié les éléments libérés au cours du « test de diffusion » néerlandais (NEN 7345). La diffusion est le mécanisme de relargage qui préside dans les matériaux monolithiques. Les auteurs ont montré que le comportement des cations métalliques et des oxyanions était indépendant du type de béton ou du pourcentage de substitution des granulats naturels par des GBR. Les principaux mécanismes identifiés étaient la diffusion pour les oxyanions, à l'exception de Cr et Mo pour lesquels le mécanisme prépondérant est l'épuisement, comme pour Zn et Cu (les espèces les plus mobiles). Les courbes de diffusion étaient similaires, quels que soient le type de béton et le pourcentage de substitution. Les seules différences observées dans les relargages étaient liées directement aux variations de pH des formulations.

31.2.2. Examen de la littérature sur les essais réalisés sur des pilotes

Très peu d'essais réalisés sur pilotes avec des matériaux de construction contenant des GBR sont rapportés dans la littérature. Les principaux travaux publiés sont ceux de [Mulugeta *et al.*, 2011 ; Chen *et al.*, 2012 ; Engelsen *et al.*, 2012]. Ils ont étudié les granulats recyclés utilisés en couche de base et couche de fondation des structures routières. Ce type d'utilisation n'entre pas directement dans le champ d'application du Projet National RECYBETON, mais les résultats sont toutefois présentés à titre informatif. Les granulats recyclés ont été utilisés sans liant. Le pH de l'eau en contact avec ces matériaux était donc différent de celui de l'eau en contact avec les bétons de GBR contenant du ciment.

[Chen *et al.*, 2012] ont placé trois cellules lysimétriques sous la couche de base d'un tronçon routier et prélevé la solution percolée afin d'étudier le comportement à la lixiviation des matériaux. Les trois cellules avaient des teneurs en granulats recyclés de 0 %, 50 % et 100 % respectivement. Après sept mois, le pH entre les cellules était compris entre 6,5 et 8,4. Les différences

ont été attribuées aux alcalins résiduels dans les GBR, qui ont été partiellement neutralisés et épuisés par l'eau d'infiltration et par l'effet de vieillissement du CO₂ dissous dans la solution percolée. Toutefois, les auteurs ont constaté qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les trois dispositifs pilotes, en termes de polluants relargués. La lixiviation des oxyanions, tels As, Cr et Se, qui a été constatée, a été attribuée à leur solubilité plus élevée au droit du front de carbonatation, comme déjà signalé par [Mulugeta *et al.*, 2011].

[Engelsen *et al.*, 2012] ont étudié le comportement des éléments majeurs et des métaux lourds de GBR utilisés dans une couche de fondation routière, revêtue ou non revêtue par un enrobé. Les résultats ont été comparés à ceux d'une couche de fondation routière témoin réalisée en granulats naturels, revêtue elle aussi d'un enrobé. Dans les trois contextes, l'eau interstitielle initiale des granulats avait un pH 13, en raison de la nature alcaline de la couche de base sus-jacente. La valeur du pH a diminué plus rapidement dans la route non revêtue que dans la route revêtue. Au cours des cent premiers jours, le relargage de Cr, Cu et V a été significativement plus élevé dans la couche contenant les granulats recyclés que dans celle réalisée en granulats naturels. Après cette période, la concentration de tous les éléments est passée sous les critères d'acceptation norvégiens. Par ailleurs, la lixiviation des éléments contenus dans les granulats a suivi le comportement observé en fonction du pH, dans les essais en laboratoire. Enfin, un effet saisonnier a été observé, probablement en raison de la présence de sels de déverglaçage qui accroissent le lessivage de Cr et Mo.

31.2.3. Principaux résultats de la revue de la littérature

Les essais récemment publiés sur le comportement à la lixiviation des métaux lourds contenus dans les GBR, réalisés tant en laboratoire que sur pilotes, ont montré que le pH est bien le paramètre prédominant. Mais son influence sur la solubilité des éléments qui forment des cations (Cu, Ni, Pb, Zn) est différente de celle sur la solubilité des éléments qui forment des oxyanions (As, Cr, Mo, Sb, Se, Se, V).

Par ailleurs, la présence de GBR dans le béton, en tant que telle, n'augmente pas significativement les émissions de polluants dans l'eau. Ou encore, les conditions de contact des matériaux avec l'eau ont plus d'effet sur la libération des éléments polluants que la quantité de GBR contenue dans le béton.

Dans les différents scénarios testés, l'acceptabilité environnementale des bétons de GBR a été évaluée sur la base de critères propres à chaque auteur, tels la mise en décharge, la qualité de l'eau potable ou des seuils nationaux spécifiques. Ces évaluations montrent que le niveau de contamination de l'eau par des métaux lourds contenus dans les GBR est toujours très faible.

31.3. Résultats RECYBETON

31.3.1. Essais de conformité des bétons contenant diverses quantités de GBR

Les premiers essais menés dans le cadre du Projet National RECYBETON, selon le protocole normalisé européen CEN EN 12457-2[NF EN 12457-2, 2002], ont consisté à comparer le relargage en éléments de bétons contenant différents taux de GBR. Cet essai de lixiviation en bûchée unique se pratique sur un échantillon de matériau fragmenté (taille de particules inférieure à 4 mm), avec un rapport liquide/solide de 10 (l/kg). L'échantillon est mis dans l'eau à température ambiante (20 ± 5 °C) pendant 24 h sous agitation en éluteur rotatif.

Les résultats peuvent être utilisés pour évaluer l'acceptabilité environnementale de l'utilisation des GBR en fin de vie en construction routière, selon le guide « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière – Évaluation environnementale » [SETRA, 2011], et sa déclinaison pour les matériaux issus du bâtiment et des travaux publics « Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière – Les matériaux de déconstruction issus du BTP » [CEREMA, 2016].

31.3.1.1. Influence de la quantité de granulats recyclés

Les trois bétons testés étaient composés de :

- sable et gravillons naturels uniquement (béton témoin C25/30 0S0G) ;
- de sable naturel et de 30 % de gravillons de GBR (béton de GBR C25/30 0S30G) ;
- de sable et de gravillons de GBR uniquement (béton de GBR C25/30 100S100G).

Les résultats de l'essai de lixiviation réalisé selon la norme NF EN 12457-2 sont présentés Figure 31.1. Ils montrent que l'incorporation de GBR n'influence pas la valeur du pH de la solution en contact avec le matériau concassé.

Le relargage des métaux lourds et des anions en solution d'essai sont présentés Figure 31.2, en fraction massique lixiviable du matériau testé (mg/kg MS). Très peu de différences sont observées entre les différentes formulations. L'antimoine, l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et le sélénium n'ont été détectés dans aucun éluât. L'apport de GBR dans le béton n'induit pas de modification significative du comportement à la lixiviation du chrome, du baryum et du molybdène. Leur présence tend cependant à diminuer le relargage du cuivre, du plomb et des sulfates et à augmenter les chlorures (mais uniquement si 100 % des granulats naturels sont remplacés par des GBR).

Figure 31.1

Valeurs de pH des éluâts des échantillons de béton testés préparés selon le protocole de lixiviation normalisé NF EN 12457-2

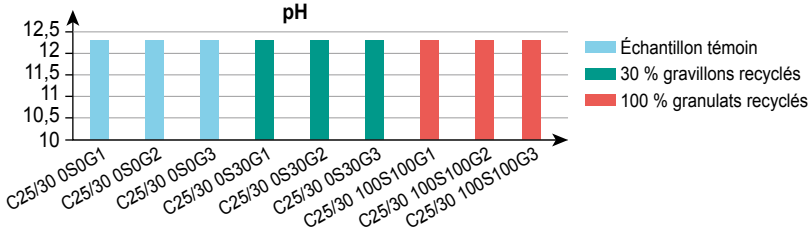


Figure 31.2a

Masse des polluants détectés dans l'éluât des échantillons de béton testés selon le protocole de lixiviation EN 12457-2

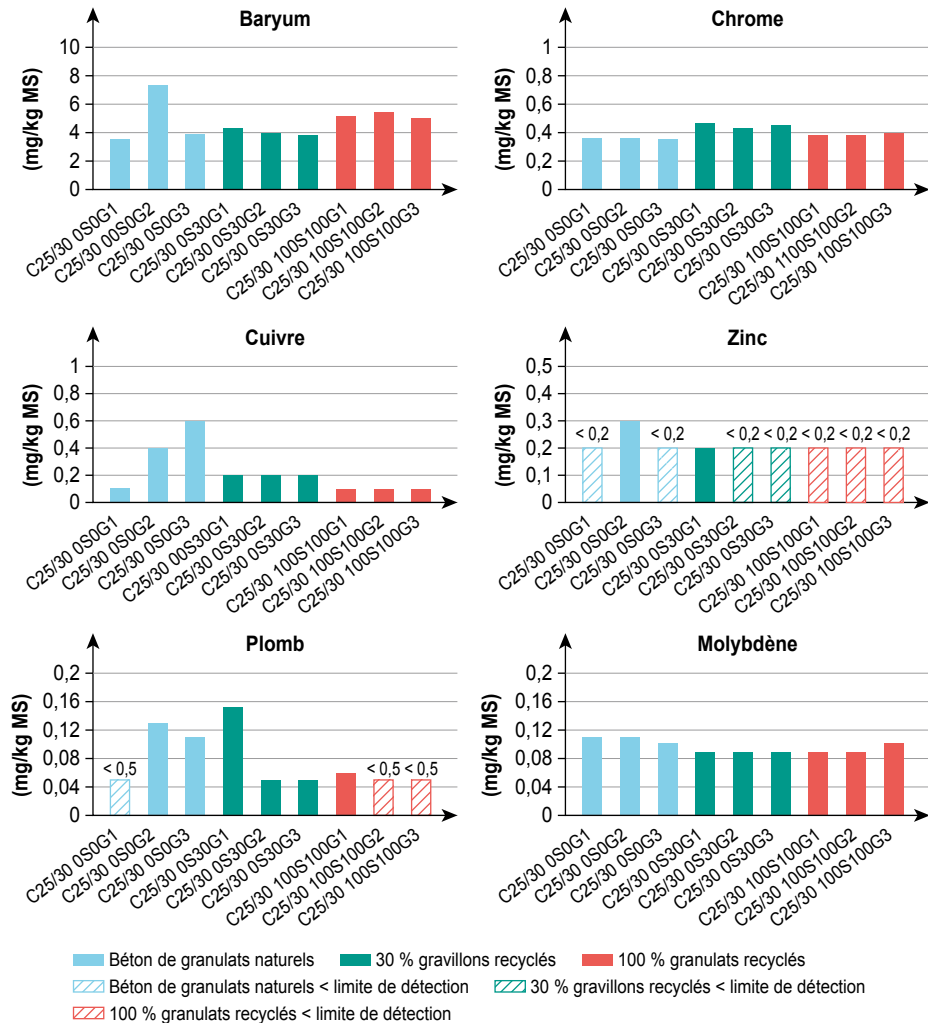
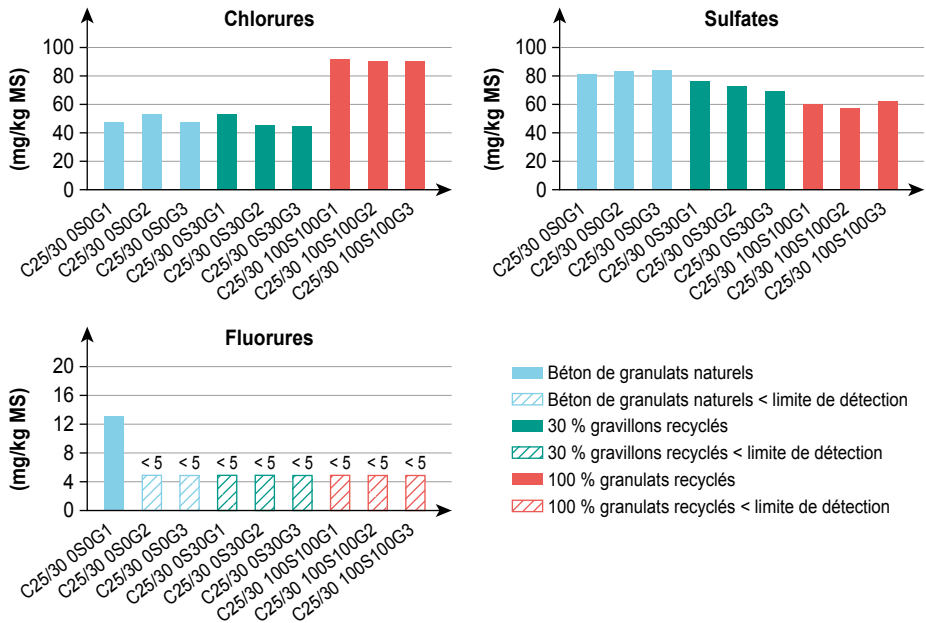


Figure 31.2b

Masse des polluants détectés dans l'éluât des échantillons de béton testés selon le protocole de lixiviation NF EN 12457-2



31.3.1.2. Acceptabilité environnementale de la réutilisation des GBR en fin de vie en construction routière

Bien que la principale application visée dans le Projet National RECYBETON ne soit pas l'utilisation des GBR en construction routière, les caractéristiques de relargage de ces matériaux ont toutefois été comparées aux valeurs seuils définies en France pour évaluer l'aptitude environnementale des matériaux alternatifs pour une utilisation en technique routière ([SETRA, 2011 ; CEREMA, 2016]). On peut considérer qu'il s'agit d'une perspective intéressante pour le recyclage de ces matériaux en fin de vie.

Le Tableau 31.1 compare la quantité des éléments relargués par les différents bétons aux valeurs seuils définies par le Guide CEREMA [CEREMA, 2016] pour l'utilisation des déchets de déconstruction dans les couches de chaussées, ainsi qu'aux critères de conformité des déchets inertes mis en décharges (définis par la Commission européenne et transposés en France par le décret 12/12/2014).

Les résultats montrent que toutes les formules de béton testées respectent les valeurs seuils définies dans le guide pour l'utilisation de matériaux de déconstruction en techniques routières. De même, à l'exception d'une des trois

Tableau 31.1

Quantité des éléments relargués par les différents bétons testés et comparaison aux valeurs seuils pour l'utilisation des déchets de déconstruction comme matériaux pour la chaussée, et pour la mise en décharge des déchets inertes.

Paramètre	Unité	Minimum	Maximum	Critère d'acceptation en décharge*	CEREMA Guide d'application Usage type 3 Catégorie bétons**
Chlorures	mg/kg MS	29,4	90,4	800	1 000
Sulfates	mg/kg MS	< 50	83,4	1 000	1 300
Fluorures	mg/kg MS	< 5	13	10	13
Antimoine	mg/kg MS	< 0,02	< 0,02	0,06	0,08
Arsenic	mg/kg MS	< 0,05	< 0,05	0,5	0,6
Baryum	mg/kg MS	2,72	7,27	20	25
Cadmium	mg/kg MS	< 0,005	< 0,005	0,04	0,05
Chrome	mg/kg MS	0,31	0,46	0,5	0,6
Cuivre	mg/kg MS	0,01	0,6	2	3
Molybdène	mg/kg MS	0,09	0,11	0,5	0,6
Nickel	mg/kg MS	< 0,05	< 0,05	0,4	0,5
Plomb	mg/kg MS	< 0,05	0,15	0,5	0,6
Sélénium	mg/kg MS	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1
Zinc	mg/kg MS	< 0,2	0,3	4	5
Mercurure	mg/kg MS	< 0,002	< 0,002	0,01	0,01

* Limites à respecter pour l'élimination de déchets en installation de stockage de déchets inertes.

** Limites à respecter pour les utilisations en couches de roulement des matériaux issus des déchets du BTP.

formules témoin, elles respectent toutes aussi les seuils pour une élimination en décharge de déchets inertes. Seul le chrome, pour toutes les formules, présente une fraction lixiviable relativement proche du critère de conformité pour la mise en stockage de déchets inertes.

Par conséquent, les GBR issus des formulations établies dans le cadre du Projet National RECYBETON, à leur fin de vie, pourraient être réutilisés dans la construction routière quel que soit leur taux d'incorporation.

31.3.2. Caractéristiques de lixiviation dynamique des bétons de GBR

Les derniers essais réalisés dans le cadre du Projet National RECYBETON ont porté sur la dynamique du relargage de bétons incorporant diverses quantités de GBR. Ces expériences ont été réalisées selon le protocole normalisé européen CEN TS 16637-2 [CEN, 2014]. Cet essai de lixiviation dédié à des échantillons monolithiques comporte un programme spécifique en sept étapes successives de prélèvement et de renouvellement du liquide (intervalles de 6 heures à 20 jours), avec un rapport liquide/surface de 80 l/m². La prise d'essai est mise en contact avec l'eau, sans agitation, à température ambiante (19 °C à 25 °C).

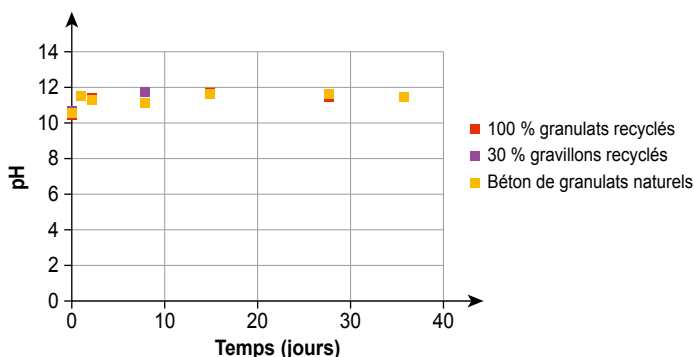
Le comportement à la lixiviation des bétons a été comparé aux critères de conformité définis par les Pays-Bas et l'Allemagne pour évaluer l'acceptabilité environnementale des matériaux de construction. Ces critères se réfèrent à des protocoles d'essai de lixiviation spécifiques à chaque pays.

31.3.2.1. Influence de la quantité de GBR sur la dynamique de relargage

La dynamique de relargage des bétons de GBR 0S30G et 100S100G et du béton témoin 0S0G a été mise en évidence à l'aide du protocole d'essai européen CEN TS 16637-2 [CEN, 2014]. Les résultats présentés Figure 31.3 montrent que le pH n'a pas changé de façon significative au cours du temps, et qu'aucune différence visible n'a été observée entre les valeurs de pH du béton de référence et des bétons de GBR.

Figure 31.3

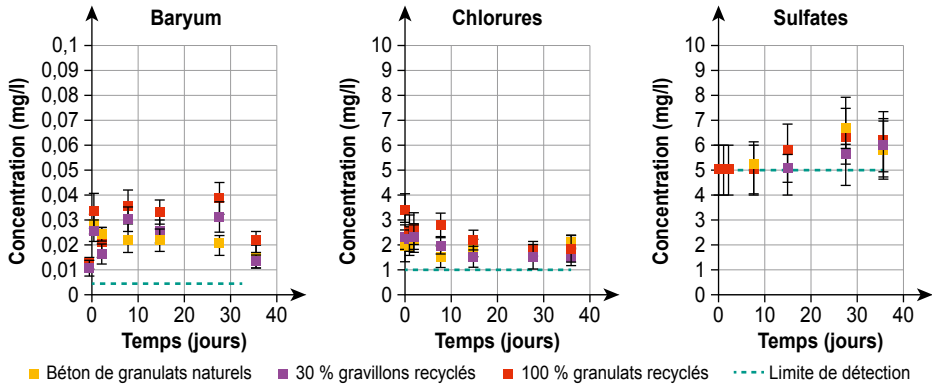
pH des éluats collectés lors de l'essai de lixiviation dynamique CEN TS 16637-2



Comme le montre la Figure 31.4, seuls le baryum, les chlorures et les sulfates ont été trouvés dans les éluats, et les concentrations détectées n'étaient pas significativement différentes entre matériaux étudiés.

Figure 31.4

Concentration des éluats recueillis pendant l'essai de lixiviation dynamique CEN TS 16637-2



Le relargage de polluants observé sur ces bétons de GBR étaient inférieurs à ceux trouvés par d'autres auteurs tels que [Galvin *et al.*, 2014], qui ont constaté des niveaux de relargage différents du fait de pH différents entre les formulations testées.

31.3.2.2. Acceptabilité environnementale des GBR au regard des valeurs seuils des matériaux de construction

Le protocole d'essai appliqué aux Pays-Bas (« Dutch Soil Decree ») pour les matériaux de construction moulés est celui de l'essai de diffusion NEN 7375 [NEN, 2004]. Il consiste en un essai de lixiviation sur échantillons monolithiques. Les conditions particulières de cet essai sont caractérisées par un rapport « volume/surface » d'environ 100 l/m² et une durée d'essai de 64 jours.

Le protocole d'essai allemand appliqué dans le cadre du DiBt (« Deutsches institute für Bautechnik ») pour le béton et les constituants du béton est basé sur le projet de norme d'essai statique à long terme du « Comité allemand pour le béton armé » (DAfStb). Il consiste aussi en un essai de lixiviation sur échantillons monolithiques. Les conditions particulières de cet essai sont caractérisées par un rapport « volume/surface » de 80 l/m² et une durée d'essai de 56 jours.

Les résultats de l'application de ces essais au béton de référence OS0G et au béton de GBR 100S100G sont présentés dans le Tableau 31.2. Ils sont exprimés en masse cumulée des éléments extraits par unité de surface exposée (mg/m²).

Tableau 31.2

Quantités d'éléments libérées des bétons testés par rapport aux valeurs limites néerlandaises et allemandes d'acceptabilité environnementale des matériaux de construction

Élément	« Dutch Soil Decree » MEN 7375			DiBt allemand (DAfStb)		
	Valeur limite (mg/m ²)	0S0G (mg/m ²)	100S100G (mg/m ²)	Valeur limite (mg/m ²)	0S0G (mg/m ²)	100S100G (mg/m ²)
Antimoine	8,7	0,081	0,097	–	–	–
Arsenic	260	0,115	0,139	5	0,095	0,082
Baryum	1 500	7,3	3,8	–	–	–
Cadmium	3,80	0,081	0,071	2,4	0,063	0,054
Chrome	120	4,75	4,46	24	3,126	2,720
Chrome VI	–	–	–	4	2,13	2,271
Cobalt	60	0,145	0,071	24	0,09	0,131
Cuivre	98	2,4	2,23	24	1,301	1,101
Étain	50	0,403	0,353	–	–	–
Mercure	1,40	0,083	0,072	–	–	–
Molybdène	144	0,924	0,774	–	–	–
Nickel	81	0,806	0,706	24	0,625	0,544
Plomb	400	0,781	0,949	12	1,38	1,473
Sélénium	4,80	2,19	0,177	–	–	–
Vanadium	320	0,852	1,634	–	–	–
Zinc	800	2,02	1,766	150	1,563	1,36
Bromures	670	202	177	–	–	–
Fluorures	2 500	202	177	–	–	–
Chlorures	110 000	1 025	1 111	–	–	–
Sulfates	165 000	2 557	5 002	–	–	–

Les résultats indiquent que les deux bétons (référence et béton de GBR) sont conformes aux valeurs limites néerlandaises et allemandes, qui déterminent l'acceptabilité environnementale des matériaux de construction. Les expériences réalisées selon l'essai de diffusion néerlandais (NEN 7375) révèlent un relargage de sulfates deux fois plus élevé pour le béton 100S100G que pour le béton de référence. Par contre, le relargage du sélénium du béton 100S100G est très inférieur à celui du béton de référence témoin.

31.4. Besoins de recherche

En appliquant des protocoles normalisés pour évaluer le comportement à la lixiviation des bétons de GBR, l'impact de certains paramètres d'exposition réels (intempéries, exposition au CO₂ atmosphérique) ne sont pas considérés dans la plupart des études. Plusieurs expériences à échelle pilote ont en effet montré que l'exposition en conditions réelles pouvait induire d'importantes variations de pH à la surface des bétons et donc une augmentation du potentiel de lixiviation des polluants.

Ce sujet pourrait être abordé dans le cadre de travaux ultérieurs au Projet National RECYBETON, en tenant compte du niveau de carbonatation des GBR.

31.5. Conclusion

La revue des articles scientifiques sur le comportement à la lixiviation des bétons de GBR et les résultats des expériences menées dans le cadre du Projet National RECYBETON montrent que la présence de GBR au sein des bétons n'entraîne pas une augmentation des rejets de polluants, du moins si les conditions de pH sont préservées.

Dans l'attente d'un protocole français d'évaluation environnementale pour l'incorporation des DCD dans les matériaux de construction, l'observation du relargage cumulé de polluants selon les méthodes d'évaluation néerlandaise et allemande pour l'acceptabilité environnementale des matériaux de construction montre que, même si le béton de GBR est composé à 100 % de sable et de gravillons de GBR, le matériau respecte les valeurs seuils. Il peut donc être utilisé dans ces pays.

REMERCIEMENTS

Les essais ont été réalisés grâce au soutien scientifique et financier du Projet National RECYBETON, et de Thierry Sedran et son équipe de l'IFSTTAR qui ont préparé les différents échantillons soumis aux essais. Ce chapitre a été rédigé sur la base des travaux menés par Lorena Gonzalez de la plateforme d'innovation technologique PROVADEMSE, et complétés grâce à la relecture réalisée par Denise Blanc du laboratoire DEEP de l'INSA Lyon et Adelaïde Feraille du laboratoire NAVIER de l'ENPC.

Chapitre 32.

Vers le multi-recyclage

T. Sedran¹, D.T. Dao², A. Feraille³

Résumé – Ce chapitre décrit, via une approche théorique, comment le multi-recyclage fait évoluer les propriétés du béton, dès le deuxième recyclage notamment. En utilisant différents modèles empiriques reliant la formulation aux propriétés, les effets du taux de substitution des granulats naturels par des granulats de béton recyclé (GBR) et du nombre de recyclages sur les différentes propriétés du béton sont analysés. Si la substitution est totale, la détérioration des propriétés avec le nombre de recyclages est très rapide, ce qui montre l'intérêt de limiter le taux de substitution pour préserver les performances d'un béton appelé à être recyclé plusieurs fois.

32.1. Introduction

Dans les chapitres précédents, les propriétés des granulats de béton recyclé (GBR) ont été abondamment étudiées (voir partie I) ainsi que leur influence sur les bétons de GBR lors d'un premier recyclage (voir parties III, IV et V). Ces chapitres confirment que le recyclage des GBR dans le béton est réalisable sous réserve de prendre certaines précautions, afin de respecter les spécifications de performances mécaniques, de durabilité et de coût.

Cependant, dans la perspective d'un recyclage renouvelé, il est nécessaire de vérifier si un multi-recyclage est possible, et si oui, quelle est la meilleure option en termes de taux de substitution. Pour répondre à ces questions, [Dao, 2012 ; Dao *et al.*, 2014] ont étudié l'évolution des propriétés de GBR et de bétons de GBR après deux cycles de recyclage. Une première série de bétons, appelés B1, de diverses résistances à la compression, a été réalisée à partir de différents granulats naturels, appelés G1 (siliceux roulé, calcaire concassé et un mélange des deux). Les GBR obtenus par concassage du béton B1 ont été appelés G2, et une deuxième génération de béton B2 a été réalisée avec 100 % de GBR G2. Ensuite, une nouvelle génération de GBR, appelés G3, a

1. IFSTTAR, Nantes.

2. LafargeHolcim, Centre de recherches, Lyon.

3. ENPC, Marne-la-Vallée.

été obtenue par concassage du béton B2, et une troisième génération de béton B3 a été fabriquée avec 100 % de GBR G3. À partir de cette vaste campagne, Dao a proposé différents modèles empiriques reliant les propriétés des GBR à celles du béton dont ils proviennent, ainsi que des modèles permettant de prédire les propriétés des bétons de GBR à partir des propriétés des GBR qu'ils contiennent. Tous ces modèles sont présentés dans [Dao, 2012], et ils sont partiellement repris dans les Chapitres 10 et 15. En répétant en cascade ces modèles, il est alors théoriquement possible de prédire les propriétés des GBR et des bétons de GBR au gré de recyclages multiples.

Le présent chapitre fait un rapide rappel de ces modèles. Ils sont ensuite appliqués quatre fois à deux bétons de GBR du Projet National RECYBETON, le premier béton contenant les granulats naturels sélectionnés pour le projet (voir annexe). L'influence de la résistance à la compression visée et du taux de recyclage à chaque étape est également présentée.

32.2. Prédiction des propriétés des granulats multi-recyclés [Dao, 2012]

Les paragraphes suivants décrivent comment prédire les propriétés pertinentes d'un GBR (G_n) à partir de celles du béton (B_{n-1}) dont il est issu par concassage, propriétés qui sont ensuite utilisées pour prédire les propriétés du béton de la génération prochaine (B_n).

32.2.1. Compacité résiduelle

La connaissance de la compacité résiduelle β (compacité virtuelle d'une classe granulaire monodisperse) de chaque constituant est nécessaire pour optimiser le squelette granulaire d'un béton et prédire son affaissement, grâce au Modèle d'Empilement Compressible (voir [de Larrard, 1999] et Chapitre 15). Elle est contrôlée par la forme et la texture de surface des grains et elle est déduite de la compacité réelle mesurée sur chaque constituant (gravillons, sables, fillers, liants, etc.).

Les expériences de Dao ont montré que les compacités virtuelles β des GBR dépendaient principalement de la taille moyenne de leurs grains. En effet, il n'a trouvé aucune influence sur cette propriété du granulat naturel dont ils sont faits, de la résistance à la compression du béton dont ils sont issus, ni du nombre de recyclages appliqués (voir Figure 15.1 du Chapitre 15). La présence de la pâte adhérente sur les GBR explique probablement ce constat. Avec les procédés de concassage et de criblage sélectionnés, Dao a obtenu l'équation suivante :

$$\beta = 0,525 + 0,055\log(d_{50}) \quad (32.1)$$

où d_{50} est l'ouverture du tamis laissant passer 50 % du granulat, en mm.

32.2.2. Coefficient d'attrition (Micro Deval) et paramètre $k_{g,g}$

Le paramètre $k_{g,g}$ d'un gravillon décrit son rôle sur la résistance à la compression du béton qui le contient. Le même paramètre $k_{g,s}$ est déterminé pour le sable (voir chapitre 10). Pour les GBR, Dao a montré que le paramètre $k_{g,s}$ peut être approximé à 4,2, quel que soit le nombre de recyclage ou le béton à partir duquel le GBR a été produit par concassage. Il a également montré (équation 10.7, chapitre 10) que le paramètre $k_{g,g}$ des gravillons de GBR moyens et gros peut être relié à leur résistance à l'abrasion MDE [NF EN 1097-1, 2011]. Le coefficient MDE dépend lui-même de la résistance à la compression du béton de la génération précédente B_{n-1} dont il est issu, et de la résistance à l'abrasion du granulat naturel G_1 utilisé au départ (premier cycle), selon l'équation suivante :

$$MDE_{G_n} = 23,69 - 0,21fc_{B_{n-1}}^c + 0,58 MDE_{G_1} \quad (32.2)$$

où :

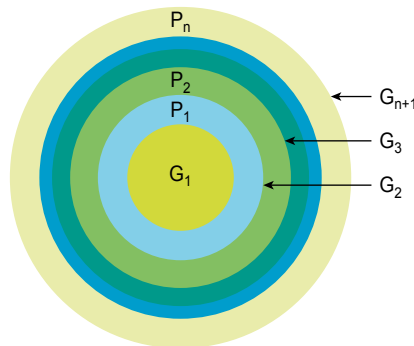
- $fc_{B_{n-1}}^c$ est la résistance à la compression du béton de la génération précédente B_{n-1} , au moment du concassage (en MPa) ;
- MDE_{G_1} et MDE_{G_n} sont respectivement la valeur MDE du granulat de la première génération (granulat naturel) et de la n-ième génération de GBR.

32.2.3. Masse volumique

Les différentes fractions (sables, gravillons moyens et gros) du GBR G_{n+1} sont composées d'une part des différentes fractions du GBR G_n et d'autre part de la nouvelle pâte P_n (comprenant le ciment et d'éventuelles additions minérales) utilisée pour produire le béton B_n , comme illustré Figure 32.1.

Figure 32 1

Composition d'un GBR multi-recyclé



Ainsi, la masse volumique des différentes classes d'un granulat multi-recyclé G_{n+1} est donnée par l'équation suivante :

$$\rho_{G_{n+1,i}} = (1 - P_{n,G_{n+1,i}}) \cdot \rho_{G_n} + P_{n,G_{n+1,i}} \cdot \rho_{P_n} \quad (32.3)$$

où :

- $\rho_{G_{n+1,i}}$ est la masse volumique de la classe i du GBR G_{n+1} , en kg/m^3 ;
- $P_{n,G_{n+1,i}}$ est la proportion volumique de la nouvelle pâte P_n contenue dans la fraction i du GBR G_{n+1} , en pourcentage. Les expériences de Dao ont montré qu'après concassage et criblage, le GBR G_{n+1} contenait moins de nouvelle pâte P_n que son béton parent B_n , probablement en raison d'une perte de pâte finement broyée. La diminution de la teneur en moyenne en pâte (pourcentage) est donnée dans le Tableau 32.1 pour chaque fraction granulaire ;
- ρ_{G_n} est la masse volumique moyenne du squelette granulaire du béton B_n . On suppose ici que les proportions des différentes classes de G_n dans le béton B_n restent inchangées lors de la production du GBR G_{n+1} ;
- ρ_{P_n} est la masse volumique moyenne de la nouvelle pâte P_n du béton B_n .

Tableau 32.1

Différences de teneur en nouvelle pâte dans les GBR par rapport à leur béton parent ($P_{n,G_{n+1,i}} - P_{n,B_n}$)

fraction i	G_2 vs B_1	G_{n+1} vs B_n
Gravillon 11/22 mm	- 8 %	- 10 %
Gravillon 6/11 mm	- 10 %	- 13 %
Sable 0/6 mm	- 2 %	- 11 %

32.2.4. Absorption d'eau

L'absorption d'eau Ab_{24} (pourcentage massique) est liée à la porosité accessible à l'eau p (pourcentage volumique) selon l'équation suivante où ρ_D et ρ_e sont les masses volumiques respectives du granulat et de l'eau (en kg/m^3) :

$$Ab_{24} = p \frac{\rho_e}{\rho_D} \quad (32.4)$$

En appliquant les mêmes principes que pour la masse volumique, la porosité accessible à l'eau du GBR multi-recyclé est déterminée selon l'équation suivante :

$$p_{G_{n+1,i}} = (1 - P_{n,G_{n+1,i}}) \cdot p_{G_n} + P_{n,G_{n+1,i}} \cdot p_{P_n} \quad (32.5)$$

où

- $p_{G_{n+1,i}}$ est la porosité de la classe i du GBR G_{n+1} , en pourcentage ;
- p_{G_n} , p_{P_n} sont respectivement la porosité accessible à l'eau du GBR G_n et de la pâte P_n contenus dans le béton B_n , en pourcentage.

32.3. Prédiction des propriétés du béton multi-recyclé [Dao, 2012]

Les paragraphes suivants décrivent comment certaines propriétés du béton B_{n+1} peuvent être prédites à partir des propriétés du GBR G_n dont ils sont faits.

La proportion volumique de la pâte P_{n,B_n} contenue dans le béton B_n , composée par exemple de ciment et de fillers calcaires, est donnée par :

$$P_{n,B_n} = \left(\frac{M_{c,B_n}}{\rho_c} + \frac{M_{fc,B_n}}{\rho_{fc}} + \frac{M_{eff,B_n}}{\rho_e} + V_{a,B_n} \right) \quad (32.6)$$

où

- ρ_c , ρ_{fc} , ρ_e sont respectivement la masse volumique du ciment, des fillers calcaires et de l'eau, en kg/m^3 ;
- M_{c,B_n} , M_{fc,B_n} , M_{eff,B_n} sont respectivement la masse de ciment, de fillers calcaires et d'eau efficace dans le béton B_n , en kg/m^3 ;
- V_{a,B_n} le volume d'air dans le béton B_n , en m^3/m^3 .

32.3.1. Masse volumique

La masse volumique du béton B_n est donnée par l'équation suivante :

$$\rho_{B_n} = (1 - P_{n,B_n}) \cdot \rho_{G_n} + P_{n,B_n} \cdot \rho_{P_n} \quad (32.7)$$

où :

- ρ_{B_n} est la masse volumique du béton B_n , en kg/m^3 ;
- P_{n,B_n} est la proportion volumique de la nouvelle pâte P_n , telle que définie par la relation (32.6) ;
- ρ_{G_n} est la masse volumique moyenne du squelette constitué des différentes classes de GBR G_n dans le béton B_n , en kg/m^3 ;
- ρ_{P_n} est la masse volumique de la nouvelle pâte P_n , contenue dans le béton B_n , en kg/m^3 . Cette valeur est calculée selon les relations (32.8) et (32.9), où h_c est le degré final d'hydratation du ciment calculé par le modèle empirique de Waller cité dans [de Larrard, 1999].

$$\rho_{P_n} = \frac{M_{fc,B_n} + M_{c,B_n} \cdot (1 + 0,23h_c)}{P_{n,B_n}} \quad (32.8)$$

$$h_c = 1 - \exp\left(-3,38 \frac{M_{c,B_n}}{M_{eff,B_n}}\right) \quad (32.9)$$

32.3.2 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau du béton B_n est calculée selon l'équation suivante :

$$p_{B_n} = (1 - P_{n,B_n}) \cdot p_{G_n} + P_{n,B_n} \cdot p_{P_n} \quad (32.10)$$

où :

- p_{G_n} est la porosité moyenne du squelette constitué des différentes classes du GBR G_n dans le béton B_n , en pourcentage ;
- p_{P_n} est la porosité accessible à l'eau de la nouvelle pâte P_n contenue dans le béton B_n , en pourcentage. Cette valeur est calculée selon l'équation suivante :

$$p_{p_n} = 0,94 \frac{\left(V_{a,B_n} + 100 \frac{M_{\text{eff},B_n}}{\rho_e} - \left(\frac{0,21}{\rho_e} - \frac{0,086}{\rho_c} \right) \cdot h_c \cdot M_{c,B_n} \right)}{P_{n,B_n}} \quad (32.11)$$

32.3.3. Teneur totale en pâte

Le volume total de pâte dans le béton B_n est composé des différentes couches de pâte accumulées sur le granulat G_n au cours des différents recyclages et de la nouvelle pâte directement ajoutée au béton B_n . La connaissance de cette donnée est nécessaire pour calculer le retrait du béton (voir ci-après) :

$$V_{p,B_n} = 1000 \left(P_{n,B_n} + \sum_{j=1}^{n-1} \left(\prod_{i=1}^j (1 - P_{n+1-i, B_{n+1-i}}) \right) P_{n-j, G_{n+1-i}} \right) \quad (32.12)$$

où :

- V_{p,B_n} est le volume total de pâte dans le béton B_n ;
- P_{i,B_i} est la proportion volumique de la nouvelle pâte P_i dans le béton B_i ;
- $P_{i,G_{i+1}}$ est la proportion volumique moyenne de la nouvelle pâte P_i contenue dans le béton B_i à partir duquel les GBR G_{i+1} sont recyclés.

32.3.4. Module d'élasticité

Le modèle pour prédire le module d'élasticité du béton à partir des modules d'élasticité du granulat et de la pâte de ciment est donné dans [de Larrard, 1999] et repris dans le chapitre 10 (paragraphe 10.2.3). Dao a montré que ce modèle pouvait être appliqué en considérant que :

$$E_{G_{n+1}} = 0,65E_{B_n} + 0,35E_{G_n} \quad (32.13)$$

où :

- E_{B_n} est le module d'élasticité du béton B_n , en GPa ;
- E_{G_n} et $E_{G_{n+1}}$ sont le module élastique du granulat G_n et G_{n+1} en GPa, respectivement.

32.3.5. Retrait de dessiccation

Le volume de pâte dans les GBR augmente avec le nombre de recyclages, ce qui assouplit les GBR et augmente le retrait total. Ainsi, Dao a proposé et validé le modèle simplifié suivant pour prédire le retrait au dessiccation du béton B_n à 290 jours où le paramètre central est le volume total de pâte dans le béton (y compris la pâte entourant les GBR) :

$$\epsilon_{B_n}^{\text{tot}} = -0,0026(V_{p,B_n})^2 + 3,83V_{p,B_n} - 613,61 \quad (32.14)$$

où :

- $\epsilon_{B_n}^{\text{tot}}$ est le retrait total du béton B_n , en $\mu\text{m}/\text{m}$, mesuré selon [NF P 18-427] sur éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$;
- V_{p,B_n} est le volume total de pâte dans 1 mètre cube de béton B_n , calculé selon l'équation (32.12), en litres.

32.3.6. Perméabilité aux gaz

La perméabilité au gaz des différents bétons recyclés réalisés par Dao a été mesurée avec l'appareil CEMBUREAU. La relation suivante a été obtenue :

$$k_{\text{int},B_n} = 4,10^{-21}(V_{k,B_n})^2 - 3,10^{-18}V_{k,B_n} + 6,10^{-16} \quad (32.15)$$

où :

- k_{int,B_n} est la perméabilité apparente au gaz du béton, mesurée sur éprouvettes cylindriques de $\varnothing 11 \text{ cm}$, en m^2 ;
- V_{k,B_n} est le volume total de pâte de clinker dans 1 mètre cube de béton B_n , en litres. Ce volume est calculé de la même manière que pour la pâte totale, avec les équations (32.6) et (32.12) mais en ne tenant pas compte des fillers calcaires, le cas échéant, et en ne prenant en compte que la part de clinker dans le ciment, si le ciment est un ciment composé (CEM II/A-L, etc.).

32.3.7. Carbonatation

Enfin, Dao a montré que la profondeur de carbonatation d'un béton multi-recyclé B_n dépend principalement de la masse de nouveau clinker ajouté au béton. Les GBR G_n n'ont *a priori* pas d'influence directe sur la profondeur de carbonatation. Ceci s'explique par le fait que les GBR sont probablement déjà carbonatés lorsqu'ils sont introduits dans le béton. Néanmoins, ils ont un effet indirect, car la teneur en ciment doit généralement être augmentée pour compenser leurs propriétés mécaniques moindres, afin de conserver la résistance à la compression du béton. Dao a obtenu la relation suivante à partir de ses essais :

$$e_{B_n} = -0,0657M_{k,B_n} + 39,144 \quad (32.16)$$

où :

- e_{B_n} est la profondeur de carbonatation dans le béton B_n , mesurée sur échantillons de $\varnothing 11 \times 7 \text{ cm}^3$ après 28 jours d'exposition, en mm ;
- M_{k,B_n} , la masse de nouveau clinker dans 1 mètre cube de béton B_n , en kg/m^3 .

32.4. Exemple d'application des modèles à quatre cycles de recyclage

Les équations précédentes ont été associées au Modèle d'Empilement Compressible (MEC) [de Larrard, 1999] implémenté dans le logiciel BetonlabPro ([de Larrard et Sedran, 2007], voir aussi le chapitre 15) pour prédire l'évolution des propriétés du béton au cours de quatre cycles de recyclage. Les propriétés des GBR ont été déduites de celles du béton de la génération précédente, avec les équations données paragraphe 32.2. Ensuite, la résistance à la compression du béton de la génération suivante a été calculée selon le modèle présenté Chapitre 10 (relation 10.4), l'affaissement avec le logiciel BetonlabPro et les autres propriétés avec les équations du paragraphe 32.3 (voir aussi le chapitre 15). Ces calculs ont été itérés à chacun des cycles.

32.4.1. Spécifications

Deux familles de béton (C25/30 et C55/67) ont été simulées, dont les spécifications sont résumées dans le Tableau 32.2. De plus, pour chaque famille, deux taux de recyclage ont été testés : 0S30G (pas de sable de GBR et 30 % en masse de gravillons naturels remplacés par des gravillons de GBR) et 100S100G (substitution totale des granulats naturels). Le squelette granulaire a été optimisé pour chaque combinaison de GBR et de granulats naturels. Pour les quatre familles ainsi obtenues, les GBR ont été recyclés à partir des bétons de la même famille, en ayant toujours au départ le béton de granulats naturels parent.

Tableau 32.2

Caractéristiques des bétons C25/30 et C55/67

Classe de résistance	C25/30	C55/67
Résistance à la compression visée à 28 jours (MPa)	25	55
Résistance à la compression moyenne à 28 jours (MPa)	30	65
Affaissement (cm)	20	20
Classe d'exposition (NF EN 206/CN, voir chapitre 14)*	XC1	XF1

* Selon la norme [NF EN 206/CN, 2013], la classe d'exposition XC1 impose que $C_{eq} \geq 260 \text{ kg/m}^3$ et $E_{eff}/C_{eq} \leq 0,65$, avec C_{eq} la teneur en liant équivalente et E_{eff} la teneur en eau efficace. La classe d'exposition XF1 impose que $C_{eq} \geq 280 \text{ kg/m}^3$ et $E_{eff}/C_{eq} \leq 0,60$.

32.4.2. Matériaux

Les granulats G1 sont le sable et les deux gravillons naturels du Projet National RECYBETON (voir annexe). On suppose aussi à ce stade que les trois GBR théoriques G_n ont la même granularité que les GBR du Projet National

RECYBETON (voir annexe). Les autres propriétés ont été calculées à partir des équations du paragraphe 32.2.

Le même ciment CEM II/A LL 42,5 que dans le Projet National RECYBETON a été retenu pour le béton de classe C25/30 (voir annexe). Pour le béton C55/67, un ciment théorique a été créé en considérant les mêmes propriétés, mais en ayant une résistance à la compression de 64 MPa à 28 jours et un dosage de saturation en superplastifiant de 0,4 % (en extrait sec).

Le même superplastifiant que dans le Projet National RECYBETON a été utilisé (voir annexe) pour tous les bétons, avec un dosage fixé à 0,15 % pour le béton C25/30 et à 0,32 % pour le béton C55/67.

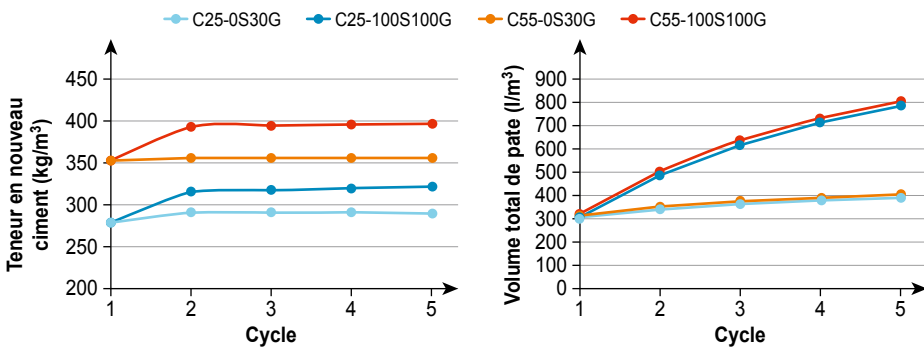
Le même filler calcaire FC que dans le Projet National RECYBETON a également été choisi (voir annexe) pour tous les bétons, avec un rapport $FC/(C + FC)$ inférieur à 0,15 pour le béton C25/30 et à 0,20 pour le béton C55/67.

32.4.3. Résultats des simulations

Les figures suivantes présentent les résultats des simulations. Le cycle 1 correspond à la production de la première génération de béton de granulats naturels. Le recyclage commence avec le cycle 2.

Figure 32.2

Teneur en nouveau ciment et volume total de pâte des bétons multi recyclés



La Figure 32.2 montre que la demande en ciment augmente surtout au niveau du premier recyclage, et qu'elle reste quasi-stable par la suite (recyclages suivants). Ce résultat s'explique principalement par le fait que le terme k_g ne dépend que de la résistance du granulat naturel d'origine pour une famille de bétons donnée, car la résistance à la compression du béton visée est constante (voir paragraphe 32.2.2). Il n'y a donc pas de surconsommation de ciment liée au multi-recyclage. D'autre part, le volume total de pâte (pâte résiduelle adhérente aux GBR et nouvelle pâte) augmente avec le nombre de recyclages, en particulier pour un recyclage avec substitution totale des

granulats (100S100G). Dans ce cas, le volume de pâte devient exorbitant, avec pour effet d'augmenter considérablement la porosité, la perméabilité aux gaz et le retrait, et de réduire le module d'élasticité (Figures 32.3, 32.4 et 32.5). Par contre, le multi-recyclage ne pose pas de problème de carbonatation, puisqu'on constate même une diminution de la profondeur de carbonatation à 28 jours avec l'augmentation du nombre de recyclages.

Toutes ces évolutions sont similaires, quelle que soit la classe de résistance à la compression.

Figure 32.3

Porosité à l'eau et perméabilité au gaz des bétons multi-recyclés

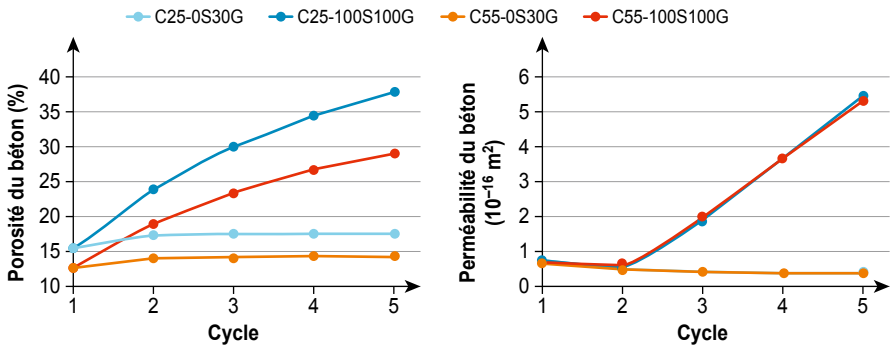


Figure 32.4

Module d'élasticité des bétons multi-recyclés

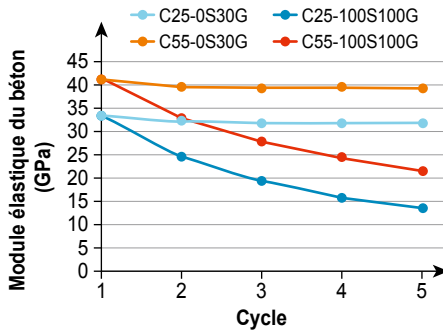
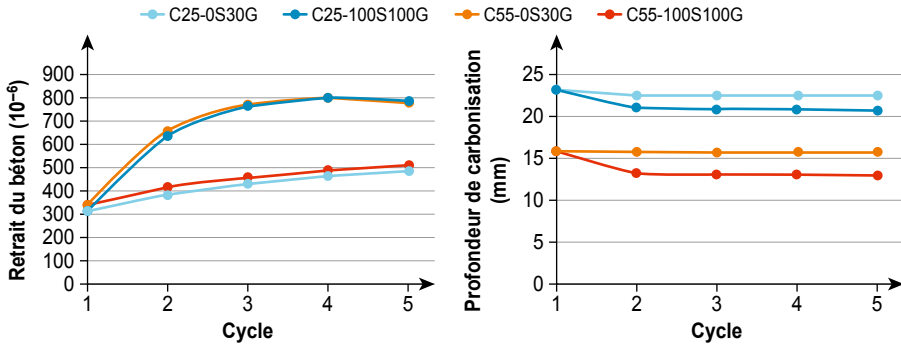


Figure 32.5

Retrait et profondeur de carbonatation des bétons multi-recyclés



32.4.4. Problématiques environnementales

Le multi-recyclage a été évalué sous l'angle environnemental en utilisant la méthode d'ACV (analyse du cycle de vie) de la norme [NF EN 15804, 2012], comme décrit dans le chapitre 30. Les bétons définis précédemment ont été pris comme support, en considérant les distances moyennes de transport adoptées dans le logiciel BETie du syndicat national du béton prêt à l'emploi [SNBPE, 2011], à savoir : 124 km par route, 18 km par train et 26 km par voie d'eau pour le ciment ; 22 km par route et 23 km par voie d'eau pour les granulats naturels.

La Figure 32.6 présente les résultats obtenus pour le béton C25/30 100S100G recyclé 4 fois, en considérant les mêmes distances de transport pour les GBR et pour les granulats naturels. On constate que les différences ne sont pas significatives et que quasiment tous les indicateurs d'impact diminuent avec le multi-recyclage, à l'exception de trois d'entre eux. Si l'on s'attarde sur l'indicateur « changement climatique », on observe que ce dernier augmente principalement avec le premier recyclage (cycle 2), en raison de l'augmentation du dosage en ciment qui a un impact important sur cet indicateur. Pour les cycles suivants, la teneur en ciment reste quasi-constante, il en est donc de même pour l'indicateur de changement climatique. Pour l'indicateur « énergie non renouvelable », la tendance est la même car il dépend fortement aussi de la teneur en ciment (le ciment consomme une importante quantité d'énergie non renouvelable). En ce qui concerne l'indicateur « épuisement des ressources abiotiques », il augmente uniquement lorsque l'on passe du béton normal (cycle 1) au premier recyclage (cycle 2), du fait que, comme indiqué Chapitre 30, cet indicateur d'impact est plus important (environ d'un facteur 3) pour 1 tonne de granulats recyclés (GBR) que pour 1 tonne de granulats naturels. Cet indicateur d'impact diminue pour les recyclages suivants parce que la quantité de granulats utilisée diminue.

Figure 32.6

Évolution des indicateurs d'impact environnementaux du béton C25/30 100S100G en supposant la même distance de transport pour les granulats naturels et les GBR

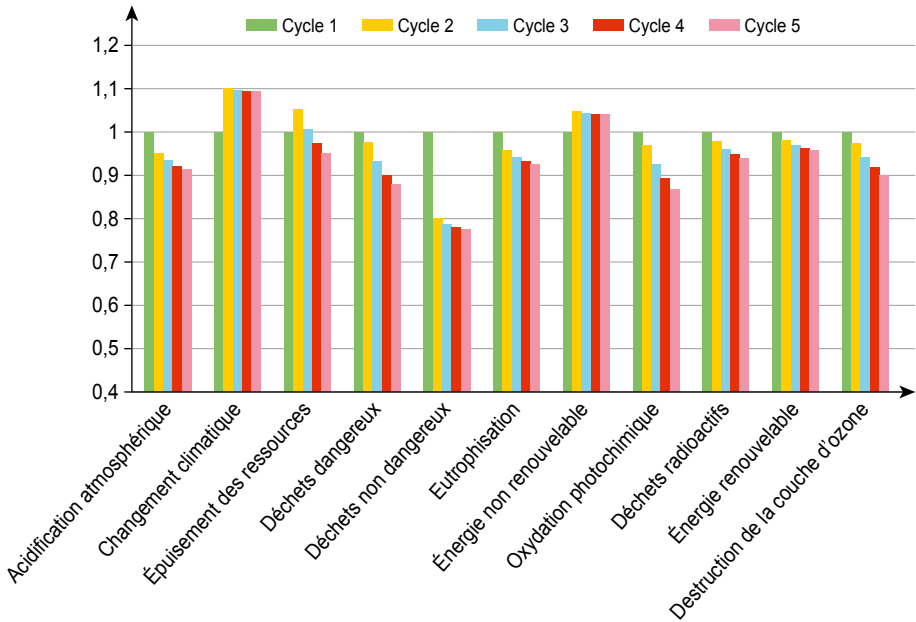
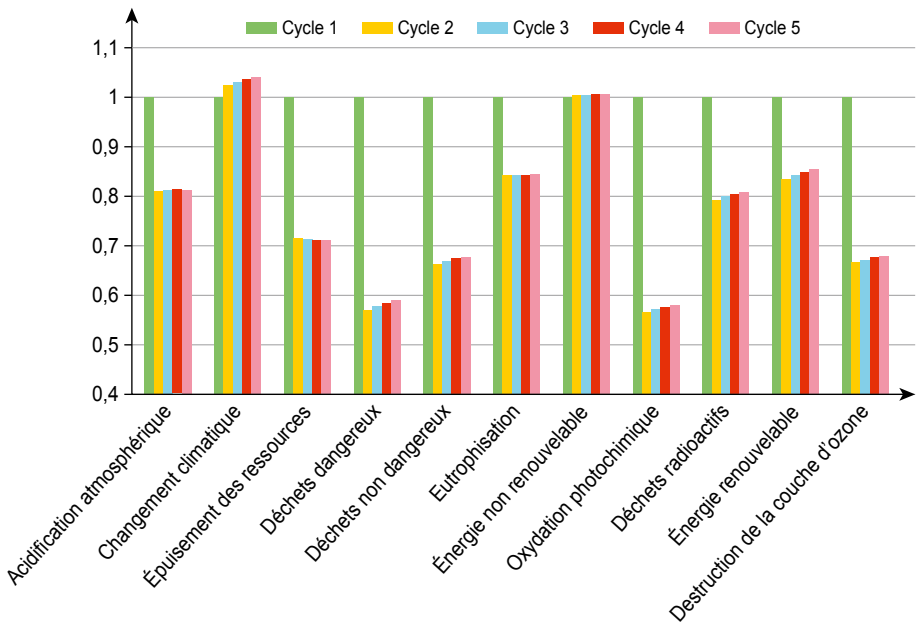


Figure 32.7

Évolution des indicateurs d'impact environnementaux du béton C25/30 100S100G en considérant que les GBR sont produits et utilisés sur le chantier



On suppose enfin que l'utilisation de GBR directement sur chantier devienne une pratique courante. La Figure 32.7 présente les résultats des calculs pour le même béton C25/30 100S100G, mais sans qu'aucun transport ne soit attribué aux GBR. Dans ce cas, le premier recyclage (cycle 2) conduit à une forte diminution de quasiment tous les indicateurs d'impact. Par exemple, les indicateurs de « déchets » et « l'oxydation photochimique » sont réduits jusqu'à 40 %. Au cours des recyclages suivants, les indicateurs ne sont pratiquement plus modifiés. Les indicateurs « changement climatique » et « énergie non renouvelable » font exception, car ils restent quasi-constants avec le nombre de recyclage. Le recyclage sur place afin d'éviter les transports est donc une piste à développer. La situation actuelle se trouve probablement entre les deux cas étudiés (illustrés par les Figures 32.6 et 32.7) : les GBR sont utilisés avec des distances de transport plus faibles que celles des granulats naturels. Les mêmes tendances ont été observées avec les bétons C25/30 0S30G, C55/67 0S30G et C55/67 100S100G.

32.5. Conclusion

L'approche multi-recyclage présentée ici est purement théorique et basée sur des modèles semi-empiriques validés sur deux cycles de recyclage. Elle permet d'étudier différents scénarios de recyclages multiples. Quatre cycles de recyclage ont été simulés dans le cas présent.

Les résultats montrent que la demande en ciment augmente principalement avec le premier recyclage (cycle 2), mais qu'elle reste constante lors des recyclages suivants. Cependant, la quantité totale de pâte (pâte adhérente autour des GBR et nouvelle pâte) croît continûment avec le nombre de recyclages, provoquant l'augmentation de la porosité, de la perméabilité aux gaz et du retrait, et la diminution du module d'élasticité. Ces tendances deviennent alors rapidement critiques, du moins lorsque le taux de substitution est de 100 %, pour la durabilité comme pour la rigidité du matériau. À l'inverse, pour des taux de substitution modérés (un taux de substitution de 30 % des granulats naturels par des GBR a été simulé ici), les propriétés de durabilité changent peu et la résistance à la carbonatation n'augmente que légèrement. Dans ce dernier cas, le multi-recyclage est tout à fait envisageable, même en visant un béton de résistance 65 MPa, à condition toutefois que les GBR soient issus du même type de béton (en termes de résistance à la compression). Cependant, pour parvenir à une économie véritablement circulaire, c'est-à-dire sans production de nouveaux granulats naturels en recyclant à 100 %, il est encore nécessaire de développer des procédés industriels permettant d'améliorer les propriétés des GBR (par exemple, en éliminant la pâte résiduelle des GBR afin de retrouver le plus possible les granulats naturels d'origine, voir chapitre 2).

Dans le cas d'un taux de substitution partiel, mais toutefois conséquent, il est probable qu'après quelques recyclages (2 ou 3), le volume de pâte devienne

trop important. Dans ce cas, d'autres filières de recyclage que celle du béton peuvent être envisagées, comme par exemple le recyclage des sables de GBR dans les fours de cimenterie, comme étudié dans la partie II.

Sur le plan environnemental, le multi-recyclage améliore ou, au minimum, maintient presque constants les indicateurs d'impact par rapport à un seul recyclage. Les simulations confirment également l'intérêt du recyclage des granulats sur chantier pour éliminer l'impact lié au transport.

Chapitre 33.

Discussion : conditions d'un recyclage réussi

*F. Buyle-Bodin¹, S. Decreuse², A. Feraille³,
F. de Larrard⁴, X. Chomik⁵*

Résumé – L'instauration d'une filière de recyclage des anciens bétons dans de nouveaux bétons suit un processus quasi-similaire à celui qui s'applique à d'autres produits industriels. Ce chapitre s'intéresse au béton, c'est-à-dire au matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Malgré cette spécificité, le secteur de la construction reste encore organisé de façon diffuse, avec de nombreux acteurs impliqués. Alors, pour réussir le défi de la préservation de l'environnement, sans compromettre les aspects économiques et sociétaux, une bonne coordination entre les différents intervenants est nécessaire.

L'introduction du présent chapitre replace le processus du recyclage du béton dans la problématique générale de la reconstruction de la ville sur la ville.

L'état de l'art qui suit dresse un panorama des acteurs du recyclage, puis détaille les prises de décisions que chacun doit prendre en la matière.

Les conséquences de l'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR) sur les propriétés du béton sont ensuite rappelées, et les questions suivantes, sous-jacentes au recyclage, sont posées : pour quel type de construction ? pour quel usage ? avec quelle résistance spécifiée au regard des contraintes du projet ? pour quel niveau acceptable de risque ?

Enfin, le problème de la disponibilité de la ressource en GBR est discuté, en termes de distance de transport par rapport au site de production, de type de produits et de qualité. L'environnement juridique et politique est aussi abordé : réglementations, normes et incitations, en France, en Europe et dans le monde. Les relations entre la question globale de l'économie circulaire et les circuits courts sont également analysées.

1. Université de Lille.

2. CEMEX, Rungis.

3. École des Ponts ParisTech, Marne-la-Vallée.

4. LCR, LafargeHolcim, Saint Quentin-Fallavier.

5. Conseil Départemental de Seine-et-Marne (CD77), Melun.

Le dernier paragraphe s'intéresse au cadre décisionnel. Quelles sont les questions à aborder ? Quelles sont les conditions techniques, environnementales et économiques à considérer ?

33.1. Introduction

L'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR) issus de la démolition d'anciens ouvrages pour construire de nouveaux ouvrages est une solution intéressante pour préserver l'environnement. Elle permet de minimiser l'emploi des matériaux naturels et d'éviter la mise en décharge des déchets. De nombreux pays ont réalisé des études sur le sujet et ont fait évoluer leur réglementation en la matière. À présent, il faut aller plus loin dans la protection de l'environnement en minimisant l'impact des transports et en mettant en pratique, sur la zone urbaine concernée, la boucle chronologique suivante : démolir l'ouvrage ; traiter les gravats ; stocker les GBR ; (re)construire de nouveaux ouvrages.

En fait, les taux actuels de réutilisation des granulats recyclés répondent déjà globalement aux attentes environnementales. Cependant, le transport des Déchets de Déconstruction et de Démolition (DCD) jusqu'aux plateformes de recyclage, puis le retour des GBR vers les centrales à béton et les chantiers de construction génèrent des impacts qui ne sont pas suffisamment pris en compte dans les évaluations environnementales. La recherche des circuits (boucles) les plus courts est un aspect que l'on doit aussi considérer.

On doit cependant relativiser les limites de cette démarche. En effet, si le gain financier d'un circuit court est évident, il faut toutefois pouvoir le mettre en œuvre, compte tenu de l'organisation souvent complexe des projets de rénovation urbaine et des intérêts divergents des différents intervenants.

Actuellement, les évolutions en termes de disponibilité des ressources naturelles et des sites de mise en décharge sont favorables au recyclage si les distances de transport sont acceptables tant du point de vue économique qu'écologique.

Enfin, le traitement des produits de démolition est une activité ponctuelle et diffuse, contrairement aux carrières de granulats naturels. Les flux dépendent de la taille et du calendrier des travaux, ainsi que de la nature des chantiers de démolition.

33.2. État de l'art

33.2.1. Écosystème des acteurs du recyclage

Le premier acteur concerné est l'autorité contractante, c'est-à-dire le propriétaire (ou maître de l'ouvrage) de l'opération immobilière. Pour lui, la déconstruction est une perte de temps et d'argent. Il confie en général les opérations à une entreprise spécialisée (entreprise de démolition) qui définit et organise les travaux, et sélectionne les entreprises qui se chargeront de la démolition et de la revente des produits. L'enjeu principal pour le propriétaire est de nettoyer le terrain au plus vite afin d'engager la reconstruction.

L'entreprise de démolition est propriétaire des déchets et elle est responsable de leur gestion. Elle doit veiller aussi au respect des règles concernant la sécurité et la protection de la santé des travailleurs, et la préservation de l'environnement.

La gestion des déchets minéraux inertes peut être traitée selon différentes options :

- une réutilisation directe sur le chantier en tant que remblai, après un simple tri, du moins pour certains déchets ;
- le transport des déchets vers des plateformes de recyclage où ils sont vendus, avec transfert de la responsabilité environnementale à l'acquéreur ;
- le transport des déchets vers des décharges, où ils sont mis en dépôt contre versement de droits.

Pour les deux dernières options, les conditions financières dépendent d'abord de la qualité des déchets après un premier tri (permettant dans le second cas l'acceptation du déchet par l'installation de recyclage et conditionnant son prix et pour le 3^e cas conditionnant la classe de décharge et donc le prix), mais aussi des distances entre chantier de démolition, plateforme de recyclage, et site d'enfouissement. Cela explique pourquoi la localisation des sites de démolition a été prise en compte dans l'analyse du cycle de vie (ACV). En conclusion, le rôle de l'entreprise de démolition et la qualité du tri préliminaire qu'elle opère in situ sont primordiaux.

Le troisième acteur est la société de recyclage. Son rôle est de réceptionner les DCD, de les contrôler/accepter (elle en devient propriétaire), puis de les transformer en matériaux de construction (fin du statut de déchet). Ces matériaux sont ensuite vendus à des entreprises de construction ou à des producteurs de béton (béton prêt à l'emploi ou produits préfabriqués). Cependant, un tri déficient peut conduire à une moindre valorisation des produits sortants, ce qui les destine alors à des applications de faible ou moyenne valeur ajoutée, tels les remblais et les travaux routiers, alors qu'ils pourraient être utilisés pour un usage plus noble dans le béton. Les technologies de tri in situ apparaissent, mais elles restent coûteuses et sans garantie d'amortissement, même à moyen terme. La situation pourrait évoluer si les distances de transport entre les

différents sites sont réduites (installation de recyclage, chantier routier et/ou de bâtiment, installation de production de béton), ce qui, en outre, améliorerait la préservation de l'environnement (voir chapitre 30).

Le dernier acteur est le propriétaire de la nouvelle construction dans laquelle les matériaux recyclés seront utilisés. Il désigne les entreprises qui auront en charge la construction des nouveaux bâtiments, et qui feront le choix des matériaux de construction. Pour elles, l'enjeu principal est de construire au meilleur prix, en respectant les prescriptions techniques.

Pour favoriser le développement de l'économie circulaire, il serait souhaitable que la même entité gère à la fois les travaux de démolition et les travaux de construction. Même si elle délègue certaines tâches aux entreprises et à leurs sous-traitants, elle aurait une vision globale sur l'ensemble de la boucle et pourrait optimiser le coût et les impacts environnementaux. Par exemple, elle pourrait accepter un prix plus élevé pour la démolition, s'il est synonyme d'un meilleur tri. Ensuite, elle pourrait imposer d'utiliser les GBR pour les ouvrages en béton.

Dans certains cas, l'entreprise de construction peut proposer une variante pour le béton, en recourant notamment à des bétons de GBR.

33.2.2. Prise de décision concernant le recyclage

La boucle de décision comprend les intervenants présentés précédemment.

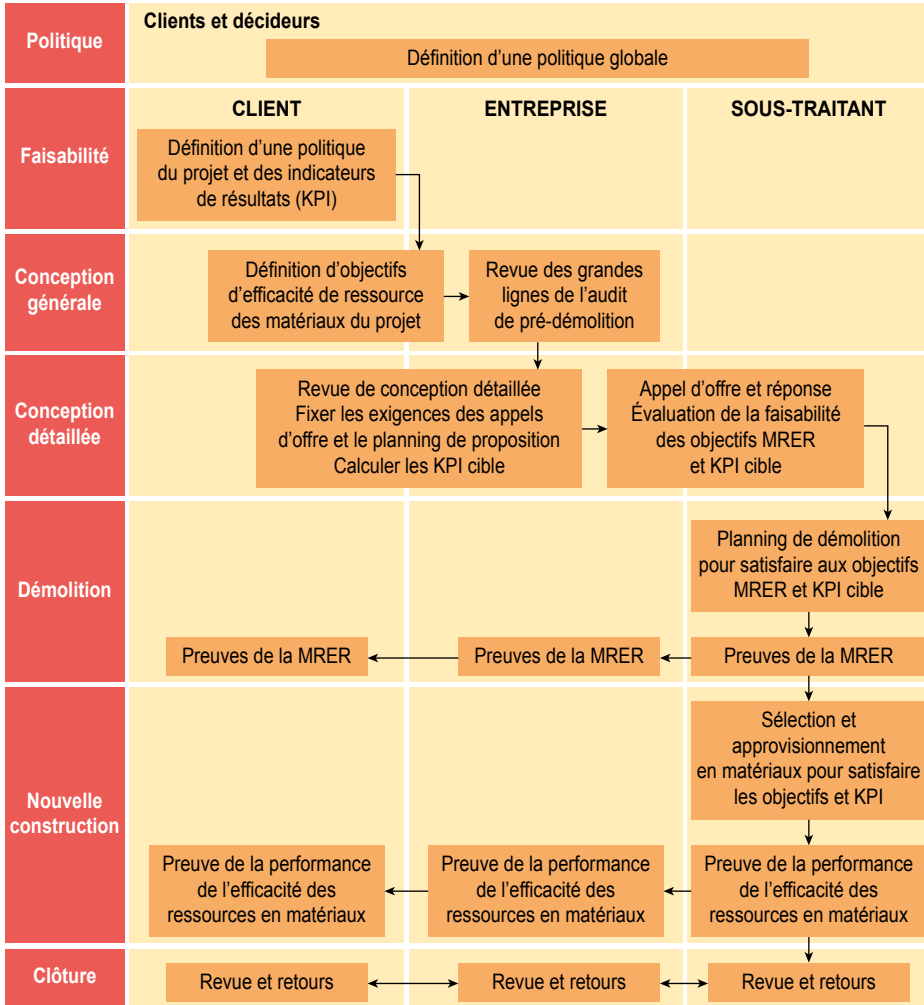
Le maître de l'ouvrage est le principal décideur. Il doit être convaincu des enjeux environnementaux qui pèsent sur le secteur de la construction, en matière de pénurie des ressources non renouvelables et d'augmentation des flux de déchets. Différents guides et outils, rédigés par les collectivités et les services environnementaux peuvent l'aider dans sa prise de décision.

L'entreprise de démolition doit convaincre le maître de l'ouvrage de la nécessité de réaliser des travaux de démolition de qualité, conduisant au tri des déchets, et tenant compte du contexte industriel territorial (site de démolition, plateforme de recyclage, dépôts). Des sous-traitants spécialisés peuvent l'accompagner. Son action doit aboutir à une meilleure qualité de la boucle jusqu'à la production des GBR. À ce stade, des guides professionnels peuvent apporter des aides, comme par exemple celui qui résultera du Projet National RECYBETON.

L'entreprise de construction doit convaincre à son tour le maître de l'ouvrage de la nécessité d'utiliser des bétons de GBR pour construire son nouvel ouvrage. Avec son accord, elle pourra prescrire des bétons de GBR pour différentes parties de la construction. Bien entendu, elle doit prendre également en compte les conditions territoriales de l'organisation industrielle (plateforme de recyclage, carrières de granulats naturels et centrales à béton). Des sous-traitants spécialisés et des producteurs de matériaux peuvent l'accompagner. C'est évidemment dans cette partie de la boucle que les guides professionnels sont très utiles.

Figure 33.1

Tableau donnant un aperçu simplifié du processus et des actions à entreprendre par les différents acteurs [Guide WRAP], IPC : Indicateurs de performance clés. ERMR : Efficacité des ressources en matériaux dans la régénération



33.3. Rappels

Ce paragraphe résume les principales caractéristiques des bétons de GBR étudiés dans les parties III à VI de ce livre. On s'intéresse ici au recyclage des GBR en tant que granulats destinés à de nouveaux bétons, et non en tant qu'incorporation dans le ciment (le ciment recyclé est encore peu usité). En outre, l'utilisation de ciment recyclé n'entraîne *a priori* pas de changements particuliers des propriétés du béton, comme indiqué dans la partie II.

Pour produire un béton de GBR, la première difficulté est de devoir utiliser un constituant supplémentaire, c'est-à-dire une ou plusieurs coupures de GBR mélangées aux granulats naturels le plus souvent. Dans la plupart des cas, ce nouveau matériau n'est pas traçable et nécessite un plan de contrôle qualité approprié pour assurer que sa teneur en polluants reste en deçà des seuils normalisés. Étant beaucoup plus poreux que les granulats naturels, les GBR doivent être humidifiés préalablement à leur incorporation dans le béton, à l'aide par exemple d'un système d'aspersion adapté. Le but est d'éviter une importante succion de l'eau de fabrication pendant et juste après la fabrication du béton. Par ailleurs, la mise au point d'une formule de béton de GBR viable nécessite la réalisation d'un certain nombre de gâchées d'essai avant de passer à la production industrielle, car il ne s'agit pas « simplement » de substituer une partie des granulats naturels d'une formule existante par des GBR, même si les propriétés du béton sont peu modifiées avec un taux de substitution faible (< 20 % de gravillons).

Pour une maniabilité initiale et une résistance à la compression à 28 jours données, le béton de GBR diffère du béton traditionnel par un certain nombre d'aspects. Avec l'augmentation graduelle du taux de substitution des gravillons, et en remplaçant partiellement ou totalement le sable :

- le dosage en ciment reste tout d'abord constant (faible taux de substitution) puis augmente sensiblement. Lorsque l'augmentation est substantielle, le bilan carbone du béton de GBR est affecté, mais il peut être atténué si les distances de transport des granulats sont courtes ;
- le maintien de l'affaissement dans le temps est un paramètre à surveiller, et il faut souvent utiliser un retardateur pour éviter une prise trop rapide. Ces modifications apparaissent généralement si un sable de GBR est utilisé, même si tous les GBR sont entièrement saturés au préalable ;
- les surfaces horizontales doivent être protégées autant que possible de la dessiccation (cure), en raison du risque plus élevé de retrait plastique ;
- l'évolution de la résistance à la traction doit être vérifiée si cette propriété est critique dans l'application envisagée ;
- le module d'élasticité diminue de façon significative (jusqu'à 30 %) à mesure que le retrait de dessiccation augmente (jusqu'à 100 %). Les déformations de fluage peuvent alors doubler, voire plus. Toutefois, le risque de fissuration par retrait empêché n'est pas augmenté, sauf pour les taux de substitution très élevés ;
- la résistance à la fatigue en flexion est légèrement dégradée ;

- le matériau durci est plus poreux, car plus riche en pâte de ciment. Par conséquent, les transferts, liquides ou gazeux, sont facilités. Cependant, le processus de carbonatation n'est pas réellement amplifié, ce qui est plutôt favorable car il s'agit du risque le plus critique dans la majorité des applications, selon les classes d'exposition ;
- enfin, lorsqu'un béton architectonique est requis, l'aspect de surface du béton peut révéler sa composition interne, dont notamment la présence de polluants. Cependant, ces « défauts » peuvent être appréciés par les architectes qui souhaitent mettre en valeur la vie antérieure de leurs matériaux de construction.

33.4. Questions préalables

33.4.1. Type de construction et parties en béton

Il s'agit d'une revue des différents domaines de la construction où l'utilisation des bétons de GBR peut être envisagée.

33.4.1.1. Usages

Les deux principaux secteurs du marché du béton sont le bâtiment et les travaux de génie civil.

En ce qui concerne le bâtiment, le béton peut être soit coulé en place sur chantier, soit utilisé en préfabrication (en usine ou sur chantier). Dans le premier cas, les bétons de GBR conviennent parfaitement pour les voiles intérieurs car ils seront généralement revêtus, non exposés à un environnement agressif et non critiques en termes de déformations différées (sauf pour les immeubles de grande hauteur). L'usage des bétons de GBR peut aussi être étendu aux ouvrages horizontaux (poutres, dalles, terrasses), du moins si leur portée reste limitée, de sorte que la flèche, qui dépend de l'élasticité du béton, n'engendre pas l'augmentation de l'épaisseur des sections. Les bétons de GBR peuvent convenir également pour les fondations, du moins si le sol ne contient pas d'éléments chimiques agressifs (sulfates par exemple). Cependant, les GBR peuvent contenir des ciments anciens non résistants aux sulfates. Si le nouveau ciment satisfait à cette exigence, le béton de GBR aura en principe un comportement satisfaisant. Néanmoins, une vérification par des essais appropriés est recommandée. En ce qui concerne l'enveloppe exposée des bâtiments (murs extérieurs, tuiles), selon le climat local, la question du gel/dégel doit être examinée, car les GBR sont rarement résistants au gel.

Les bétons utilisés pour la préfabrication peuvent être séparés en bétons courants, bétons armés et bétons précontraints. Les blocs de maçonnerie constituent un débouché intéressant pour les GBR, même si le procédé de fabrication basé sur un démoulage immédiat nécessite un contrôle précis de la teneur en eau du béton, ce qui peut être problématique avec les GBR de porosité variable. Le cas des éléments précontraints, tels les poutres

préfabriquées, soulève la question du fluage plus élevé du béton de GBR. Dans certains pays (dont la France), les bétons de GBR sont interdits pour de tels usages. Pour le moins, il faut tenir compte des pertes de précontrainte et des contre-flèches plus élevées.

L'utilisation du béton de GBR dans différents travaux de génie civil peut être envisagée. Pour les couches supérieures des routes et des aérodromes, il a été montré au Chapitre 11 que lorsque le dimensionnement des chaussées est basé sur la fatigue, comme en France, l'hétérogénéité et la faible résistance à la fatigue des bétons de GBR conduisent à limiter le taux de substitution. Dans d'autres pays, comme aux États-Unis, le béton de GBR est largement utilisé dans toutes les couches des chaussées. Mais, en tout état de cause, les granulats recyclés trouvent un usage privilégié dans les bétons maigres des couches plus profondes de fondation et de base, comme par exemple dans les autoroutes allemandes. Un recyclage en circuit court peut alors être pratiqué, en réutilisant sur le chantier de la nouvelle chaussée les matériaux générés par la déconstruction de l'ancienne chaussée. Les parkings, les chemins piétonniers, les matériaux de remplissage des tranchées sont d'autres applications où les granulats recyclés peuvent trouver un usage. Ici encore, un recyclage direct à partir de la structure d'origine est facile à organiser, avec l'avantage d'une bonne traçabilité des constituants.

Les ponts en béton armé de portée limitée sont aussi des ouvrages où les bétons de GBR peuvent être utilisés (voir chapitre 23). Le cas des tunnels mérite également d'être considéré, sous réserve de prendre en compte le risque d'attaque sulfatique, comme déjà évoqué pour les bétons de fondations. Pour les tunnels coulés en place, un taux limité de GBR dans le béton ne devrait *a priori* pas engendrer de fissuration, car il s'agit d'un contexte similaire à celui du dallage sur terre-plein présenté au Chapitre 22. Pour les tunnels, les roches excavées peuvent aussi servir de matériau alternatif intéressant, mais on s'écarte ici du sujet du présent ouvrage.

Les barrages sont d'autres ouvrages de génie civil qui consomment de grandes quantités de béton. Le principal problème est celui de la chaleur d'hydratation et de la fissuration thermique associée. Mais il est démontré que le recyclage à un taux réduit n'entraîne pas de surdosage en liant. De plus, l'augmentation de la relaxation, qui accompagne l'augmentation du fluage induit par la présence des GBR, réduit le risque de fissuration thermique. C'est même un rare cas où le béton de GBR présente de meilleures propriétés que le béton traditionnel. Le seul problème réside dans la faible probabilité de trouver une source de GBR à proximité des barrages (ils sont généralement construits loin des villes, dans des régions peu peuplées). Cependant, la rénovation partielle d'un barrage existant peut offrir la possibilité de réutiliser localement le béton démolé. Dans tous les cas, le risque de RAS (réaction alcalis-silice) doit être appréhendé selon les dispositions normatives en vigueur. Les mêmes considérations s'appliquent à d'autres applications où des bétons de masse sont utilisés.

Les applications maritimes demandent des précautions particulières. Comme indiqué précédemment, la substitution d'une partie des granulats naturels par

des granulats recyclés provoque toujours une altération des propriétés de transfert, dont la diffusion des ions chlorure. Par conséquent, pour un béton de GBR de même résistance qu'un béton de granulats naturels, il faudra s'intéresser au maintien des autres propriétés du béton, à la couverture des aciers et à la durée de vie de l'ouvrage. Dans certains cas, les coefficients de sécurité qui s'appliquent au dimensionnement traditionnel pourront être simplement réduit en fonction du taux de substitution pratiqué. Dans d'autres cas, les dispositions classiques en matière de durabilité – dosage minimum de ciment, rapport eau/ciment maximum – devront être modifiées (voir chapitres 12 et 34). Une approche performantielle de durabilité pourra aussi être mise en œuvre.

33.4.1.2. Résistance spécifiée

On entend souvent dire que les bétons de GBR ne peuvent être que des bétons de faible résistance. Cependant, cette affirmation est démentie par l'expérience. Par exemple, Dao et ses collègues ont recyclé entièrement une dalle d'aéroport pour laquelle le nouveau béton avait une résistance à la compression de 62 MPa [Dao, 2012]. [Sedran *et al.*, 2010] ont obtenu un nouveau BFUP (béton fibré ultra-haute performance) à partir d'un BFUP entièrement concassé.

[Dao, 2012] a montré que, pour un taux de substitution donné, la diminution relative de la résistance à la compression se réduit avec le niveau de résistance initial du béton parent. En d'autres termes, on peut produire un béton de GBR de haute résistance à partir d'un béton d'origine de moyenne résistance, mais au prix d'un dosage en ciment plus élevé, ce qui n'est pas le cas si le béton d'origine est de même résistance que le béton visé. Par conséquent, plus la résistance spécifiée est faible, plus le processus de recyclage sera facile. Mais, dans certains cas, il pourra être intéressant de produire un béton de GBR à hautes performances.

33.4.1.3. Conditions du chantier

La réussite d'un béton de GBR nécessite la réunion de certaines conditions pratiques, à savoir :

- la disponibilité d'une source de GBR à une faible distance du lieu de production du béton (moins de 25 km par exemple). Cette source peut être fixe (plateforme de recyclage) ou temporaire (chantier de démolition avec un concasseur mobile). Dans tous les cas, elle doit être gérée par des professionnels compétents et expérimentés, capables de proposer un plan d'assurance qualité crédible (voir chapitre 28) ;
- la disponibilité de trémies et d'équipements pour stocker les GBR sur le lieu de production du béton. Très souvent, en particulier en milieu urbain, cette contrainte est un véritable obstacle. Le producteur doit alors investir dans des installations connexes, mais il peut être réticent à le faire si le marché du béton de GBR n'est pas encore viable ;
- la prise en compte du climat local. En principe, là où l'on peut faire du béton, on doit pouvoir faire aussi du béton de GBR. Cependant, dans une zone donnée, tous les bétons ne contiennent pas d'air entraîné, et les GBR qui

en découlent peuvent être sensibles au gel, même modéré. Dans les climats secs, la nécessité d'une cure soignée est renforcée en présence des GBR ;

- le facteur humain. Tant que le recyclage du béton dans le béton n'est pas devenu une pratique courante, le processus doit encore passer par la sensibilisation, la compétence et l'acceptation de tous les intervenants, à savoir le producteur de GBR, le bureau d'études, le fabricant du béton, l'entrepreneur, le maître d'œuvre et le contrôleur des travaux, sans oublier le maître de l'ouvrage. Le présent livre peut, nous l'espérons, aider à atteindre un tel objectif.

33.4.1.4. Niveau de risque acceptable au regard de l'application

Le recyclage est un devoir moral, mais la qualité et la pérennité de la construction en sont deux autres. Des normes ont été édictées afin de garantir que la sélection des matériaux, la production et la mise en œuvre du béton soient effectuées avec un niveau de risque acceptable. Cependant, le fait d'utiliser un constituant d'origine inconnue augmente la probabilité de désordres imprévus. Alors, si des bétons de GBR sont envisagés, il paraît raisonnable de les exclure des champs d'application suivants ou du moins de mener une analyse critique de leur utilisation :

- lorsqu'une durée de vie exceptionnelle est requise pour le béton. Il s'agit par exemple du cas des conteneurs en béton destinés au stockage des déchets nucléaires, conçus pour durer plusieurs siècles ;
- lorsque l'entretien ou les réparations sont complexes ou très coûteuses : immeubles de grande hauteur, ponts de grande portée, etc. ;
- lorsque les interruptions de service ont des impacts et des coûts sociétaux élevés : ponts en zones urbaines, autoroutes à fort trafic, tunnels de métro très fréquentés, etc. ;
- lorsque le parement des bétons est un critère esthétique essentiel pour le propriétaire ou pour l'image de la ville.

Heureusement, ces cas ne représentent qu'une faible partie des nombreuses possibilités d'utiliser des bétons de GBR dans la construction.

33.4.2. Ressource en granulats de béton recyclé

Afin de développer l'utilisation des GBR dans le béton, il est nécessaire de disposer de ressources de bonne qualité (régularité des caractéristiques, pureté de la ressource, etc.). Il est également nécessaire que la ressource soit disponible à proximité du ou des endroits où elle sera utilisée (unités de production de béton), afin de minimiser les coûts de transport. Enfin, il faut que les quantités de GBR soient suffisantes pour que le producteur de béton puisse en disposer quand il en a besoin.

33.4.2.1. Disponibilité vs distance pour la production du béton

Dans le cadre du Projet National RECYBETON, [Mongear et Dross, 2016] se sont intéressés aux installations de recyclage et à leur répartition sur le territoire

national. L'étude a été réalisée sur les douze plus grandes villes de France où les quantités de DCD ont permis de développer de ce secteur d'activité.

Les distances entre les unités de production des granulats (naturels et GBR) et les unités de production des bétons (béton prêt à l'emploi et béton préfabriqué) ont été analysées. Dans chaque ville, les distances les plus courtes sont en faveur des GBR. Cependant, l'étude a comptabilisé tous les sites de collecte, dont ceux qui ne produisent actuellement pas de GBR, etc. Il faut noter aussi que même si certains sites de production de granulats recyclés sont proches des unités de production de bétons, ils ne proposent pas toujours des GBR de qualité suffisante pour pouvoir être utilisés dans le béton.

Figure 33.2

Distances moyennes entre les centrales de béton prêt à l'emploi et les sources de granulats

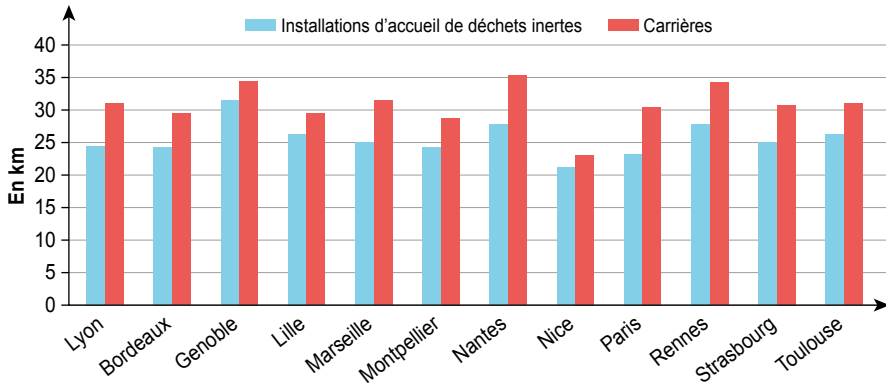
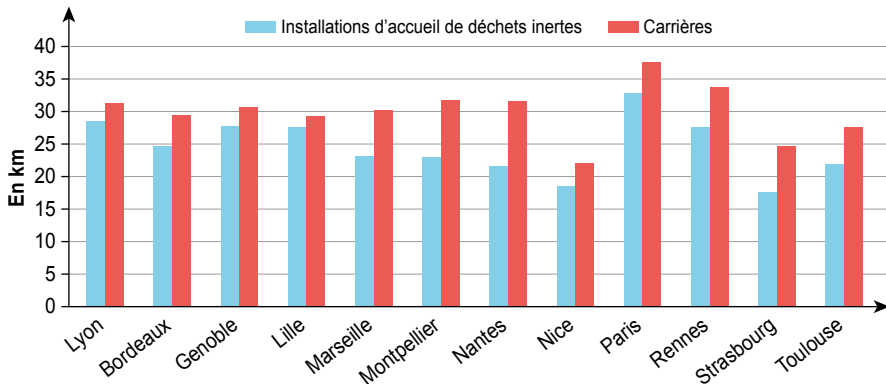


Figure 33.3

Distance moyenne entre les usines de produits préfabriqués en béton et les sources de granulats



33.4.2.1. Type de produits

Les types de DCD qui peuvent être recyclés dans le béton sont :

- les matériaux de démolition sélectionnés (qui comprennent principalement du béton – la pureté devrait être de 95 % de béton et de matériaux pierreux afin de maximiser leur réutilisation dans un nouveau béton, mais 90 % et 70 % sont également possibles, pour des granulats destinés à quelques bétons utilisés en environnement X0) ;
- les retours de bétons. Cette source représente 3 à 5 % des bétons livrés. Elle est particulièrement intéressante car elle n'est pas contaminée par des espèces indésirables comme le plâtre.

Les GBR obtenus à partir de ces deux sources peuvent être livrés séparément sous forme de sable de GBR et de gravillons de GBR. Ils peuvent également être livrés sous forme de prémélanges de GBR et de granulats naturels (selon les habitudes locales). Ces prémélanges peuvent être réalisés à la carrière de granulats naturels ou sur la plateforme de recyclage (en optimisant le fret retour).

33.4.2.2. Qualité des ressources disponibles

Le Projet National RECYBETON a étudié la qualité des ressources en GBR. La variabilité des caractéristiques des GBR produits sur seize plateformes de recyclage (un essai représentatif par coupure) a été étudiée et la production de deux plateformes de recyclage a été suivie sur deux ans (voir chapitre 29).

La qualité des GBR issus de ces plateformes (dont la production n'était pas initialement destinée au marché des granulats à béton, mais plutôt à celui de la route) était encore majoritairement (55 %) non adaptée à une utilisation dans le béton. Les caractéristiques incriminées étaient le plus souvent :

- la teneur en sulfates solubles, déterminée selon le paragraphe 10.2 de la norme [NF EN 1744-1,2014]. Elle est directement liée à la présence de plâtre et elle peut être améliorée par un meilleur tri et un lavage des granulats ;
- la classification des GBR, déterminée selon la norme [NF EN 933-11, 2009], avec en particulier la teneur en matériaux flottant (plastiques, bois, etc.). Comme précédemment, elle peut être améliorée par un meilleur tri et un lavage des granulats ;
- l'absorption d'eau des GBR, déterminée selon la norme [NF EN 1097-6, 2014]. C'est la variation de cette caractéristique qui est problématique (ce paramètre a un impact direct sur le rapport eau totale/ciment du béton et donc sur la durabilité du matériau). Les différentes études, en particulier sur les prémélanges de granulats naturels et de GBR, montrent que l'influence de ce paramètre reste modérée si le taux de substitution reste faible. Le tri de certains types de DCD avant leur introduction dans l'installation de recyclage a également une influence, car certains constituants, tels les briques, ont une absorption d'eau élevée.

En tenant compte de ces paramètres, l'évaluation de la ressource potentielle en GBR pouvant être utilisés dans l'industrie du béton s'établit à 39 Mt.

Tableau 33.1

Ressources potentielles en matériaux recyclés pour la fabrication du béton
[Mongear et Dross, 2016]

Déchets inertes	Quantité totale de déchets générés (M tonnes et %)		Ressources potentielles pour l'utilisation dans le béton (% de valorisation potentielle et M tonnes)	
	M tonnes	%	%	M tonnes
Sol non pollué et pierres	140	61 %		
Mélange de déchets inertes	31	14 %	30 %	9
Autres matériaux provenant de la démolition de routes et de matériaux rocheux	25	11 %	75 %	19
Mélanges bitumineux ne contenant pas de goudron	13	6 %		
Béton	18	7 %	60 %	11
Briques, tuiles, céramique et ardoise	2	1 %		
Autres déchets inertes	2	1 %		
Total	231			39

33.4.3. Environnement juridique et politique

33.4.3.1. Normes, règlements, mesures incitatives

Le Projet National RECYBETON a réalisé une analyse des différentes normes et des règlements régissant l'utilisation des GBR dans les bétons structuraux et les produits en béton (voir chapitre 34), en distinguant les textes dédiés aux produits, au dimensionnement des structures et à l'exécution des travaux.

Les normes concernent :

- les matériaux : spécifications et normes d'essai ;
- les règles de dimensionnement des constructions en béton armé ou précontraint : Eurocodes, code modèle FIB ;
- les règles d'exécution : normes européennes et françaises, par exemple DTU, etc.

Les codes législatifs et les règlements ont été examinés en portant un regard attentif aux obstacles concernant le réemploi des granulats recyclés. Enfin, certains textes issus d'initiatives locales, dédiés à la mise en œuvre de la réglementation, tels les guides, ont mis en évidence une forte utilisation des granulats recyclés dans l'ingénierie routière.

Cette analyse des textes français a révélé les forces et les faiblesses des textes actuels quant à l'utilisation des GBR dans le béton. Elle montre que leur emploi obéit à la philosophie générale suivante :

- caractérisation de leur qualité en tenant compte de la variabilité des propriétés (classification, absorption d'eau, résistance au gel-dégel, etc.) ;
- incorporation à des taux modérés dans les bétons structuraux.

Le Projet National RECYBETON s'est aussi intéressé aux normes, règlements et documents d'orientation en vigueur dans d'autres pays. En Europe, treize pays disposent de textes prévoyant l'utilisation des GBR dans le béton, dont les Pays-Bas, l'Allemagne, l'Autriche et le Royaume-Uni qui pratiquent le recyclage depuis plusieurs années. En dehors de l'Europe, sept pays ont été recensés comme pratiquant le recyclage des bétons dans le béton, dont le Japon, la Chine, les États-Unis et le Canada. L'analyse des textes étrangers montre que l'utilisation des granulats recyclés obéit généralement à la philosophie suivante :

- applications traditionnelles en techniques routières où l'utilisation des granulats recyclés est bien contrôlée ;
- caractérisation de leurs performances (niveaux de valeur et variabilité) ;
- différence très marquée entre gravillons et sables recyclés avec, pour ces derniers, des limitations de leur utilisation dans les bétons structuraux où les risques sont plus élevés.

Une forte disparité entre les différents pays concernant le taux d'incorporation des gravillons de GBR dans les bétons structuraux a été constatée. La plupart imposent des limites alors que d'autres autorisent des taux allant jusqu'à 100 % (par exemple les Pays-Bas, la Suisse, le Japon et la Chine). Toutefois, une telle autorisation est conditionnée à une garantie de traçabilité et à des contrôles supplémentaires. Certains pays ont introduit des coefficients dans le calcul du module d'élasticité, du retrait ou du fluage des bétons lorsque des gravillons de GBR sont utilisés (par exemple, les Pays-Bas, la Suisse et l'Espagne).

À l'exception de la Suisse et de la Norvège, les autres pays interdisent l'utilisation des GBR dans les éléments en béton précontraint.

Concernant les aspects environnementaux, certains pays (par exemple l'Autriche, l'Allemagne et les Pays-Bas) ont développé des essais pour contrôler le relargage de substances dangereuses (par exemple métaux lourds).

33.4.3.2. Position des autorités nationales/locales – Label vert

Parmi les labels et certifications consacrés à la durabilité des constructions, trois d'entre eux promeuvent réellement l'utilisation des GBR. Ils sont détaillés dans le chapitre 35.

Le premier est le label espagnol « VERDE » attribué par le « Green Building Council of Spain » et qui spécifie l'utilisation de GBR à l'échelle régionale, l'Institut du bâtiment de Valence a créé un « Perfil de Calidad » (Profil de

qualité) ou PdC, dans lequel existe un critère spécifique promouvant les bétons de GBR de résistance n'excédant pas 40 N/mm^2 . Ce critère donne 4 points au béton de GBR parmi les 40 points nécessaires pour l'obtention du label PdC.

Le deuxième est le label « MINERGIE ECO® », créé en Suisse en 2006. L'utilisation du béton de GBR induit automatiquement un bénéfice, du moins s'il représente au moins 50 % des volumes. Bien qu'aucune étude statistique n'ait établi un lien entre l'apparition de ce label et l'évolution du marché des GBR, [Bougrain *et al.*, 2017] ont noté que l'offre de GBR avait sensiblement augmentée depuis l'apparition de ce label, avec des utilisations à plus forte valeur ajoutée. Ainsi, les bétons de GBR sont maintenant utilisés dans les éléments porteurs des constructions. Les maîtres d'ouvrage publics ont adhéré à ce label. Le canton de Vaud a joué un rôle particulièrement important dans le développement du marché. À Zurich, la part de béton de GBR augmente régulièrement et représente aujourd'hui environ 10 % des bétons consommés. En particulier, l'office des bâtiments de la ville a convenu avec les maîtres d'œuvre et les entreprises locales que tous les nouveaux bâtiments incorporeraient du béton de GBR. Le projet de quartier « Werdwies » à Zurich est exemplaire puisque le béton de GBR a été utilisé pour les sous-sols, les dalles (dont certaines de grandes portées), et les voiles en rez-de-chaussée.

Le troisième est le label britannique « BREEAM » (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method) [BREEAM, 2016], qui promeut l'utilisation des GBR à partir de crédits accordés dans les rubriques « Matériaux » et « Déchets ». Dans la rubrique « Déchets », il s'agit d'encourager tout d'abord la gestion durable des chantiers de construction, en réutilisant les déchets de construction. Dans la même rubrique, des crédits peuvent être obtenus en fonction du pourcentage de granulats recyclés ou secondaires⁶ produits, par rapport aux objectifs fixés. Dans la section « Matériaux », un crédit est obtenu si au moins 25 % des granulats de haute qualité utilisés sont issus de granulats secondaires ou de GBR.

Pour toutes les autres certifications, les recommandations concernant l'utilisation des GBR dans le béton, lorsqu'elles existent, imposent d'évaluer les impacts environnementaux des matériaux, et de les réduire, sans que des seuils spécifiques soient toutefois toujours imposés.

Le béton de GBR n'est pas encore beaucoup utilisé. La création de labels basés sur des seuils minimaux d'incorporation de GBR dans le béton a permis d'améliorer la situation. Mais c'est toujours le propriétaire du projet qui tient le rôle le plus important.

6. Sous-produits issus de procédés industriels qui peuvent être transformés en granulats secondaires. Les granulats secondaires sont subdivisés en granulats fabriqués et naturels, selon leur source.

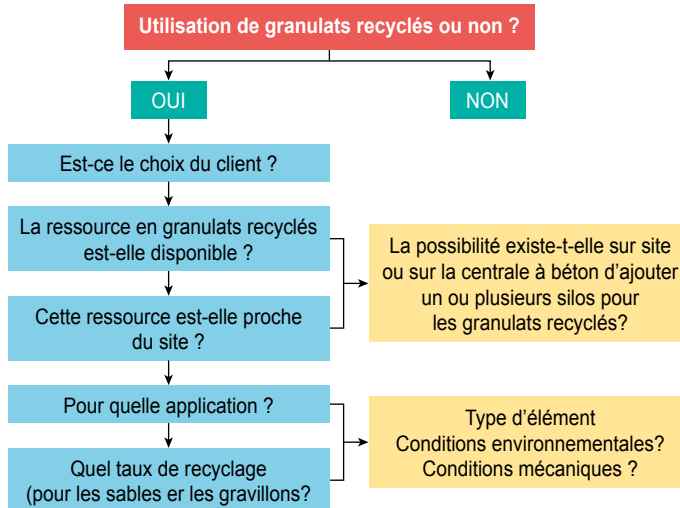
33.5. Prise de décision

33.5.1. Questions à aborder

Dans un contexte de plus en plus contraint en termes de développement durable et d'économie circulaire, il est nécessaire de s'intéresser à la fin de vie du béton. La directive européenne [Directive 2008/98/CE, 2008] a fixé les priorités en matière de prévention et de gestion des déchets. Ainsi, il est demandé de prévenir leur production, de les réutiliser, de les recycler et enfin de les valoriser, y compris l'énergie. La question est alors de savoir à partir de quand il est intéressant de recycler les GBR dans le béton et dans quelles proportions ?

Figure 33.4

Questions à aborder pour la prise de décision



33.5.2. Conditions techniques

Le maître de l'ouvrage s'entoure d'experts qui vérifient la conformité du bâtiment au regard de la réglementation et du programme de l'opération. Cependant, au stade actuel, nombre d'entre eux connaissent peu les bétons de GBR. Il faut alors prévoir plus de temps pour étudier une option utilisant des bétons de GBR, comparativement à l'utilisation de bétons traditionnels.

Il appartient au maître d'œuvre de définir les classes d'exposition du bâtiment et d'indiquer les caractéristiques mécaniques, physiques et esthétiques attendues des matériaux, et de vérifier si les produits finis sont conformes aux exigences.

Si le choix d'utiliser des GBR est retenu par l'entrepreneur, le fournisseur de granulats doit indiquer leur composition et s'assurer qu'ils ne contiennent pas de polluants (plastiques, plâtre/chaux, amiante, etc.).

Le fournisseur du béton doit définir les formulations, les valider et effectuer les essais de conformité, afin de garantir les caractéristiques physiques et mécaniques annoncées. Ce travail nécessite du temps qu'il faut prendre en compte dans la planification de l'exécution. Enfin, le bureau d'études est tenu d'établir les notes de calcul en fonction des caractéristiques annoncées par le fournisseur du béton et non les valeurs par défaut des logiciels ou abaques. Il doit garantir une mise en œuvre conforme aux règles de l'art et effectuer les contrôles sur les matériaux.

Le contrôleur technique doit certifier la conformité de la mise en œuvre des matériaux au regard de la réglementation et des avis techniques, et être sensibilisé à ce nouveau matériau.

L'assureur ne garantit le bâtiment que s'il est conforme à la réglementation et si les produits mis en œuvre sont conformes aux agréments techniques. Cela implique que les interlocuteurs précédents se soient assurés de la conformité réglementaire et de sa mise en place.

Pour les bétons courants, les caractéristiques souhaitées sont faciles à atteindre car elles résultent de formulations classiques et reproductibles qui satisfont les classes de résistance habituelles. Mais ce n'est pas le cas pour les bétons de GBR pour lesquels certaines caractéristiques sont inférieures à celles d'un béton conventionnel comparable, selon le type et de la quantité de GBR incorporés dans le béton. Pour utiliser un béton de GBR il faut donc : définir les caractéristiques mécaniques, physico-chimiques et esthétiques visées et adaptées à l'usage ; définir une formulation adéquate permettant d'atteindre ces caractéristiques ; prouver que ces caractéristiques ont été atteintes.

Le succès dépend alors des quatre intervenants suivants qui contrôlent les points mentionnés ci-dessus :

- le maître d'œuvre, qui doit avoir la volonté d'utiliser ce produit innovant et être capable de définir les propriétés réellement nécessaires pour faire ni sur-qualité, ni le choix de critères inadéquats ;
- le fournisseur de GBR, qui doit garantir son procédé de fabrication et autant que possible la régularité et la qualité de ses granulats (par exemple, même chantier de démolition, pas de polluants) ;
- le fabricant de béton qui doit avoir l'expertise pour formuler le béton de GBR et expliquer les différences par rapport à un béton traditionnel équivalent ;
- le bureau de contrôle, qui est accrédité pour certifier la conformité technique et réglementaire. Cet organisme doit connaître la technologie et être capable d'en vérifier les paramètres (non classiques).

33.5.3. Conditions environnementales

En général, on considère intuitivement que l'utilisation de GBR dans le béton est une « meilleure » solution que d'utiliser des granulats naturels. Cependant, cet « *a priori* » doit être argumenté et prouvé. Pour les aspects environnementaux, l'outil utilisé est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), présentée Chapitre 30. La méthode est basée sur l'évaluation d'indicateurs d'impacts environnementaux propres au projet, tels le changement climatique, l'épuisement abiotique des ressources, la consommation d'énergie, les déchets dangereux, etc. Le chapitre 30 donne une application de cette méthode au cas du chantier expérimental de Chaponost (à proximité de Lyon). Elle a aussi été utilisée pour une étude paramétrique relative aux distances de transport. Il en résulte que l'utilisation de GBR pour la fabrication d'un nouveau béton n'a d'effets positifs que si le dosage en ciment reste constant, sinon l'impact environnemental et le coût sont augmentés. La solution réside alors en un équilibre entre la teneur en GBR et en ciment, et les distances de transport entre les sites de démolition, de recyclage et de dépôt.

Étonnamment, l'ACV ne montre pas de grandes différences entre béton de GBR et bétons granulats naturels. Ceci s'explique notamment par le fait que les bases de données utilisées ne font pas de réelles différences entre les deux types de granulats. Dans ces conditions, l'ACV n'apparaît donc pas comme étant la méthode la plus pertinente pour évaluer l'intérêt de l'utilisation des GBR. Il faudrait probablement « l'interfacer » avec des critères propres aux praticiens qui mettent en œuvre le béton sur le chantier. Elle pourrait aussi être amendée par d'autres indicateurs tels que « tonnes de granulats non extraites du sol », ou par des impacts évités tels que « non-extraction de matériaux non renouvelables », ou encore « non mise en décharge de déchets », comme proposé dans le chapitre 30.

33.5.4. Conjoncture économique

À l'échelle d'un bâtiment, les travaux de structure représentent un tiers du coût total, et la part de main-d'œuvre et des machines représente l'essentiel de ce coût, par rapport à celui des matériaux. Comme les offres techniques et financières sont basées sur le prix des natures d'ouvrages, sans détailler le coût des matériaux, la différence entre une solution béton de GBR et béton conventionnel n'est pas facilement détectable dans une offre, sauf si elle fait l'objet d'une variante bien identifiée.

L'utilisation de matériaux recyclés est donc essentiellement basée sur la volonté politique ou stratégique du maître de l'ouvrage. Elle peut être encouragée par des certifications environnementales proposées par les services publics ou les entreprises privées. L'état, *via* la réglementation environnementale concrétisée par exemple par des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), souhaite également limiter la mise en décharge des

déchets, en proposant des solutions pour les valoriser par exemple dans des remblais. Un surcoût modéré pour le recyclage des déchets est alors le prix à payer, en contrepartie d'une diminution de leur production ou de la non-consommation des matériaux naturels.

33.6. Favoriser l'économie circulaire par une approche globale

L'activité de la construction est un excellent support d'expérimentation pour aborder l'économie circulaire à travers une approche multi-acteurs, et de manière transversale et systémique.

Si le mot « bâtiment » désigne un objet isolé, le terme « environnement bâti » implique des interactions et des synergies entre les bâtiments eux-mêmes, et entre les bâtiments et leur environnement.

Par exemple, le Club Métiers « Déconstruction » de l'association ORÉE [ORÉE, 2015] s'est intéressé depuis 2015 aux défis auxquels sont confrontés les entreprises en matière de déconstruction des bâtiments et des infrastructures, et aux déchets générés. Les sujets explorés concernent l'amélioration des pratiques organisationnelles des chantiers de déconstruction, la traçabilité, l'éco-conception des bâtiments en vue d'anticiper leur déconstruction, et l'intérêt économique de la déconstruction (notamment le recyclage). Les maîtres d'ouvrage publics ou privés peuvent utiliser les guides correspondant pour établir les prescriptions de leurs appels d'offres, en tenant compte des conditions locales d'élimination des déchets de déconstruction et/ou de la disponibilité des ressources naturelles.

L'économie circulaire est aussi source de solutions pour réduire l'impact environnemental du bâti et atténuer les changements climatiques. Elle vise à prévenir et à réduire l'utilisation des ressources naturelles (et donc les émissions associées), en optimisant les boucles des flux de matières et d'énergie. Elle cherche à reproduire le principe selon lequel « la nature ne produit pas de déchet », et à l'appliquer aux activités humaines. Dans une approche globale, l'économie circulaire s'intéresse aux émissions directes et indirectes (émissions grises).

La performance d'une construction peut être évaluée selon quatre critères complémentaires : sobriété, optimisation, modularité (pouvoir adapter le bâtiment aux besoins des usagers) et réversibilité (pouvoir récupérer les matériaux et les sols). Ces concepts permettent une moindre consommation des ressources et la protection de l'environnement à court, moyen et long terme. Ils permettent aussi d'avoir une vision globale du cycle de vie d'un bâtiment, de la conception à la déconstruction, en passant par les phases d'utilisation et d'entretien. À ce niveau, les autorités locales peuvent contraindre les entreprises, par le biais de diverses dispositions.

L'économie circulaire et l'affectation des sols doivent être anticipées. Les espaces constructibles sont souvent confrontés à un problème d'acceptabilité : il s'agit souvent de zones de stockage, qui sont perçues comme n'étant pas très esthétiques et source de perturbation. Cependant, ces zones, qui se situent quelque part entre friche et réserve, ont un grand potentiel, du moins si elles sont bien conçues. Dans la logique de l'économie circulaire, elles peuvent être le support pour une variété d'usages liés au tri et au réemploi des matériaux, contribuant à la création de richesse et d'emplois sur le territoire.

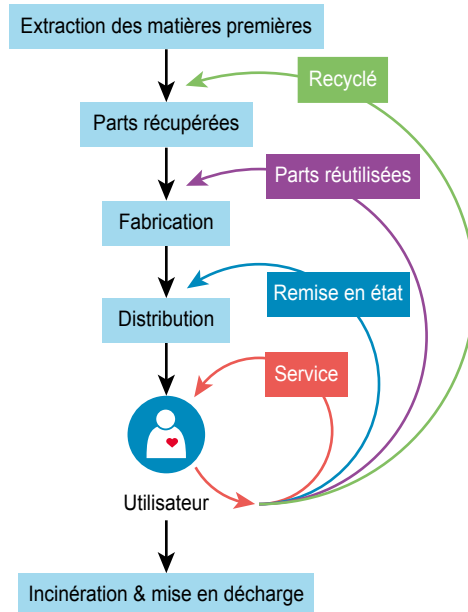
33.6.1. Économie circulaire en droit français

La loi 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour une croissance verte (LTECV) engage le passage à une économie circulaire dépassant le modèle économique actuel, en préconisant une consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires. L'économie circulaire suppose d'anticiper la production, le classement et de traitement des déchets, en portant une attention particulière à leur réutilisation et valorisation.

Le décret n° 2016-288 du 10 mars 2016 a précisé les mesures concernant les distributeurs de matériaux ; ils doivent reprendre les déchets issus des mêmes types de matériaux, produits et équipements qu'ils vendent, mis en œuvre par les professionnels de la construction.

Figure 33.5

Organisation générale de l'économie circulaire



Les entreprises doivent être associées à ce processus afin d'atteindre l'objectif de valoriser 70 % des matériaux de construction entre aujourd'hui et 2020, fixé par la loi LTECV.

La reprise des déchets sus-mentionnés doit être organisée par tous les distributeurs-vendeurs de ces matériaux dont l'unité de production dépasse la superficie de 400 m² et le chiffre d'affaires d'un million d'euros. Il existe déjà des exemples où des sociétés ont formé un groupement d'intérêt destiné à partager des plateformes de traitement et de valorisation dédiées.

En conclusion, il existe différents leviers pour améliorer l'efficacité environnementale des bâtiments, au regard du changement climatique, grâce à des approches d'économie circulaire. Dans la phase de construction/démolition (sobriété, gestion des ressources et de l'environnement, durée de vie, etc.), il faut attirer l'attention sur la nécessité d'un changement d'échelle et sur la mise en place de synergies et d'échanges.

33.7. Conclusion

Ce chapitre montre que le développement du recyclage des bétons de déconstruction et de démolition, pour produire de nouveaux bétons, est une composante majeure de la construction durable, et au-delà du développement urbain et territorial durable.

Le succès de ce développement passe par l'implication des pouvoirs publics, des maîtres d'ouvrage, des entrepreneurs, des fournisseurs de matériaux de construction et de matières premières, et des entreprises de démolition et de recyclage. Des lieux de discussion, d'échange de bonnes pratiques, des guides pratiques, des outils d'analyse des opportunités territoriales et économiques, sont alors nécessaires.

Il n'est pas possible de définir une configuration idoine permettant d'atteindre la solution la plus optimisée, compte tenu du nombre d'intervenants impliqués. Les autorités politiques internationales et nationales doivent fixer des objectifs généraux et les traduire en directives. Les autorités locales doivent prendre en considération les opportunités locales pour développer le recyclage, en amont d'une part, car elles ont la nécessaire de la gestion des déchets de DCD, en aval d'autre part, par la nécessité de préserver les matières premières destinées à la construction. Elles fixent le cadre du dialogue entre les acteurs locaux. Le dernier niveau est celui du projet. Le maître d'ouvrage doit imposer des prescriptions à l'entreprise générale pour utiliser des bétons de GBR, après analyse économique, territoriale et environnementale. Cela nécessite la participation et l'adhésion des entreprises de construction, des fournisseurs de matériaux, des entreprises de démolition et de recyclage et des producteurs de béton.

Ce livre vise à contribuer au succès de cette quête.

Partie IX.

Mise en application du recyclage du béton

François de Larrard¹

Les chapitres précédents fournissent au lecteur un examen exhaustif de ce que l'on connaît aujourd'hui sur le recyclage du béton, d'un point de vue académique. Cependant, la mise en œuvre et l'utilisation pratique vont au-delà de ses connaissances. Dans tous les pays, un certain nombre de textes juridiques et/ou techniques définissent ce qui est permis ou conseillé dans le secteur de la construction et servent de références à tous les professionnels concernés.

Les normes sont d'abord examinées dans le chapitre 34. Dans la vaste liste des normes en vigueur dans les différents pays (normes publiées par l'ISO, le CEN ou des organisations nationales), certaines ne traitent pas du recyclage du béton mais définissent des processus qui sont potentiellement impactés par l'utilisation des matériaux de démolition en tant que granulats ou matières premières du ciment. D'autres autorisent et/ou limitent ces pratiques. Selon les cas, le respect des normes est obligatoire ou bien spécifié par le Maître de l'Ouvrage. Même s'il n'a pas été possible de fournir dans ce livre un tableau complet de la normalisation du recyclage du béton dans tous les pays, les auteurs ont dressé un inventaire le plus complet possible pour présenter les principaux concepts généraux et les normes européennes les plus importantes. Cette lecture est particulièrement conseillée à tous les professionnels qui ont l'intention de s'engager dans le recyclage.

Outre les normes, les gouvernements et les autorités locales publient aussi des textes qui régissent ou encouragent l'utilisation de matériaux recyclés. Des systèmes volontaires, comme la certification environnementale, peuvent

1. LCR, LafargeHolcim, France.

également influencer grandement le niveau de mise en application du recyclage du béton. En outre, en se basant sur les marchés et les traditions locales, certains pays ont développé des pratiques qui peuvent être reproduites à d'autres endroits, où l'expérience locale est moins avancée. Ces sujets sont traités dans le chapitre 35, en s'intéressant plus en détail aux contextes français et européen. Ils clôturent ainsi la liste des monographies qui constituent le présent ouvrage.

Chapitre 34.

Normes

S. Fonteny¹, W. Pillard², P. Francisco³

Résumé – Les caractéristiques des granulats de béton recyclé (GBR) et des produits finaux dans lesquels ils sont utilisés sont décrites avec précision dans divers documents, tels les normes, les règles, les guides et les référentiels d'entreprises. Rédigés et appliqués à différents niveaux (international, européen ou national), ces documents ont pour but de préciser les exigences ainsi que les méthodes de mesure correspondantes, d'assurer le respect des dispositions et de garantir le bon comportement des granulats recyclés dans le produit final.

En Europe, en Asie ou en Amérique, la démarche est presque partout la même, mais les spécifications et protocoles d'essais peuvent varier en fonction des pratiques d'utilisation des GBR et de la nature de l'ouvrage final dans lequel ils seront utilisés.

En Europe, les travaux de la CE (Commission Européenne) et du CEN (Comité Européen de Normalisation) ont permis aux Pays Membres de disposer d'une base commune via le Règlement Produits de Construction – RPC [305/2011/CE, 2011], qui comprend les « normes produits » et les « normes d'essais ». Chaque pays peut toutefois rédiger et publier des normes nationales pour répondre à des considérations locales. En outre, certains autres documents, tels que des guides, peuvent être rédigés à ce même niveau national, à des fins précises, et des référentiels techniques peuvent être appliqués par des entreprises privées ou publiques pour des travaux spécifiques.

À l'extérieur de l'Europe, compte tenu de l'absence d'une structure similaire à la CE ou au CEN (excepté l'ISO), chaque pays a développé son propre corpus normatif et rédigé ses « normes produits » et ses « normes d'essais », parfois sur la base des normes ISO à l'instar des pays européens à partir des documents du CEN.

Bien que les documents des pays européens ou non européens soient similaires dans leurs objectifs, la façon de considérer les granulats recyclés et d'appréhender leur usage et leur comportement dans le béton est souvent différente. Les spécifications peuvent varier en

1. UNPG, Paris.

2. EGF BTP, Paris.

3. CERIB, Epernon.

termes de codifications et de seuils d'utilisation. Les interdictions ou les autorisations d'utilisation sont également différentes.

Il est important de constater que certains sujets spécifiques sont partagés, tels que la réaction alcali-silice (RAS) et les sulfates solubles, car liés à la variabilité des GBR.

34.1. Introduction

Les normes sont des documents établis de manière consensuelle entre différentes parties prenantes afin de faciliter les échanges. Deux organisations importantes existent dans le domaine de la construction : l'ISO pour les normes internationales et le CEN pour les normes européennes. Leurs travaux sont publiés par les organismes nationaux de normalisation (par exemple AFNOR pour la France ou DIN pour l'Allemagne).

Évidemment, ce ne sont pas les seuls documents pouvant être utilisés : il existe également des normes nationales et autres documents spécifiques tels que guides, recommandations, fascicules, etc.

Conscients de la nécessité de préserver les ressources naturelles en raison de leur raréfaction ou des restrictions à leur accès, de consommer les stocks de matériaux recyclés et de développer une économie circulaire, de nombreux pays ont rédigé de nouveaux documents ou complété les documents nationaux existants pour y inclure l'utilisation des granulats recyclés. Ces dispositions et recommandations nationales ont servi parfois de base à l'élaboration ou à la révision des normes internationales.

Considérant que certains pays ont été proactifs dans l'intégration des granulats recyclés dans leurs documents d'application nationale et/ou dans les documents publiés par le CEN ou par l'ISO, l'un des enjeux du Projet National RECYBETON a été de faire un point précis sur la façon dont les granulats de béton recyclé (GBR) sont pris en compte dans les divers documents, tant en France qu'au niveau européen et mondial.

À ce stade, il est important de distinguer normes et règlements. Les règlements sont essentiellement composés de textes de lois ou de décrets, de sorte que leur utilisation est obligatoire dans le pays où ils s'appliquent. Quant aux normes, leur utilisation est volontaire.

34.2. Différents types de normes

Dans le domaine de la construction, et donc aussi dans celui du béton (béton prêt à l'emploi et béton pour les produits préfabriqués principalement), les normes sont prépondérantes car elles constituent la majeure partie des textes de référence. Elles sont regroupées en quatre catégories :

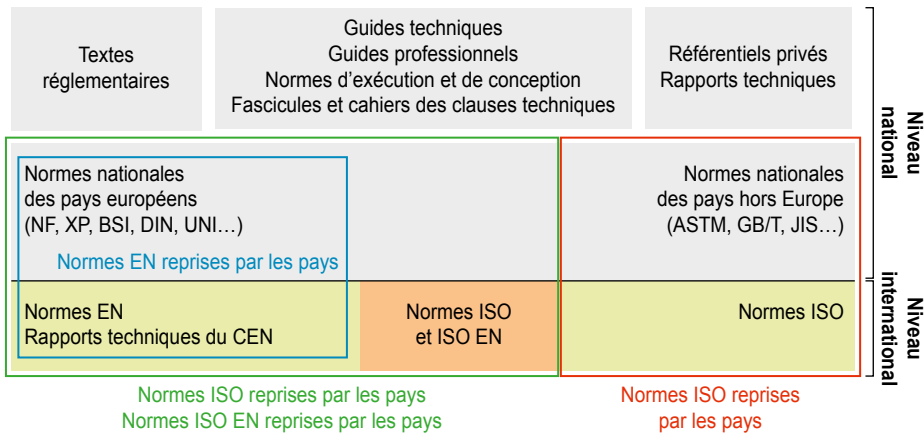
- les normes définissant les spécifications pour le béton, les produits préfabriqués en béton et leurs constituants ;
- les méthodes d'essai pour déterminer les caractéristiques des matériaux (en termes de valeur ou de seuils) ;
- les normes pour l'exécution des travaux, qui décrivent la façon traditionnelle d'exécuter les ouvrages, et le système de contrôle qualité associé ;
- les normes de dimensionnement des ouvrages (« Eurocodes » en Europe). Leur but est d'harmoniser les méthodes de calcul pour les travaux de bâtiments et de génie civil.

Les normes internationales (EN ou ISO) sont établies conjointement *via* les organismes nationaux de normalisation, qui peuvent néanmoins publier des normes nationales sur les mêmes sujets. Ces normes nationales ne doivent alors ni supplanter, ni contredire les normes internationales.

La Figure 34.1 montre l'imbrication des normes ISO, des normes CEN, des normes et autres textes nationaux.

Figure 34.1

Imbrication des normes ISO, des normes CEN et des normes et autres textes nationaux



34.3. Granulats de béton recyclé pour béton

Les spécifications concernant les granulats de béton recyclé (GBR) sont décrites dans des documents qui définissent leurs constituants et leurs classes de performance en fonction des caractéristiques requises. La quantification de ces dernières se fait par l'utilisation des normes d'essai. D'autres documents, tels que des guides ou des recommandations, peuvent compléter les normes.

34.3.1. Spécifications

34.3.1.1. En Europe

L'utilisation de matériaux recyclés en tant que granulats, pour la production de nouveaux bétons ou pour une utilisation liée au béton, est couverte au niveau européen par diverses normes publiées par le CEN.

La première est la norme EN 12620 « Granulats pour béton ». Cette norme, notamment sa version EN 12620 + A1 publiée en 2008 [NF EN 12620, 2008] (appelée EN 12620 dans la suite de ce chapitre) précise les caractéristiques auxquelles les granulats issus de matériaux recyclés doivent satisfaire pour pouvoir entrer dans la composition du béton. Le champ d'application de la norme indique clairement qu'elle s'applique pour la maîtrise de la production des granulats dont ceux issus de matériaux recyclés. Au paragraphe 5.8, le Tableau 20 définit les types de constituants (Tableau 34.1) et les codes à utiliser pour la désignation des granulats recyclés, en fonction de leur teneur en différents constituants.

Tableau 34.1

Types de constituants des GBR

Code des constituants	Matériaux – Description
Rc	Béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton
Ru	Granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques
Rb	Éléments en argile cuite (par exemple : briques et tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant
Ra	Matériaux bitumineux
Rg	Verre
FL	Matériaux flottants (en volume)
X	Autres : matériaux cohérents (par exemple, argile, sol) Divers : métaux (ferreux et non ferreux), Bois, matière plastique et caoutchouc non flottants Plâtre

Pour chaque constituant (par exemple Rc) ou combinaison autorisée de constituants (par exemple Rc + Ru et X + Rg), la norme EN 12620 définit des catégories à utiliser ou à prescrire. Par exemple, la catégorie Rc₉₀ signifie que le GBR est composé d'au moins 90 % de béton ($\geq 90\%$). Pour Rcu₉₅, la teneur totale en béton et en matériaux non liés est supérieure à 95 %. Inversement, cela implique que les autres constituants ne peuvent dépasser 10 % pour

R_{c90} et 5 % pour R_{cu95} . Pour une utilisation dans un nouveau béton, les catégories R_{c70} et R_{cu70} sont généralement prescrites, voire plus encore selon la classe du nouveau béton. Cet aspect est traité dans la norme EN 206 et ses compléments nationaux [NF EN 206, 2013].

La norme EN 13139 « Granulats pour mortier » permet également d'utiliser des matériaux recyclés [NF EN 13139, 2002]. Cependant, la principale différence avec la norme EN 12620 est l'absence de spécification particulière pour les GBR.

Le CEN TC104 (« Béton et produits relatifs au béton ») a introduit dans l'annexe E de la norme EN 206-1, puis dans la norme EN 206 qui lui a succédé, des recommandations relatives aux gravillons de granulats recyclés. D'autres recommandations ont été introduites dans le Complément National de la norme EN 206, que chaque pays européen peut publier.

Le CEN TC229 (« Produits préfabriqués en béton ») a introduit dans l'annexe Q de la norme EN 13369 des exigences relatives aux granulats recyclés [NF EN 13369, 2013].

34.3.1.2. Recommandations nationales pour les granulats recyclés

La publication de recommandations nationales, complémentaires aux dispositions européennes énoncées dans les normes EN, est fréquente. En effet, les documents nationaux sont destinés à fournir des seuils ou des niveaux détaillés, à attirer l'attention sur certaines caractéristiques ou à approuver des pratiques nationales qui ne sont pas prises en compte dans les normes EN.

Les spécifications particulières apportées par les pays européens pour l'utilisation des granulats recyclés en béton de structure sont obligatoirement complémentaires à la norme EN 12620 (Tableau 34.2). Elles visent à clarifier les recommandations ou à ajouter des spécificités locales, telle une codification particulière des granulats recyclés en lien avec leurs constituants ou leur origine (route, bâtiment, etc.). Ces spécifications nationales ont pour but de garantir l'aptitude à l'emploi des granulats recyclés, par la maîtrise des propriétés. Il s'agit, par exemple, de spécifications ou d'exigences destinées à déterminer :

- la teneur en sulfates solubles (la mesure peut être faite dans l'eau ou dans l'acide) ;
- la teneur en constituants des granulats recyclés (pour éviter le plâtre par exemple) ;
- l'absorption d'eau (surtout pour les sables) ;
- les composants impliqués dans la RAS.

Habituellement, ces recommandations spécifiques nécessitent des essais de contrôle plus fréquents que pour les granulats naturels.

Tableau 34.2

Documents nationaux complémentaires à la norme EN 12620

Pays	Documents complémentaires à la norme EN 12620	Autres documents
Autriche	Normes [B 3140, 2013] & [B 3131, 2006] « règles de transposition de la norme EN 12620 »	Textes des règlements : Directive Rouge et Directive Verte [Directive verte, 2007]
Belgique	Néant	PTV406 : Granulats recyclés – granulats provenant de déchets de béton, de déchets mixtes, de débris, de maçonnerie et d'asphalte – Pierre concassée et grave – Granulats pour béton, mélanges non liés et matériaux traités aux liants hydrauliques [PTV 406, 2003].
France	[NF P18-545, 2011] : Granulats – Éléments de définition, conformité et codification. [NF EN 206/CN, 2014] : Béton	Néant
Allemagne	[DIN 4226-100, 2002] : Granulats pour béton et mortiers - partie 100 : granulats recyclés	Néant
Italie	[UNI C8520-1, 2005 ; UNI C8520-2, 2005] - Granulats pour béton – Instructions supplémentaires pour l'application de la norme EN 12620 – Partie 1 : Critères de désignation et de conformité – Partie 2 : recommandations	Néant
Pays-Bas	[NEN 5905+A1, 2008] : Supplément néerlandais à la norme NEN-EN 12620 « Granulats pour béton »	Néant
Norvège	Néant	[NB 26, 2014] : Recyclage des bétons et maçonneries pour la production de béton – Publication n° 26
Espagne	Néant	Projet de réglementation « EHE » [EHE Project, 2003]
Suisse	[SIA 2030, 2010] : Recyclage du béton	Néant
Royaume-Uni	Néant	Guide [PD 6682-1, 2009] – Granulats – Partie 1 : Granulats pour béton – Directives pour BS EN 12620

34.3.1.3. Pays hors de l'Europe

Les pays hors de l'Europe n'appliquent (*a priori*) pas les normes EN et ils ont donc rédigé un corpus de documents spécifiques basés sur leurs connaissances et leur expérience. Ces documents contiennent parfois des similitudes, avec d'autres normes nationales ou des normes européennes, héritées d'une histoire voire d'une zone d'influence communes (par exemple le Commonwealth).

Selon l'approche considérée, la codification des granulats recyclés peut être très différente d'un pays à l'autre selon les caractéristiques des constituants ou leur utilisation finale :

- au Japon, la masse volumique et l'absorption d'eau sont les deux critères retenus pour classer les granulats recyclés ;
- l'Australie a défini 2 classes et 10 sous-classes (ou grades) pour spécifier les granulats recyclés pour les bétons de structure et pour les autres bétons ;
- au Brésil, la façon de classer les granulats recyclés est proche de la démarche européenne et certaines classes en sont très similaires ; Rc (béton), Ru (matériaux non liés), X (autres métaux, bois, plastiques, etc.) et FL (flottants). Une nouvelle classe est présente pour les solvants et les peintures, ces constituants étant non pris en compte dans d'autres pays ;
- pour le Canada, 7 classes sont définies pour les granulats recyclés : MR-1 à MR-7 selon le pourcentage présent d'ancien béton, de bitume résiduel et de granulats naturels.

Certains seuils sont très différents de ceux européens. Un exemple parlant est celui des sulfates solubles en Chine où il a été fixé à 2 % maximum, alors qu'il est de 0,2 % ou 0,8 % en Europe. Toutefois, les méthodes utilisées pour l'extraction des sulfates ne sont pas les mêmes.

Comme en Europe, certaines caractéristiques sont également surveillées, par exemple celles concernant la RAS.

34.3.2. Normes d'essai

Comme pour les « normes produits », les « normes d'essai » peuvent être des documents internationaux ou nationaux.

La prise en compte des granulats recyclés dans les normes d'essai est intrinsèquement liée à l'existence de spécifications y faisant appel dans les « normes produits » et autres documents.

34.3.2.1. Normes d'essai européennes

Étant donné que les quatre normes d'essai, élaborées par le comité technique ISO pour le béton, sont anciennes et qu'elles ne prennent pas de ce fait en compte les granulats recyclés, les normes EN sont utilisées dans toute l'Europe.

Il existe autant de méthodes que de propriétés à mesurer (voire plus car certaines normes proposent différents protocoles pour mesurer une même

caractéristique, comme par exemple la norme [NF EN 1744-1, 2014] pour les sulfates solubles).

Pour les granulats recyclés, l'annexe H de la norme EN 12620 définit les caractéristiques spécifiques à mesurer lorsque ces matériaux sont destinés à entrer dans la composition de nouveaux bétons, en désignant les normes d'essai correspondantes.

Des normes d'essai ont été spécifiquement et intégralement rédigées pour les matériaux recyclés (comme la norme [NF EN 933-11, 2009] : essai de classification des constituants des granulats recyclés, ou encore la norme [NF EN 1744-6, 2007] : détermination de l'influence d'un extrait de granulats recyclés sur le temps de prise initiale du ciment ». D'autres normes d'essai comportent des chapitres spécifiques (par exemple la norme [NF EN 1744-1, 2014] paragraphe 10.2 : Détermination de la teneur en sulfates solubles dans l'eau dans les granulats recyclés », ou encore [NF EN 1367-4, 2008] : Détermination du retrait au séchage – Annexe A »). Enfin des normes d'essais doivent encore être complétées pour prendre en compte les granulats de béton recyclé.

34.3.2.2. Méthodes d'essai nationales des pays européens

L'élaboration de normes nationales résulte soit de l'absence de normes européennes sur des sujets précis, soit de la volonté d'introduire des méthodes spécifiques basées sur l'expérience nationale (Tableau 34.3).

La réaction alcalis-silice (RAS) est un exemple pour lequel des normes nationales ont été édictées car les « normes produits » font référence aux spécificités sur le lieu d'usage.

D'autres normes sont rédigées sur un sujet national très précis (par exemple la norme française [NF P18-566, 2014] pour l'essai à l'aide d'un appareil d'ombroscopie).

Tableau 34.3

Méthodes d'essai nationales

Autriche	L'absorption d'eau doit être effectuée sur la fraction 4/32 mm
France	<ul style="list-style-type: none"> – la norme [NF XP P18-544, 2015] « Détermination des alcalins actifs solubles dans l'eau de chaux » peut être utilisé pour déterminer le potentiel de libération des alcalins actifs, qui peuvent avoir une influence néfaste dans le béton ; – la norme [NF P 18-566, 2014] « Analyse granulométrique – Essais à l'aide d'un appareil d'ombroscopie » qui est applicable aux granulats recyclés ; – la norme [NF P 18-576, 2013] peut être appliquée pour la mesure du coefficient de friabilité des sables.
Allemagne	<ul style="list-style-type: none"> – l'absorption d'eau est mesurée après une période de 10 minutes et en l'absence de la fraction inférieure à 0,0125 mm [DIN 4226-100, 2002] ; – les essais de lixiviation doivent être effectués deux fois par an et les mesures doivent être conformes aux normes allemandes ; – les annexes D (détermination de l'absorption d'eau), E (détermination de la teneur en chlorures solubles dans l'acide), G (substances nocives), H (vérification de la résistance au gel-dégel pour les granulats – essai sur béton) et I (effets des granulats recyclés sur le sol et l'eau) de la norme [DIN 4226-100, 2002] s'appliquent aux granulats de béton recyclé.
Espagne	Le projet de règles EHE introduit des essais nationaux applicables aux granulats recyclés, tels que le coefficient de forme, l'absorption d'eau, la teneur en argiles et en grains tendres.
Royaume-Uni	Pour les bétons destinés aux routes et autoroutes, une méthode différente de la norme EN 933-11 a été mise au point par le ministère britannique de la construction des routes et autoroutes (SHW).

34.3.2.3. Normes nationales de pays hors Europe

Trois pays (au moins) ont rédigé des méthodes d'essai spécifiques aux granulats recyclés ou bien ont introduit les granulats recyclés dans les méthodes d'essai existantes (Tableau 34.4).

Tableau 34.4

Méthodes d'essai nationales spécifiques non européennes

Australie	[AS 1141, 1974] « Méthodes d'échantillonnage et d'analyse des granulats ».
Québec	[LC 21-901, 2008] « Détermination de la composition d'un matériau recyclé contenant des résidus d'asphalte et de béton de ciment » (similaire à la norme EN 933-11).
États-Unis	<ul style="list-style-type: none"> – norme [ASTM C88, 2013] « Méthode d'essai pour la résistance des granulats par utilisation de sulfate de sodium ou de magnésium » (équivalente à la norme EN 1367-2) ; – norme [ASTM C294, 2012] « Nomenclature descriptive des constituants des granulats de béton » (similaire aux normes EN 932-3 et EN 933-11) ; – norme [ASTM C666 / C666M, 2015] pour la résistance du béton au gel/dégel rapide.

34.4. Granulats recyclés dans le béton

L'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR), que ce soit dans le béton de structure ou non, coulé en place ou préfabriqué, se fait *via* des normes, des guides, des cahiers des charges et aussi des règlements.

Les normes d'essai sont utilisées pour mesurer les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci. Des méthodes d'essai ont été normalisées par l'ISO, comme par exemple la série [ISO 1920-x], et peuvent être publiées par les organismes nationaux de normalisation en tant que documents nationaux. Dans ces normes, les bétons de GBR sont considérés au même titre que les bétons de granulats naturels.

34.4.1. Spécifications d'utilisation pour les granulats recyclés

34.4.1.1. *Spécifications d'utilisation dans les documents européens d'application*

Les normes pour spécifier les bétons de structure et les produits préfabriqués en béton sont :

- l'EN 206 publiée par le CEN qui se réfère à la norme EN 12620. Les granulats recyclés sont traités dans les compléments nationaux ;
- l'EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton ». Cette norme se réfère à la norme EN 206 pour les bétons constitutifs des produits préfabriqués en béton :
 - pour les produits en béton destinés aux structures (à l'exception des éléments de maçonnerie), les normes produits se réfèrent à la norme EN 13369, qui se réfère aux dispositions de la norme EN 206-1 pour les matériaux constitutifs du béton (GBR inclus). Les dispositions nationales en vigueur sur le lieu d'utilisation indiquent comment les annexes informatives (annexe E de la norme EN 206 et annexe Q de la norme EN 13369) doivent être appliquées ;
 - pour les autres produits en béton (y compris les éléments de maçonnerie), les spécifications techniques (largement définies dans les normes européennes harmonisées) sont principalement traduites en termes d'exigences de performance, vérifiées par des essais effectués directement sur le produit fini pour le contrôle de production. Les caractéristiques des matières premières font partie de la documentation du contrôle de la production.

34.4.1.2. Spécifications issues des pratiques nationales (normes, directives ou règlements locaux)

Pour les pays membres du CEN, la norme EN 206 peut être adaptée via l'ajout d'un complément national. Le Danemark, la France, l'Allemagne, l'Italie, la Suède et le Royaume-Uni ont rédigé un tel supplément ou un document d'orientation pour l'application de la norme EN 206.

Des textes réglementaires ou des guides spécifiques ont également été publiés dans certains pays (Tableau 34.5).

Tableau 34.5

Documents nationaux fixant les spécifications des bétons produits avec des granulats recyclés ou pour des granulats recyclés

Pays	Norme (supplément national ou adaptation de la norme EN 206)	Autre document
Autriche	Néant	Directive rouge (pour les ouvrages préfabriqués) et Directive verte (pour la route) à utiliser en complément de la norme EN 206. La directive verte sert à la certification de la qualité au regard de la compatibilité environnementale des granulats recyclés, avec 3 classes A+, A et B, en fonction de la teneur en éléments dans les éluats
Belgique	Néant	Spécifications d'utilisation : [TRA550, 2011]. Les granulats recyclés doivent être conformes aux prescriptions du PTV 406 définies par BENOR ; seul le béton concassé Rcu > 90 % peut être utilisé
Danemark	[DS 2426, 2011] : Guide pour l'EN 206-1 La qualité des granulats recyclés issus du béton concassé et des tuiles concassées est fixée conformément à la norme DS/EN 12620	Néant
France	Dans la norme NF EN 206/CN, le tableau NA.2 pour les constituants des gravillons recyclés définit des codes spécifiques, liés à la norme EN 12620, pour : Rcu ₉₅ → à CR _B Rcu ₉₀ → CR _C Rcu ₇₀ → CR _D Le tableau NA.5 précise le taux maximum en masse pour les gravillons et le sable recyclés en fonction de la classe d'exposition du nouveau béton. De plus, pour les gravillons recyclés, 3 types (1, 2 et 3) sont définis	Fascicule 65 [Fascicule 65, 2014], avec une restriction sur l'origine des granulats recyclés (qui doivent provenir de la démolition de structures de génie civil) et avec une limite selon la classe de résistance du béton

Le béton recyclé

Pays	Norme (supplément national ou adaptation de la norme EN 206)	Autre document
Allemagne	[DIN 4226-100, 2002] : Déclinaison nationale de la norme EN 206-1 (DIN 206-1)	Guides pour l'utilisation de béton recyclé selon DIN EN 206-1 et DIN 1045-2
Italie	[UNI 8520-2, 2005] : Granulats pour béton – Instructions supplémentaires pour l'application de la norme EN 12620 – exigences	Document Départemental de 2008
Pays-Bas	Néant	Recommandations [CUR 112, 2012] (béton à base de gravillons de GBR) et [CUR 106, 2014] (béton à base de fines particules de sable recyclé)
Norvège	Néant	[NB26, 2014] Guide « Recyclage du béton et des matériaux de maçonnerie pour la production de béton »
Russie	Néant	Recommandations publiées en 1987 pour l'utilisation dans les bétons de l'ingénierie routière. Cependant, des recommandations pour l'utilisation des granulats recyclés pour tous les types de béton sont présentes
Espagne	Néant	Projet de règles espagnoles pour l'utilisation des GBR dans le béton de structure « Projet EHE – Réglementation espagnole pour l'utilisation de béton recyclé ». Il est intéressant de noter que les granulats recyclés ne sont pas définis par leurs constituants mais par des caractéristiques telles que la teneur en fines, la forme, l'absorption d'eau, la résistance à la fragmentation, etc.
Suède	[SS EN 137003, 2008] : complément national à l'EN 206-1	[BA 99] : « Swedish Board of Housing, Building and Planning » ; Manuel complémentaire à celui du dimensionnement des structures
Suisse	Néant	Spécification technique SIA 2030 définissant les spécifications des granulats recyclés, ainsi que les exigences pour leur utilisation dans le béton
Royaume-Uni	[BS 8500-2+A1, 2012] Béton. Norme britannique complémentaire à la norme BS EN 206-1. Spécification des matériaux constitutifs et du béton : supplément national	Néant

34.4.1.3. *Spécifications d'utilisation en Asie, en Amérique et en Océanie*

Comme pour les documents concernant les spécifications des granulats naturels, les pays concernés ont élaboré des spécifications nationales (Tableau 34.6) qui précisent clairement les exigences d'utilisation des granulats recyclés pour les bétons.

Tableau 34.6

Spécifications pour l'utilisation des granulats recyclés dans le béton. Cas d'autres pays

Pays	Norme	Autre document
Australie	Néant	Guide [HB 155, 2002] : Guide pour l'utilisation du béton recyclé et de matériaux de maçonnerie
Brésil	Néant	Règles nationales [Resolução 307/02, 2002] CONAMA
Canada - Québec	[NQ 2560-600, 2002]	Néant
Chine	[JGJ/T 240, 2011] dispositions techniques pour l'utilisation des granulats recyclés [GB/T 14902, 2012] Béton prêt à l'emploi	Néant
Japon	Spécifications pour les granulats recyclés de type H [JIS A 5021, 2011], L [JIS A 5023, 2012] et M [JIS A 5022, 2012] et pour leur utilisation dans le béton. Une quatrième norme [JIS A 5308, 2014] pour le béton « classique » permet l'utilisation des GBR de type H sous certaines conditions	Néant
Nouvelle-Zélande	Néant	Guide des bonnes pratiques pour l'utilisation des granulats recyclés dans le béton néo-zélandais
USA	Néant	Rapport technique [ACI 555R-01, 2002] Document [ACI E1-07, 2007]

34.4.2. Normes d'essai

34.4.2.1. *Normes d'essai communes à l'Europe*

En Europe, des normes d'essais spécifiques ont été rédigées pour les bétons frais et durcis et publiées par le CEN :

- essais sur béton frais : [NF EN 12350-x]
- essais sur béton durci : [NF EN 12390-x]

En l'état actuel de ces normes, il n'y a pas de modes opératoires spécifiques au béton incorporant des granulats recyclés. Dans la norme EN 206, les granulats recyclés décrits dans les spécifications du paragraphe 5.1.3 sont jugés appropriés à la production du béton. Dans la norme EN 206 – Annexe A, le paragraphe A.4 indique qu'il est nécessaire d'effectuer des essais pour déterminer le retrait de dessiccation, le fluage et le module d'élasticité, lorsque le béton contient des granulats recyclés. En outre, le maintien dans le temps de la consistance du béton fabriqué avec des granulats recyclés doit être surveillé, ainsi que l'influence des granulats recyclés, en utilisant les normes d'essai existantes pour le béton.

34.4.2.2. Méthodes d'essai nationales spécifiques

De nombreux pays ont élaboré des méthodes pour tester les caractéristiques locales, et elles sont signalées dans les compléments ou les guides d'application nationaux de la norme EN 206 (par exemple, la résistance au gel interne dans l'air et dans l'eau). Le Tableau 34.7 donne des exemples pour la France.

Tableau 34.7

Normes d'essai françaises spécifiques au béton

Norme d'essai pour béton frais	Norme d'essai pour béton durci
Essai d'ouvrabilité [NF P 18-452, 1988]	<ul style="list-style-type: none"> – Variations dimensionnelles [NF P 18-427, 1996] – Méthodes d'essai sur la réactivité aux alcalins [NF P 18-594, 2015] – Gel interne [NF P 18-424, 2008] et [NF P 18-425, 2008] – Essai d'écaillage [NF XP P 18-420, 2012] – Dureté de surface [NF P18-417, 1989]

34.4.3. Calculs et dimensionnements

Le CEN a publié un nombre conséquent de documents destinés au dimensionnement des ouvrages, appelés « Eurocodes ».

L'Eurocode 2 [NF EN 1992-1, 2005] ne fait référence aux granulats recyclés dans aucune de ses différentes parties.

L'Eurocode 6 fait référence aux « normes produits ». En fait, les granulats recyclés sont autorisés dans la mesure où ces « normes produits » s'appliquent aux matériaux de maçonneries.

Certains pays non européens ont élaboré ou conservé des documents nationaux sur le dimensionnement des ouvrages (Tableau 34.8). Par exemple, la Chine a rédigé une norme [JGJ/T 240, 2011] « Spécifications techniques pour l'utilisation de granulats recyclés ».

Tableau 34.8

Exemples de documents internationaux pour le dimensionnement des ouvrages

Pays	Document	Commentaire
Chine	JGJ/T 240 « Spécifications techniques pour l'utilisation des granulats recyclés »	La relation décrivant la variation du module d'élasticité en fonction de la classe de résistance est modifiée par rapport aux règles communes appliquées en Chine (GB 50010) lorsque des granulats de type II ou III sont utilisés.
Danemark	Norme [DS 411, 1999] « Utilisation structurelle du béton »	Le document limite l'utilisation des granulats recyclés par l'introduction d'exigences supplémentaires dans la norme [DS 2426, 2011]
Espagne	Projet EHE - Projet de réglementation espagnole pour l'utilisation de granulats recyclés	Certaines propriétés sont contrôlées par des coefficients correctifs : résistance à la traction, module élastique, retrait et fluage.
Norvège	Norme [NS 3473, 2003] « Structures en béton - conception et règles détaillées »	Application des règles de conception conventionnelles du document NB 26 en deçà d'un certain pourcentage de substitution. En outre, certains ajustements sont pris en compte pour tenir compte de la masse volumique plus faible et son impact sur la résistance, le retrait, etc.
Pays-Bas	Dispositions [CUR 112, 2012]	En deçà d'un pourcentage volumique de 50 % de substitution en gravillons de GBR, les règles de calcul et de dimensionnement restent inchangées. Les gravillons de GBR doivent être conformes aux exigences de masse volumique, et leur taux maximum de substitution dépend des classes d'exposition. Les classes de résistance concernées sont limitées (C12/15 à C35/45). Au-delà d'une substitution de 50 % en volume, un facteur de correction doit être appliqué pour le module d'élasticité, le fluage et le retrait.
Suisse	Spécifications techniques [SIA 2030, 2010]	Dans les calculs de dimensionnement, pour les bétons RC-M, les valeurs de la loi de déformation du béton sont modifiées.

34.4.4. Exécution des travaux

Les documents pour l'exécution des travaux définissent les exigences de contrôle qualité permettant d'assurer la bonne exécution des travaux, et comprennent les spécifications concernant les matériaux, les contrôles internes et externes indépendants sur les matériaux, les produits, etc.

Au niveau européen, la norme [NF EN 13670, 2013] sur l'exécution des ouvrages en béton est applicable, bien qu'elle ne mentionne pas les granulats recyclés.

En ce qui concerne les bétons en techniques routières, la norme [NF EN 13877-1, 2013] : Chaussées en béton – Partie 1 précise que les granulats utilisés doivent être conformes aux exigences de la norme EN 12620, ou aux dispositions nationales. Cela peut permettre indirectement l'utilisation de granulats recyclés dans les bétons routiers.

Pour les documents nationaux, la France dispose de différents documents qui permettent l'utilisation des granulats recyclés dans des conditions spécifiques :

- le fascicule n° 65 du CCTG « Réalisation de travaux de génie civil en béton armé ou précontraint » [Fascicule 65, 2014], récemment publié en 2018, introduit la possibilité d'utiliser des granulats recyclés issus de la déconstruction d'ouvrages d'art. Seuls les granulats recyclés de type 1 (selon la norme NF EN 206/CN) résultant de la déconstruction d'ouvrages et dont la traçabilité est assurée peuvent être utilisés pour les bétons ayant une classe de résistance inférieure à C35/45, et uniquement pour les classes d'exposition XC1, XC2, XC3, XC3, XC4 ou XF1 avec un taux de substitution maximum de 20 % ;
- d'autres fascicules indiquent directement ou indirectement la possibilité d'utilisation de granulats recyclés (par exemple, le [Fascicule 74, 1998] « Construction de réservoirs en béton » et le [Fascicule 29, 2006] « Construction, entretien des voies, places et espaces publics pavés et dallés en béton ou roches naturelles »), à condition que leurs performances soient équivalentes à celles des matériaux naturels ;
- la norme [NF P 98-170, 2006] « Chaussées en béton de ciment – Exécution et contrôle », qui indique que les granulats doivent être conformes aux normes NF EN 12620 et NF P18-545.

Le Tableau 34.9 présente des exemples de documents de référence rédigés par des entreprises publiques ou privées, en France : SNCF et EDF.

Tableau 34.9

Exemple de références commerciales en France

EDF	Cahier des clauses techniques générales applicables aux travaux de gros œuvre – N° 91.C.020.04 [CCTG, 2010]	Les granulats doivent répondre aux exigences de la norme NF P18-545. Les granulats répondent au moins aux codes B des spécifications (selon la norme NF P 18-545). La résistance au gel-dégel n'est requise que pour les bétons XF3 ou XF4 selon la norme NF EN 206, et sauf exigences supplémentaires.
SNCF	[IN 0034, 2011] : Exécution de travaux en béton armé et en béton précontraint	Les GBR et les granulats récupérés dans l'eau ou du béton frais, et traités dans une usine de lavage / criblage sont autorisés pour la production de bétons de classe de résistance \leq C20/25, tant que le pourcentage de substitution n'excède pas 5 %.

Le premier point commun important à noter dans ces deux exemples de documents est la référence aux normes existantes, dans le but de disposer d'une base pour les spécifications et les méthodes d'essai. Cette approche est en quelque sorte une garantie pour éviter des recommandations spécifiques. Le deuxième point commun est la restriction des classes de performance pour les granulats recyclés utilisés et les bétons produits avec ces granulats.

34.5. Conclusion

L'utilisation des granulats recyclés pour produire un nouveau béton doit être précisée dans un cadre composé de plusieurs types de documents.

Tout d'abord, les « normes produits » et les « normes d'essai » des granulats définissent les propriétés requises pour les granulats recyclés et la manière de mesurer ces propriétés pour leur utilisation finale. D'autres « normes produits » sont nécessaires pour spécifier leur utilisation dans le produit final (béton prêt à l'emploi, béton pour la préfabrication, etc.). Enfin, des normes d'essai devraient être nécessaires pour mesurer l'impact des granulats recyclés sur les caractéristiques du produit final obtenu mais, le plus souvent, les essais sont ceux utilisés pour les produits incorporant des granulats naturels.

D'autres documents comme les règles pour le dimensionnement et l'exécution des travaux, ou des référentiels publics ou privés, peuvent faire partie du cadre contractuel pour l'utilisation de granulats recyclés dans les bétons destinés à un ouvrage de génie civil, un bâtiment ou à une route.

À quelques exceptions près (par exemple, les méthodes d'essai pour les granulats recyclés EN 933-11 et EN 1744-6, ou les spécifications d'utilisation au Japon et en Chine), la plupart des documents ne traitent pas spécifiquement et uniquement des GBR. Seuls quelques chapitres des normes existantes concernent les granulats recyclés, où ils sont considérés comme une « autre source de granulats ».

Si l'on rapproche l'ensemble des documents recueillis dans différents pays, le premier point à noter est que les granulats recyclés sont maintenant intégrés dans les « normes produits » et les « normes d'essai » dédiées aux granulats et au béton. En Europe, c'est le fruit des travaux réalisés dans le cadre du CEN, qui constituent la base d'un langage commun. Mais, selon les usages et les expériences de chaque pays, les documents nationaux sont encore inévitables et même nécessaires pour assurer la qualité des travaux de bâtiments et de génie civil. Pour les pays en dehors de l'Europe, le système est à peu près partout identique, chaque pays ayant développé son propre corpus normatif pour obtenir les mêmes résultats et répondre aux mêmes besoins.

Enfin, chaque pays a ses propres pratiques, obstacles et incitations. Ces aspects sont développés dans le prochain (et dernier) chapitre de ce livre.

Chapitre 35.

Pratiques nationales : règlements, obstacles et mesures incitatives

S. Braymand¹, W. Pillard², R. Bodet³, P. Francisco⁴

Résumé – Les chapitres précédents ont montré que le recyclage des granulats de béton recyclé (GBR) dans le béton est devenu une pratique maîtrisée, et qu’il existe aujourd’hui une filière de traitement relativement bien structurée, en termes de qualité et de traçabilité des produits. Cependant, au-delà des aspects techniques, cette filière se développe de façon assez erratique selon les pays, voire au sein même d’un pays, et la demande de GBR pour les bétons est liée à l’utilisation de ces mêmes GBR pour des applications routières. Par conséquent, la promotion du recyclage des GBR dans le béton nécessite de s’intéresser aussi aux aspects réglementaires et aux initiatives locales.

La réglementation aborde généralement le recyclage via l’approche globale de la gestion des déchets et de l’économie circulaire. En complément, les initiatives volontaires développées par exemple dans le cadre des labels de certification environnementale trouvent aussi une légitime utilité (exemple : LEED, BREEAM, NF HQE). Ces certifications définissent en général des niveaux de performance environnementale basés sur une notation par critères. Parmi ceux-ci, le critère « déchets » est très souvent générique, c’est-à-dire qu’il ne fait pas (assez) référence à des objectifs précis, tels que « utilisation de bétons de GBR » (excepté dans le label suisse MINERGIE-ECO). Les démarches ne sont donc pas encore assez incitatives, alors qu’elles pourraient être profitables à la promotion du béton recyclé, si elles faisaient partie des critères de jugement des offres. Cet aspect doit donc être renforcé.

D’autres mesures incitatives peuvent aussi être envisagées, comme la taxation de la mise en décharge des Déchets de Construction et de Démolition (DCD), ou l’instauration dans les marchés publics d’un critère d’évaluation en faveur des projets prévoyant l’utilisation des granulats recyclés.

1. Laboratoire ICube, Université de Strasbourg.

2. EGF BTP, Paris.

3. UNPG, Paris.

4. CERIB, Epernon.

35.1. Introduction

La planète produit entre 3,4 et 4 milliards de tonnes de déchets⁵, dont 1,7 à 1,9 milliard de tonnes d'ordures ménagères, 1,2 à 1,67 milliard de tonnes de déchets industriels non dangereux (dont les déchets de construction) et 490 millions de tonnes de déchets industriels dangereux [Seghier, 2009]. Sur les 225-300⁶ millions de tonnes de Déchets de Construction et de Démolition (DCD) produits annuellement en France (225 MT en 2014 [CFDD-SOES, 2017b]), seule une partie des déchets de béton est recyclée, principalement en travaux routiers. Concrètement, en 2014, 76 % du total des déchets inertes ont été utilisés en travaux routiers (62 %) ou en remblaiement de carrières (14 %) ; 17 millions de tonnes de déchets de bétons purs ont été produites qui ont été recyclés en travaux routiers, principalement, le reste a été mis en décharge [CERC, 2018 ; UNPG, 2016 ; Stassi, 2016]. On estime que plus de 90 % des déchets de béton pur sont recyclés, du fait qu'ils représentent la partie la plus « noble » des déchets inertes. D'autre part, 21,4 millions de tonnes de granulats recyclés ont été produites sur les plateformes de recyclage [UNPG, 2016]. Ce chiffre ne représente que 6,5 % de la production nationale de granulats. Toutefois, il ne prend pas en compte les matériaux directement recyclés sur les chantiers (71 Mt en 2014) [CGDD-SOES, 2017a]. Par ailleurs, en France, le secteur du bâtiment reste encore un débouché marginal pour les GBR, compte tenu des exigences de qualité plus élevées par rapport aux techniques routières, alors que plusieurs pays ont déjà développé une réelle pratique en la matière [Puttallaz *et al.*, 2016]. En fait, le recyclage de haute qualité n'a pas encore été véritablement instauré en raison d'une trop faible demande de béton de GBR pour le bâtiment [Bougrain *et al.*, 2017].

Récemment, la France a adopté la directive cadre 2008/98/CE [Directive 2008/98/CE, 2008] relative aux déchets, dont l'un des objectifs est d'atteindre d'ici 2020 un taux de recyclage des déchets solides non dangereux de 70 % (en masse). Actuellement, environ 60 % de ces déchets sont recyclés et réutilisés quasi-intégralement en construction routière. Cette situation « équilibrée » n'incite alors pas les opérateurs à aller vers des solutions à plus grande valeur ajoutée, comme le voudraient les principes de l'économie circulaire [Le Moigne, 2014 ; Le Moigne, 2018], et comme l'État et les collectivités territoriales s'y sont engagés (article 79 de la loi de transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015).

Les opérateurs de la construction sont donc appelés à faire évoluer la situation afin de respecter les objectifs européens, déclinés dans la loi de transition énergétique, en respectant toutefois les impératifs économiques et environnementaux. C'est pourquoi il importe d'identifier les obstacles, mais aussi les incitations réglementaires concernant le recyclage des GBR dans le béton, au regard des résultats scientifiques décrits dans les chapitres précédents.

5. Statistiques de 2006 [Seghier, 2009].

6. Statistiques provenant de plusieurs sources.

Une analyse des textes nationaux, européens et internationaux, d'application obligatoire ou volontaire (i.e. guides techniques, certifications de qualité environnementale) a donc été réalisée dans ce chapitre, en complément des aspects normatifs traités au Chapitre 32. Elle a permis d'établir une « carte » des pays où l'utilisation de GBR dans le béton est devenue une pratique courante.

Enfin, diverses autres mesures de politique publique, qui pourraient être envisagées, sont aussi abordées.

35.2. Textes réglementaires

35.2.1. Textes législatifs et codes réglementaires français

Les textes législatifs et les codes réglementaires français traitant de la gestion des déchets de construction ont été inventoriés et analysés (Tableau 35.1) afin d'évaluer l'impact de leur application, en terme d'incitation ou d'obstacle au recyclage des GBR dans le béton [Bodet *et al.*, 2014].

Tableau 35.1

Codes législatifs et réglementaires français

Texte	Article	Sujet	Incitatif ou Obstacle
Code de l'environnement [Code de l'environnement, 2018]	L 541-14-1 R 541-14-1 à 18	Cadre réglementaire des plans ministériels de prévention et de gestion des déchets	Incitatif
	L 515-3	Plan régional des carrières - Gestion durable des ressources minérales fabriquées à partir de matériaux recyclés	Incitatif
	L 541-2 L 541-7, L 541-43	Définition des responsabilités du producteur et du détenteur des déchets.	Les deux
	L 541-2	Obligation pour le maître de l'ouvrage de transmettre à l'entreprise toute information utile (avant l'exécution des travaux) pour valoriser ou éliminer les déchets	Incitatif
	2010-1579 Ordonnance complétant les dispositions des L 542-2 à 46	Les matériaux de démolition et en priorité les bétons déconstruits qui sortent du chantier à partir duquel ils sont produits obtiennent un statut de déchet	Obstacle
	Arrêté du 19 juin 2015 D541-12-14	Système de gestion de la qualité pour l'état des déchets.	Les deux

Texte	Article	Sujet	Incitatif ou Obstacle
Code des travaux publics [Code des marchés publics, 2006]	Article 5 complété par une ordonnance du 23 juillet 2015	Le maître de l'ouvrage doit évoquer les risques et caractériser les matériaux contenus dans le bâtiment, pour indiquer la présence de produits dangereux	Obstacle
Code de la santé publique [Code de la santé publique, 2018].	2010-1579 ordonnance	Interdiction pour la fabrication d'utiliser des matériaux de construction et des déchets de béton contaminés ou susceptibles de l'être	Obstacle
Code du travail [Code du travail, 2018]	L 4531-1	Obligation pour l'autorité contractante d'évaluer les risques sanitaires liés à l'amiante	Obstacle
Arrêté du 29 février [Code de l'environnement, 2018].	Article 1&2	Sur le site de recyclage, tenue d'un registre d'admission et d'un registre des ventes de matériaux de déconstruction	Incitatif
Code des douanes [Code des douanes, 2018]	Articles 266, 268 et 285 Bulletin du 18 avril 2016	Taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) : Les installations de traitement, de stockage ou de transit de matériaux de démolition ne sont pas soumises à la taxe générale sur les activités polluantes	Incitatif
Directive Européenne, Commission européenne [Directive 2008/98/CE, 2008].	2008/98/CE « Cadre des déchets »	Conditions de sortie du statut de déchet	Obstacle à l'époque, pourrait évoluer

On constate qu'aucun de ces documents ne traite directement le recyclage des granulats dans le béton. Les déchets, leur stockage et leur recyclage ne sont abordés que de façon générale.

35.2.2. Textes législatifs et codes réglementaires européens et internationaux

Parmi les textes européens et internationaux, deux documents sont à distinguer [Bodet *et al.*, 2015] :

- le protocole britannique WRAP [NIEA, 2013] ;
- la directive suisse OFEV [OFEV, 2006].

Au Royaume-Uni, l'utilisation de granulats recyclés issus de déchets inertes est définie conformément aux exigences du protocole de qualité WRAP (Waste & Resources Action Program) [NIEA, 2013]. Ce document fixe les spécifications

pour classer et évaluer la conformité des matériaux recyclés, et pour définir le statut de fin de vie des déchets, au sens de l'article 3, paragraphe 1, de la directive cadre de l'UE sur les déchets [Directive 2008/98/CE, 2008]. Il fixe également des critères pour la production, à partir de déchets inertes, de granulats destinés à être utilisés en techniques routières. Un matériau recyclé cesse d'être un déchet s'il est démontré que le produit obtenu est conforme au protocole de qualité WRAP. Il appartient au producteur de démontrer que tous les critères sont respectés. Les granulats recyclés peuvent être utilisés comme granulats à béton (béton routier) à condition qu'ils soient agréés par les normes dédiées et par le contrôle de production. Le Tableau 35.2 rappelle la liste des matières premières, avec leur « code déchet »⁷ ou code du Catalogue européen des déchets (CED), considérées comme inertes et pouvant être utilisées pour la production de granulats recyclés, dans le cadre du protocole qualité WRAP.

Tableau 35.2

Déchets inertes acceptables – Protocole qualité WRAP –
Cas des Déchets de Construction et de Démolition

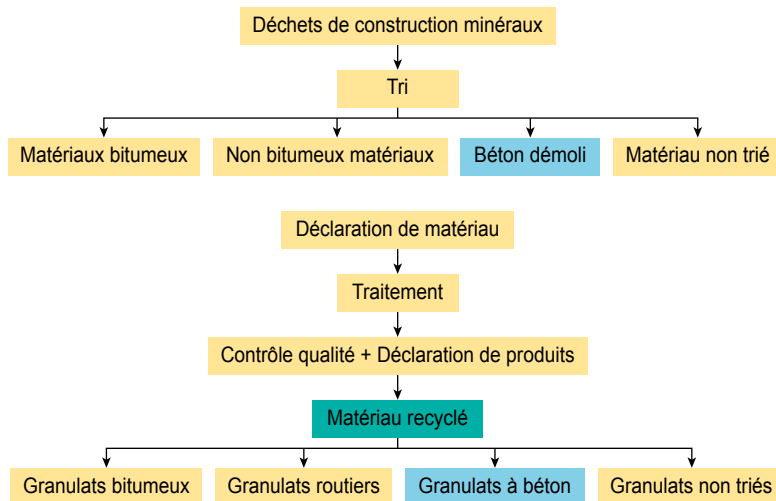
Type et restrictions	Code des déchets
Béton (ne doit pas inclure les boues de béton).	17 01 01
Briques	17 01 02
Carreaux et céramiques	17 01 03
Mélanges de béton, briques, tuiles et céramiques autres que ceux visés à la rubrique 17 01 06	17 01 07
Déchets de construction et de démolition mélangés, autres que ceux visés aux rubriques 17 09 01, 17 09 02 et 17 09 03	17 09 04

La directive suisse [OFEV, 2006], dédiée à la valorisation des déchets minéraux, définit les différentes catégories de déchets de construction, leurs domaines d'utilisation et les méthodes de valorisation. Quatre types de matériaux sont classés : agrégats bitumineux, granulats pour assises routières, granulats pour bétons, granulats non triés. Le protocole qualité pour l'acceptation de leur réutilisation est défini Figure 35.1.

7. Il s'agit d'un code à six chiffres qui désigne un type de déchets selon la « List of Wastes (England) Regulations 2005 », « List of Wastes (Wales) Regulations 2005 » et « List of Wastes (Northern Ireland) Regulations 2005 ». Lorsqu'il fait référence aux déchets dangereux, le code comprend un astérisque.

Figure 35.1

Recyclage des déchets minéraux de construction – OFEV [OFEV, 2006]



35.2.3. Analyse des obstacles et des incitations à la récupération et à la réutilisation des matériaux et des produits de construction : documents-cadres

L'ADEME a publié un rapport sur la valorisation et la réutilisation des matériaux et produits de construction dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, en identifiant des leviers pour lever les obstacles à leur réutilisation [ADEME, 2016b]. Même si cette étude ne concerne que la réutilisation des produits de construction non transformés, les incitations et les freins identifiés sont similaires à ceux qui s'appliquent au recyclage du béton dans le béton.

On notera que les textes législatifs et réglementaires abordent encore peu le recyclage des matériaux et produits de construction, alors que la réglementation européenne en matière de prévention et de gestion des déchets encourage à leur réutilisation. Cette singularité provient notamment de la difficulté qu'ont les différents opérateurs à définir le statut du matériau (déchet ou produit). Le code des marchés publics et la norme des marchés privés offrent la possibilité de prescrire ou de spécifier la réutilisation des matériaux et des produits recyclés, ainsi que les modalités de leur mise en œuvre. Néanmoins, pour le bâtiment, la plupart des cahiers des charges ne spécifient que des produits manufacturés, et très rarement des produits recyclés. L'inscription dans les textes réglementaires des principes de l'économie circulaire (éco-conception, réutilisation, etc.) se fera au gré de la révision de ces documents, mais il s'agit d'un processus de longue haleine. En outre, un consensus doit être trouvé entre les différents

opérateurs, aux intérêts souvent divergents. Certains aspects peuvent aussi être sujets à interprétation, comme le règlement européen des produits de la construction. En absence de référentiels, le marquage CE et la déclaration de performance peuvent alors être une tâche ardue.

Enfin, on notera que la réutilisation des matériaux et des produits dépend aussi de la prise de risque qui accompagne la décision : aptitude à l'usage des produits, contentieux, qualité sanitaire, etc. Ces aspects, qui apparaissent souvent rédhibitoires, sont des conditions préalables au développement du recyclage.

35.3. Initiatives et guides locaux

35.3.1. Textes français

Aujourd'hui, il n'existe pas de directives nationales pour le recyclage du béton dans le béton. C'est l'un des objectifs du Projet National RECYBETON. Cependant, certains guides régionaux et nationaux traitant de l'utilisation des granulats recyclés en applications routières peuvent déjà être pris comme exemple [Bodet *et al.*, 2014].

Par exemple, en 2016, le CEREMA [CEREMA, 2016] a élaboré un guide intitulé « acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière » à partir de plusieurs guides régionaux [ADEME, 2011 ; Destombes, 2003 ; OFRIR, 2016 ; CEREMA, 2014]. Ce guide propose une méthode en plusieurs étapes :

- production de matériaux routiers alternatifs :
 - caractérisation et réception des produits de déconstruction,
 - traitement des matériaux alternatifs,
 - production du « matériau routier » propre à l'usage ;
- définition de la plage d'utilisation en fonction du niveau d'exposition aux eaux météoriques ;
- définition des limites d'utilisation en fonction de l'environnement et du type de matériau routier ;
- protocole de qualité environnementale :
 - conformité environnementale : teneur en polluants (éventuellement par essai de lixiviation) [NF EN 12457-2, 2002],
 - fréquence des essais,
 - mise en place et gestion des stocks,
 - traçabilité.

35.3.2. Textes européens et internationaux

La Fédération Française du Bâtiment (FFB) a publié un référentiel européen sur la gestion des déchets de construction issus de chantier de bâtiment [FFB, 2017]. Ce document propose des pistes d'amélioration et des recommandations, qui se déclinent en plusieurs étapes :

- en amont du chantier :
 - former les équipes de gestion et les chefs de projet,
 - améliorer les connaissances sur les déchets,
 - organiser la gestion des déchets,
- durant le chantier :
 - améliorer les pratiques de tri et la logistique du chantier,
- en aval du chantier :
 - promouvoir le recyclage des déchets inertes,
 - améliorer les performances de tri dans les centres dédiés,
 - consolider le maillage des points de collecte et de traitement,
- développer la réutilisation des matériaux et des produits ;
- développer l'utilisation de matériaux recyclés :
 - persuader les utilisateurs,
 - renforcer la prescription des granulats recyclés,
- rédiger un guide de tri opérationnel ;
- promouvoir une logistique adaptée au tri à la source ;
- former et motiver les équipes au tri, en présentant les avantages économiques et environnementaux associés à une gestion efficace des déchets.

Quoi qu'il en soit, la plupart des guides et textes techniques se réfèrent à l'application de normes [Bodet *et al.*, 2015] (présentées Chapitre 34). Trois exemples sont soulignés ci-après :

- cas de la Suisse : recommandations KBOB (Conférence de coordination pour les services de construction et les maîtres d'ouvrage publics) [ECO-BAU, 2007] ; guide ECO-CFC (fiches pour une construction verte, selon le code des coûts de la construction) [ECO-BAU, 2011] ; guide technique d'application pour l'utilisation des matériaux minéraux et produits de recyclage, 2016 [Puttallaz *et al.*, 2016] ;
- cas de l'Australie : guide pour l'utilisation du béton recyclé et des matériaux de maçonnerie, 2002 [Technical Guide HB 155-2002, 2002],
- cas des États-Unis : rapport technique de l'ACI « Elimination et réutilisation du béton durci », 2001 [ACI 555R-01, 2002].

Le guide technique d'application suisse pour l'utilisation des matériaux minéraux et produits de recyclage [Puttallaz *et al.*, 2016] (version nouvelle et étendue des recommandations KBOB [ECO-BAU, 2007]) détaille des recommandations pour le recyclage du béton (dans des bétons incorporant au moins 25 % de GBR, car sous ce seuil le béton est considéré comme « normal »). Environ 7 % de la production suisse de béton (1 million de m³) contient des granulats recyclés. Compte tenu des propriétés des bétons de GBR et de la terminologie définie dans le rapport technique SIA 2030 [SIA, 2010], deux types de béton de GBR sont proposés : BR-B (au moins 25 % de GBR) et BR-M (au moins 25 % de granulats mixtes recyclés). Les recommandations sont détaillées ci-dessous :

- le rôle de chacun des opérateurs (client ou autorité contractante, chef de projet, représentant autorisé, entrepreneur) est détaillé à chaque étape. Par exemple, le client définit les produits utilisés (BR-B, BR-M, etc.) ;
- des fiches techniques résument la plage d'utilisation selon la typologie (selon SIA 2030) et les caractéristiques des matériaux recyclés ;
- lorsque le client demande l'utilisation de béton de GBR (BR-B), les conditions particulières de la demande, formalisés dans les documents de la proposition, doivent contenir toutes les informations utiles ;
- les données environnementales et techniques doivent être conformes aux certifications.

Ces recommandations sont reprises dans les « fiches de construction écologique » du code des coûts de construction (Eco CFC [ECO-BAU, 2011]).

Par ailleurs, selon le rapport technique SIA 2030, la Suisse autorise l'ajout de granulats recyclés aux granulats naturels, et une déclaration n'est obligatoire que lorsque le taux de substitution dépasse 25 %. En effet, pour un taux de substitution en granulats recyclés inférieur à 25 %, le béton est considéré comme un béton normal « BN ». Cette disposition facilite grandement la réutilisation/recyclage d'une bonne partie des Déchets de Construction et de Démolition sur le marché suisse.

Le « Guide australien de l'utilisation du béton recyclé et des matériaux de maçonnerie » est basé sur l'expérience japonaise [Vivian, 2009 ; Technical Guide HB 155-2002, 2002]. Il définit les obstacles et les incitations au recyclage. Les principaux obstacles sont :

- la mise en place des infrastructures de recyclage nécessite un investissement initial important, alors que l'entrepreneur privé souhaite un rendement à court terme ;
- la réglementation et les textes actuels sont encore inadaptés à l'utilisation spécifique des matériaux recyclés ;
- un manque de retour d'expérience est constaté.

Certaines incitations sont proposées à destination des services publics et des entreprises. Il s'agit principalement de recommandations générales donnant des lignes directrices répondant aux principaux obstacles énumérés ci-dessus :

- définir un cadre juridique pour le recyclage dans les bétons de structure ;
- définir plus précisément une classification des granulats recyclés ;
- améliorer l'organisation et la gestion des entreprises en direction du recyclage ;
- avoir un meilleur contrôle par l'administration de la quantité des anciens bétons issus des chantiers de démolition ;
- réduire la quantité des déchets de béton en augmentant les coûts de mise en décharge ;
- soutien financier du gouvernement au recyclage afin de réduire les coûts d'investissement élevés.

Le rapport technique de l'ACI sur « l'élimination et la réutilisation du béton durci » dresse un état de l'art et propose des seuils spécifiques propres aux caractéristiques des granulats recyclés [ACI 555R-01, 2002] : les quantités maximales admissibles de plâtre, de mottes de terre et autres impuretés (masse volumique $< 1\,950\text{ kg/m}^3$) sont limitées à 10 kg/m^3 ; les quantités maximales admissibles de fragments (de tailles supérieures à 1,2 mm) de bitume, plastique, bois, papier et autres matériaux similaires sont limitées à 2 kg/m^3 . Pour la fabrication du béton, le rapport recommande d'éviter l'utilisation de la fraction recyclée 0-2 mm et de pré-saturer les granulats recyclés avant malaxage.

35.4. Contribution des certifications de qualité environnementale

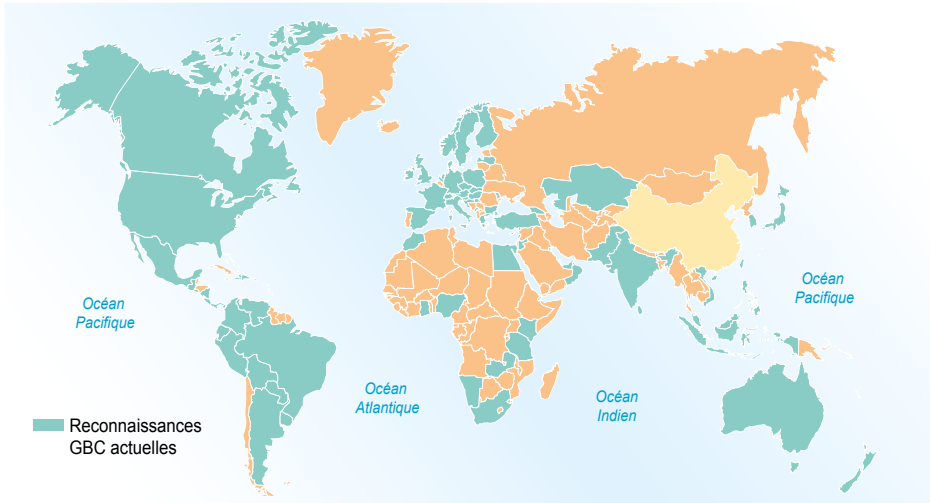
L'organisation internationale « Green Building Council » (GBC) est un mouvement avant-gardiste dans le secteur de la construction et de l'immobilier [Pillard *et al.*, 2018]. Le label « Green Building », qui peut être attribué à un bâtiment, dépend de considérations éthiques, économiques, sociétales, commerciales et environnementales. L'avantage pour le propriétaire est de prouver objectivement que sa construction a une valeur « durable » et que l'entreprise a respecté ses objectifs en matière de responsabilité sociétale.

La certification de la qualité environnementale sert à limiter l'impact environnemental des constructions, tout en améliorant le confort et la qualité de vie des occupants. Elle est basée sur l'optimisation du choix des matériaux et des équipements en fonction de leur impact (critères écologiques, optimisation énergétique, gestion rationnelle du bâtiment, etc.), avec des conditions préalables (ou des critères minimaux) pour chacun d'eux. L'évaluation est traitée par cible à atteindre, en attribuant une note (ou un niveau de performance, ou des crédits) à chacune. La certification est obtenue à partir d'une note globale pour le projet.

La procédure de qualité environnementale s'applique également aux phases de préparation, de mise en œuvre et de gestion des opérations.

35.4.1. Principales certifications

Plusieurs certifications de par le monde bénéficient de la reconnaissance GBC [GBC, 2018]. Cette organisation compte actuellement 72 membres (Figure 35.2), qui sont soit « établis », « émergents » ou « futurs ». Un certain nombre de ces certifications (indépendantes ou non du GBC), dont la plupart des certifications européennes, ont été analysées par [Pillard *et al.*, 2018], dans le but d'identifier des leviers permettant de recycler les déchets de construction dans le béton (Tableau 35.3).

Figure 35.2Membres du « Green Building Council » dans le monde⁸**Carte mondiale de 2016 hors Chine****Tableau 35.3**

Certifications de qualité environnementale analysées

Label	Pays	Année	GBC
NFHQE [CSTB, 2015]	France	1996	Oui
HQE-BD Bâtiment durable [CERTIVEA, 2016]	France	2016	Oui
BDM & BDF Bâtiment durable [BDF, 2017 ; BDM, 2008]	France, Régions Méditerranée et Île de France	2008/2017	Non
BREEAM [BREEAM, 2016]	Royaume-Uni + plusieurs adaptations dans le monde	1990	Royaume-Uni : partenariat Autres pays : oui
DGNB [DGNB, 2016]	Allemagne	2008	Oui
VERDE [VERDE, 2016]	Espagne	2002	Oui
VALIDEO [VALIDEO, 2001]	Belgique	2011	Non
MINERGIE-ECO [MINERGIE, 2016]	Suisse	2008	Non
LEED [LEED, 2017]	États-Unis	1998	Oui

8. MENA : Middle East and North Africa.

35.4.2. Certifications incitatives

Tout d'abord, l'état de l'art réalisé [Pillard *et al.*, 2018] a révélé la grande diversité des contextes socio-économiques de la construction en Europe.

Une analyse comparative des certifications a aussi mis en évidence qu'il existait une forte volonté de développer l'économie circulaire. Cependant, le plus souvent, sa mise en œuvre consiste en une approche de performance globale (comme par exemple l'ACV⁹ de la construction ou le choix de la source des matériaux) ou en une simple incitation au tri des déchets en amont. Il n'existe aucune incitation explicite à utiliser des granulats recyclés (voir Tableau 35.4.), seul le label « MINERGIE ECO » prend en compte l'utilisation d'une quantité minimale de granulats recyclés dans le béton (voir 35.4.3). Les labels BREEAM et VERDE proposent également quelques mesures incitatives, mais avec peu de crédits en rapport.

Tableau 35.4

Certifications incitatives « qualité environnementale »

Incitation à l'accroissement du tri des déchets et du réseau de valorisation (en amont)	BREEAM-LEED-NFQE-HQE BD-DGNB VALIDEO-BDM
Incitation par l'évaluation du cycle de vie Matériaux/réutilisation responsable	BREEAM-LEED-HQE BD-DGNB BD-DGNB VERDE-BDM & BDF
Incitation directe et explicite par l'utilisation de déchets de béton dans le béton	BREEAM (une seule sous-section) MINERGIE-ECO (c'est un critère d'exclusion) VERDE (peu de points/crédits accordés)

35.4.3. Incitations directes à l'utilisation de déchets de béton dans le béton

Ci-après sont reprises les propositions incitatives pour l'utilisation des « déchets » de béton dans le béton, pour les trois labels suivants :

- BREEAM : le sous-chapitre « Granulats recyclés dans le béton » de la rubrique « Déchets » précise que si la réglementation nationale de la construction permet, pour un usage donné, d'utiliser un béton contenant jusqu'à 50 % de granulats recyclés, alors un crédit exemplaire est obtenu lorsque le béton utilisé contient au moins 35 % de granulats recyclés. Lorsqu'il n'y a pas de niveau réglementaire maximum, l'exigence de 50 % doit être respectée pour que ce crédit soit accordé. Il faut noter toutefois que le poids du sous-chapitre « Déchets » n'est que de 7 dans la note globale de 119, et que sur ces 7 crédits, seul 1 crédit traite de l'utilisation de granulats recyclés dans le béton.

9. Analyse du cycle de vie.

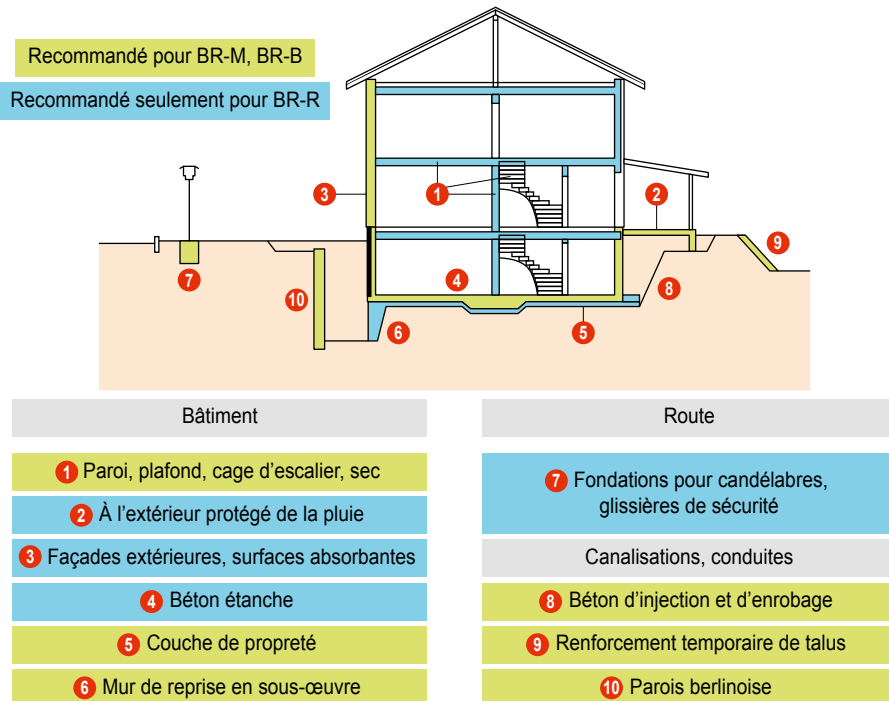
- **VERDE** : un premier critère (dans la rubrique « Ressources naturelles ») est basé sur le calcul du pourcentage que représente le coût des matériaux recyclés par rapport au coût total des matériaux utilisés, et ce quels que soient les matériaux recyclés. L'objectif de cette approche est basé sur le fait que l'utilisation de matériaux recyclés doit se faire dans une démarche globale, de sorte que plus les coûts sont élevés, moins l'utilisation est intéressante. Deux seuils sont retenus : 10 % et 20 %. Le sous-chapitre « Béton recyclé d'une résistance n'excédant pas 40 N/mm² » présente un critère plus incitatif. Cette limitation implique toutefois que les granulats recyclés ne peuvent être retenus pour les bétons performants (BHP). Elle permet d'obtenir des crédits qui peuvent atteindre 4 points, sur un total de 40 points soit, dans le meilleur des cas, 10 % de la note globale.
- **MINERGIE-ECO** : ce label, créé en 2006 en Suisse, complète la certification MINERGIE (qui n'abordait pas la question du choix des matériaux et des impacts environnementaux). Il incite à réduire l'impact d'un bâtiment sur l'environnement et à préserver les ressources, de la construction à

Figure 35.3

Utilisation possible des bétons de GBR, MINERGIE-ECO [MINERGIE, 2016]

où BR-R = Béton recyclé à base de GBR ;

BR-M : Béton recyclé à base de granulats mixtes recyclés¹⁰



10. BR-R (au moins 25 % de GBR) et BR-M (au moins 25 % de granulats mixtes recyclés).

la démolition. Les candidats qui ne respectent pas les critères relatifs au recyclage du béton ne peuvent prétendre de facto au label MINERGIE-ECO. La carence en granulats naturels dans plusieurs cantons et le prix compétitif des matériaux recyclés justifient l'existence de cette clause. Parmi les critères proposés, les plus incitatifs sont « matières premières largement disponibles » et « part plus élevée de matériaux recyclés ». D'autres critères concernent la disponibilité locale de la ressource. À ce titre, pour qu'une opération soit labellisée MINERGIE-ECO, il faut que 50 % des parties en béton de la construction soient en béton recyclé (désignés par « BR-B », selon les spécifications techniques SIA 2030). La Figure 35.3 montre les parties de la structure où il est possible d'utiliser des bétons de GBR. Par contre, si la distance entre la centrale à béton et le chantier dépasse 25 km ou si le coût du béton de GBR est beaucoup plus élevé que celui du béton conventionnel, une exception peut être accordée.

35.5. Incitations : expériences et études prospectives

Parmi les incitations identifiées au paragraphe 35.3 « Initiatives et guides locaux », certaines ont été projetées dans le futur afin de simuler leur effet potentiel sur les quantités de granulats recyclés qui pourraient être utilisées dans le béton.

Par ailleurs, pour mesurer l'intérêt de ces mesures, les conclusions de l'étude ADEME [ADEME, 2016b] sur l'identification des freins et des leviers pour la réutilisation des produits et matériaux de construction ont été rappelées, ainsi que les mesures politiques adoptées en Suisse.

35.5.1. Impact des mesures de politique publique dans le contexte français

Le recyclage du béton dans le béton présente un réel intérêt, mais cette solution est encore peu exploitée. Les politiques publiques apparaissent donc comme un vecteur utile pour stimuler la demande en « GBR compétitifs » [Bougrain *et al.*, 2017].

Dans ce cadre, en complément des incitations présentées précédemment, plusieurs actions de politique publique ont été simulées, sur la base des données statistiques issues des opérations de construction où apparaît la part des constructions dévolue au béton. Les incitations proposées, qui s'inscrivent dans le cadre d'une approche de type économie circulaire, s'intéressent à la fois à l'offre et à la demande (mise sur le marché) :

- pour l'offre, il s'agit de la création d'un prêt à taux zéro pour l'achat de matériels et d'équipements de recyclage, et de l'instauration d'une taxe sur les mises en décharges/site de stockage ;

- pour la demande, les deux actions préconisées sont l'ajout d'un critère dans la certification environnementale HQE et l'instauration d'un taux de GBR dans les ouvrages relevant des marchés publics (s'ils sont situés à moins de 25 km d'une plateforme de recyclage).

35.5.1.1. Droits de décharge pour les DCD

L'intérêt d'une taxe serait de réduire le poids du critère économique, de renforcer l'intérêt d'un tri en amont et de mieux valoriser les déchets de chantier. Dans l'état actuel des connaissances, l'effet bénéfique d'une taxe d'enfouissement demeure difficile à quantifier, car elle peut aussi générer des effets induits contreproductifs (décharges sauvages, transport des déchets vers les pays voisins). L'impact sur l'équilibre entre prix des granulats naturels et prix des granulats recyclés est difficile à évaluer car il dépend de la « stratégie » des acteurs locaux et à la disponibilité des matériaux. D'autre part, tant que les granulats naturels seront moins chers à produire et/ou que leur approvisionnement ne dépend pas d'un transport sur de longues distances, les producteurs de béton ne seront pas incités à utiliser des GBR et donc à produire des bétons de GBR. En conclusion, les incitations ou les pénalités fiscales sont des outils classiques de politique publique, mais leur bénéfice vis-à-vis du recyclage du béton reste à démontrer.

35.5.1.2. Prêts à taux zéro pour l'achat de matériels sur les plateformes traitant les déchets

La création d'un prêt à taux zéro pour l'achat de matériels de recyclage n'aurait qu'un impact limité, car les entreprises n'investissent qu'en fonction de la demande.

35.5.1.3. Intégration d'indicateurs favorisant l'utilisation des GBR dans le référentiel HQE

La création d'un nouveau thème comme « Intégration des matières premières secondaires » dans le système HQE BD actuel, qui comprend déjà 28 thèmes, pourrait favoriser la demande. En fait, un tel critère existe déjà, mais il n'est pas activé. Par ailleurs, le développement d'un marché « béton de GBR de qualité » serait au départ essentiellement parisien, vu la prédominance de la Région Ile-de-France dans les projets HQE tertiaires (bien que, dans un avenir proche, un plus grand nombre de projets HQE soit annoncé sur l'ensemble du territoire). L'étude [Bougrain *et al.*, 2017] s'est intéressée à la quantité de GBR qui pourrait être utilisés dans les bétons à partir d'une nouvelle disposition HQE de cette nature (Tableau 35.5). Les besoins paraissent plutôt limités au regard des ressources existantes (voir chapitre 29). En revanche, l'impact symbolique serait important. De plus, les cas où une carence en GBR empêcherait la mise en œuvre de cette application sont rares.

Il faut noter que les estimations ont été faites à partir de nombreuses hypothèses, parmi lesquelles la part des constructions réalisées en béton dans

les certifications HQE, la localisation des projets, le ratio volume de béton/surface du bâtiment, et le taux de GBR dans le béton, etc.

Tableau 35.5

Estimation des quantités de GBR pouvant être utilisés par une incitation HQE [Bougrain *et al.*, 2017]

Hypothèse GBR dans le béton	Masse de gravillons (tonne/année)		Masse de sable (tonne/année)	
	Estimation basse	Estimation haute	Estimation basse	Estimation haute
10 % de gravillons	52 471	72 504	0	0
≤ 30 % de gravillons	98 130	131 256	0	0
≤ 45 % de gravillons + 15 % de sable	132 375	175 319	22 830	29 376

35.5.1.4. Marchés publics écologiques exigeant un pourcentage de granulats recyclés dans leurs appels d'offres (lorsque les distances de transport ne dépassent pas 25 km)

L'imposition d'un taux de GBR dans les marchés publics de bâtiment (pour lesquels les centrales à béton sont situées à moins de 25 km d'une plateforme de recyclage) est la mesure qui aurait l'impact le plus fort et le mieux assuré. Cette politique enverrait un signal crédible à tous les partenaires des marchés de déconstruction/reconstruction. En effet :

- la garantie d'un tel débouché pérenne encouragerait les plateformes de recyclage à investir dans des équipements permettant un meilleur traitement des granulats ;
- avec de nouvelles perspectives de récupération, les entreprises de déconstruction et les maîtres d'ouvrage seraient plus conscients de la nécessité d'un meilleur tri au stade de la déconstruction. Les volumes de matériaux arrivant aux plateformes de recyclage seraient alors accrus, ce qui profiterait à l'ensemble de la profession.

Bien entendu, le prescripteur devra vérifier au cas par cas la disponibilité d'une ressource locale en GBR à proximité du chantier, avant d'imposer un certain taux de substitution (voir chapitre 33). Par ailleurs, la mise en œuvre de cette politique devrait se faire au niveau régional, étant donné que la valorisation des déchets est un problème de gestion à échelle locale.

Tableau 35.6

Estimation des quantités de GBR pouvant être utilisés dans les marchés publics relevant de mesures incitatives [Bougrain *et al.*, 2017]

Hypothèse GBR dans le béton	Masse de gravillons (tonne/année)		Masse de sable (tonne/année)	
	Estimation basse	Estimation haute	Estimation basse	Estimation haute
10 % de gravillons	0,8	0,9	0	0
≤ 30 % de gravillons	2,5	2,7	0	0
≤ 45 % de gravillons + 15 % de sable	3,8	4,1	0,8	0,9

35.5.1.5. Meilleure incitation

En conclusion, les actions politiques pouvant agir sur l'offre présentent moins d'intérêt que celles pouvant agir sur la demande.

Pour l'offre, des taxes de mise en décharge élevées ou un prêt à taux zéro combiné à une demande croissante en GBR n'auraient qu'une faible efficacité.

Pour la demande, le levier des marchés publics écologiques semble être la voie la plus efficace. Certes, imposer un faible pourcentage de granulats recyclés dans les marchés publics des bâtiments n'aurait en soi qu'un impact limité sur le marché, mais cette mesure jouerait un rôle déterminant pour amorcer le marché des bétons de GBR. Les plateformes de recyclages seraient alors incitées à investir dans des équipements de concassage et de criblage, et proposeraient ainsi des GBR de qualité pouvant être utilisés dans les bétons de structure.

35.5.2. Cas de la Suisse

Le Conseil des États suisse a créé une commission « déchets et ressources minérales ». Des représentants des départements cantonaux concernés et des associations privées ont ensuite été chargés d'organiser la gestion des déchets minéraux et leur recyclage. Trois leviers ont été identifiés [Puttallaz *et al.*, 2016] :

- encourager l'utilisation de matériaux recyclés sur le marché de la construction ;
- attribuer à une région particulière, à travers ses chantiers, un rôle pilote dans la mise en œuvre du recyclage des matériaux ;
- sensibiliser les acteurs du secteur de la construction pour supprimer progressivement les barrières liées au recyclage des matériaux, en renforçant le dialogue entre les différentes entités, et en développant et en fournissant des outils pragmatiques pour la mise en œuvre du recyclage des matériaux.

35.5.3. Feuille de route pour les mesures incitatives

Dans le cadre de la réduction des émissions dans l'air, le ministère de l'Environnement donne actuellement la priorité aux projets propres, ayant une bonne gestion des déchets sur chantier, avec des circuits courts. Par exemple, une feuille de route a été publiée le 13 avril 2018 détaillant les mesures visant à s'assurer que les acteurs territoriaux s'approprient les exigences de performance en matière de qualité de l'air, en fonction du contexte [DICOM-DGPR]. Ces mesures prévoient d'améliorer la gestion des déchets de construction en encourageant plus particulièrement leur réutilisation et/ou leur recyclage sur le site même de la déconstruction ou à proximité. Même s'il s'agit d'une incitation générale, cette mesure pourrait changer les pratiques locales des chantiers de construction.

Par ailleurs, le gouvernement a élaboré une feuille de route sur l'économie circulaire, afin de mettre en œuvre rapidement la loi de transition énergétique. Dans ce contexte, 50 mesures ont été publiées en avril 2018, comprenant des objectifs et des incitations pour réduire les déchets, améliorer le recyclage et économiser les matières premières. Aujourd'hui, les principales directives ont été fixées pour encourager le dialogue entre les acteurs et s'assurer que les mesures les plus appropriées sont prises dans le but de changer le modèle économique. Par exemple :

- anticiper la gestion de la déconstruction (amélioration du diagnostic des déchets) pour parvenir à une collecte et à un recyclage des Déchets de Construction et de Démolition plus efficaces ;
- un rôle accru des observatoires locaux pour une gestion plus efficace des déchets et des matières premières ;
- adapter la fiscalité pour rendre la valorisation des déchets moins coûteuse que leur élimination (TVA, TGAP [taxe générale sur les activités polluantes]).

Ces mesures visent clairement à optimiser la récupération matérielle de tous les déchets minéraux, y compris le béton déconstruit.

35.6. Conclusions : résultats RECYBETON

Dans la continuité du Projet National RECYBETON, de prochains travaux devront s'atteler à l'amélioration des textes (techniques et/ou réglementaires) traitant des granulats recyclés. Le chapitre 34 s'est intéressé aux aspects normatifs, en identifiant les autorités et les textes concernés. En complément, le présent chapitre a identifié les barrières et les opportunités apportées par les labels environnementaux, qui préfigurent les futures réglementations.

À l'heure où les considérations environnementales deviennent un enjeu majeur de notre société (économie circulaire, label E + C- [Bâtiment à Énergie Positive et Réduction Carbone]), les documents concernés sont le code de l'environnement et la réglementation des marchés publics de travaux, en

relation avec la réglementation européenne (par exemple la directive 2008/09/CE relative aux déchets).

Pour les incitations volontaires, les méthodes de certification actuelles n'accordent que peu de poids au critère « utilisation des GBR dans le béton » dans l'évaluation globale. Ce critère en faveur du recyclage mériterait cependant d'être mieux pris en compte au moment du jugement des offres. C'est donc un aspect à renforcer. De même, l'introduction de critères plus explicites dans la certification NF HQE, tels que ceux mis en œuvre dans MINERGIE-ECO (Suisse), serait aussi une voie d'amélioration à envisager. Enfin, l'introduction de clauses imposant le recyclage dans les marchés publics est probablement le moyen le plus efficace pour favoriser le processus de recyclage du béton dans le béton.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tous les membres du Projet National RECYBETON qui ont contribué à l'analyse des nombreux textes réglementaires et des certifications.



Conclusion

François de Larrard, Horacio Colina

Après un examen exhaustif de la plupart des aspects concernant le recyclage des bétons, il apparaît que cette pratique n'est ni nouvelle, ni techniquement difficile. Avec des granulats de béton recyclé (GBR) appropriés, **le recyclage à un taux limité peut être effectué en toute confiance**, conformément à l'état actuel de la normalisation (voir par exemple la norme EN 206). En fait, le principal obstacle est plutôt d'ordre économique. Concasser des morceaux de béton armé déconstruits n'est pas moins cher que concasser des blocs de roche naturelle, de sorte que le coût de production des GBR est au moins aussi élevé que celui des granulats naturels. On peut donc affirmer que le recyclage du béton se développera en priorité là où le coût des granulats naturels devient prohibitif, en raison du transport sur de longues distances et/ou d'une pénurie anticipée de granulats naturels locaux. Cependant, l'industrie de la construction est un grand navire qui a besoin d'incitations importantes pour s'écarter de sa route. Pour relever pleinement le défi de l'économie circulaire, il faudra donc souvent recourir à des politiques publiques orientées (marchés publics écologiques, taxes, incitations, etc.).

Le Projet National RECYBETON a démontré la faisabilité du recyclage du béton dans le béton à différents taux de substitution, allant de 0 à 100 % de la phase granulaire du béton. Cependant, lorsque les grains de GBR sont encore recouverts de leur mortier d'origine, leur incorporation nécessite plus de ciment et plus d'adjuvants, du moins si le taux de substitution est supérieur à 30-40 %, ce qui compromet la viabilité du procédé. Heureusement, un pourcentage plus faible suffirait à absorber la totalité du flux des GBR dans l'industrie du béton. Toutefois, un taux de recyclage élevé peut être justifié dans des cas particuliers, par exemple lorsqu'un grand projet de construction est planifié à proximité d'un important chantier de démolition. De plus, à l'avenir, un traitement plus efficace des GBR pourrait permettre une meilleure séparation entre le granulat d'origine et sa matrice cimentaire, fournissant à l'industrie du béton un granulat rénové conservant toutes ses caractéristiques d'origine.

En termes de progrès scientifiques et techniques, le Projet National RECYBETON a apporté ou confirmé une moisson de résultats intéressants. La faisabilité de l'incorporation des sables de GBR dans le procédé de fabrication du ciment a été démontrée. Une évaluation globale de toutes les propriétés techniques du béton de GBR a été effectuée, montrant que même si les GBR modifient légèrement le matériau en raison de leur porosité, la plupart des spécifications communes pour le béton de structure peuvent être satisfaites avec des GBR,

même à un taux de substitution élevé. Sur le plan pratique, il convient de noter que les cinq chantiers expérimentaux réalisés se sont déroulés sans difficultés, sans avoir besoin de changer les pratiques habituelles et sans désordres identifiés (à ce jour). De même, la plus ancienne expérience rapportée, réalisée en 2005 (voir chapitre 16) a montré un comportement satisfaisant en dépit d'un taux de recyclage proche de 100 %.

Bien sûr, l'histoire de la technologie du béton n'est pas terminée, notamment celle du béton de GBR. Les besoins de recherche dans différents domaines ont déjà été identifiés dans la plupart des chapitres de ce livre. Selon les auteurs, si l'objectif est d'assurer un taux de recyclage élevé à moyen terme, les sujets les plus importants sont les suivants :

- la caractérisation des GBR devrait être améliorée (certaines méthodes développées à l'origine pour les granulats naturels montrent leurs limites avec les GBR) ;
- des méthodes plus efficaces et plus rentables pour le traitement des GBR sont nécessaires, quel que soit l'objectif (détection en ligne des contaminants, tri des éléments étrangers, séparation des granulats et du mortier) afin de permettre un recyclage à haut niveau tout en assurant des dosages constants en liant et en adjuvants ;
- des méthodes d'amélioration devraient être mises au point pour les sables de GBR, dont l'incorporation reste plus préjudiciable que celle des gravillons de GBR, vis-à-vis de la plupart des propriétés du béton ;
- la carbonatation accélérée des GBR est actuellement à l'étude comme moyen d'améliorer le bilan CO₂ des bétons de GBR¹. Ainsi, l'utilisation de combustibles alternatifs dans la production de ciment et la carbonatation de tout le béton recyclé pourrait théoriquement transformer le béton en une technologie neutre en carbone ;
- en termes de propriétés mécaniques des bétons de GBR, le fluage et la fatigue en compression nécessitent plus d'investigations (essais et modélisation) ;
- les essais structuraux des éléments armés en béton de GBR nécessitent également des efforts supplémentaires, par exemple dans le domaine du dimensionnement au cisaillement, du comportement au poinçonnage des dalles, etc. ;
- la fiabilité des structures en béton de GBR devrait être étudiée, peut-être avec une réévaluation des coefficients de sécurité dans les codes de calcul lorsque les taux de GBR sont plus élevés que ceux déjà acceptés par les normes ;
- la durabilité des bétons à faible taux de recyclage est actuellement abordée dans le cadre d'une approche prescriptive, comme pour les bétons de granulats naturels. Pour les taux de recyclage plus élevés, elle sera garantie par des méthodes basées sur la performance², actuellement développées pour tous les bétons de structures. Cependant, le béton de GBR demande des études spécifiques en ce qui concerne les teneurs acceptables en espèces exotiques.

1. Ce sujet est pris en compte dans le Projet National « FASTCARB ».

2. Étudiée actuellement dans le cadre du Projet National « PERFDUB ».

Par rapport aux normes actuelles prenant en compte les GBR, des quantités plus élevées de certaines substances sont probablement acceptables, mais les expériences manquent encore pour pouvoir « ouvrir davantage la porte ».

Mais les résultats de recherche disponibles permettent déjà de mettre à jour la plupart des normes et codes de calcul, afin de favoriser la boucle du recyclage du béton dans le béton.

Paris, avril 2018.



Bibliographie

- 305/2011/CE, 2011] Règlement Produits de Construction – RPC 2011, Règlement n° 305/2011 du Parlement Européen et du Conseil du 9 mars 2011 établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du Conseil (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), 2011.
- [Abbas *et al.*, 2007] Abbas A., Fathifazl G., Isgor OB., Razaqpur AG., Fournier B., Foo S., Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates, *Journal ASTM International*, 5(1), 2007.
- [Abbas *et al.*, 2009] Abbas A., Fathifazl G., Fournier B., Isgor OB., Zavadil R., Razaqpur AG., Foo S., Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis, *Materials Characterization*, 60(7), 716-28, 2009.
- [Abbas et Fathifalz, 2009] Abbas A., Fathifazl G., Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method, *Cement and Concrete Composites*, 2009.
- [ACI 224R-01, 2001] ACI 224R-01, Control of Cracking in Concrete Structures Reported by ACI Committee 224, 2001.
- [ACI 318-11 ACI 318R-11, 2011] ACI Committee 318, Building code requirements for structural concrete and commentary, American concrete institute, Farmington Hills, 2011.
- [ACI 555R-01, 2002] Removal and reuse of hardened concrete, American Concrete Institute, Report, 555R-01, USA, 2002, *ACI Materials Journal*, 99, 3, 300-325, 2002.
- [ACI E1-07, 2007] Education Bulletin E1-07 : Aggregates for concrete, American Concrete Institute, USA, 2007.
- [Adams, 2012] Adams M. P., Alkali-Silica Reaction in concrete containing Recycled Concrete Aggregates, Thesis for the degree of Master of Science in Civil Engineering, Oregon State University, 148 p., 2012.
- [ADEME, 2011a] Analyse technico-economique de 39 plateformes françaises de tri/valorisation des déchets du BTP, synthèse réalisée pour le compte de l'Ademe par Treize Developpement et Pöyry, 25 p., 2011.
- [ADEME, 2011b] Les matériaux de recyclage en Languedoc-Roussillon. Note de Synthèse, 2011.
- [ADEME, 2012] Plans de prévention et de gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics – élaboration et suivi, Cahier Technique n° 7646, 120 p., 2012.
- [ADEME, 2016a] Déchets, Chiffres clés édition 2016, ADEME, 2016.
- [ADEME, 2016b] Indentification des freins et des leviers au réemploi de produits et matériaux de construction, Rapport Technique Final, 149 p., 2016.
- [ADEME] <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique-dechets-du-batiment-201412.pdf>.

- [AFGC, 2007] Concrete design for a given structure service life – Durability management with regard to reinforcement corrosion and alkali-silica reaction – State of the art and guide for the implementation of a predictive performance approach based upon durability indicators, AFGC, Paris, 2007.
- [Aït Alaiwa et Lavaud, 2014] Aït Alaiwa A., Lavaud R., Validité des normes d'essais sur les granulats recyclés, Rapport RECYBÉTON n° R/14/RECY/010, 2014.
- [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2002] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, *Cement Concrete Composite*, 24(2), 269-279, 2002.
- [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007] Ajdukiewicz A.B., Kliszczewicz A.-T., Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete, *Journal of Advances in Concrete Technology*, 5, 259-273, 2007.
- [Akbarnezhad *et al.*, 2011] Akbarnezhad A., Ong K.C.G., Zhang M.H., Tam C.T., Foo T.W.J., Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates, *Construction and Building Material*, 25, 2011.
- [Akbarnezhad *et al.*, 2013a] Akbarnezhad A., Ong K.C.G., Zhang M.H., Tam C.T., Acid Treatment Technique for Determining the Mortar Content of Recycled Concrete Aggregates, *Journal of Testing and Evaluation*, 41, 2013.
- [Akbarnezhad *et al.*, 2013b] Akbarnezhad, A., Ong, K.C.G., Tam, C.T., Zhang, M.H., Effects of the Parent Concrete Properties and Crushing Procedure on the Properties of Coarse Recycled Concrete Aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 1795-1802, 2013.
- [Akbarnezhad et Ong, 2013] Akbarnezhad A., Ong K.C.G., Separation processes to improve the quality of recycled concrete aggregates (RCA), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Elsevier, 2013.
- [Al Bayati *et al.*, 2016] Al Bayati H.K.A., Das P.K., Tighe S.L., Baaj H., Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 112, 284-298, 2016.
- [Alhozaimy, 2009] Alhozaimy AM., Effect of absorption of limestone aggregates on strength and slump loss of concrete. *Cement and Concrete Composite*, 31, 470-3, 2009.
- [Almusallam *et al.*, 1998] Almusallam A., Maslehuddin M., Abdul-Waris M., Khan M., Effect of Mix Proportions on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete in Hot Environments. *Construction Building Materials*, 12, 353-358, 1998.
- [Ambrós *et al.*, 2017] Ambrós W.M., Sampaio C.H., Cazacliu B.G., Miltzarek G.L., Miranda L.R., Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste, *Waste Management*, Available online, 2017.
- [Amorim *et al.*, 2012] Amorim P., de Brito J., Evangelista L., Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability, *ACI Materials Journal*, 2012.
- [Anis *et al.*, 1990] Anis A. M., Farid B.J., AL-Janabi A.I.M., Stress-Strain relationship for concrete in compression cade of local materials, *Engineering Sciences Journal*, 2, 1319-1047, 1990.
- [Arezoumandi *et al.*, 2014] Arezoumandi M., Smith A., Volz J.S., Khayat K.H., An experimental study on shear strength of reinforced concrete beams with 100 % recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 53, 612-620, 2014.

- [Arezoumandi *et al.*, 2015] Arezoumandi M., Smith A., Volz J.-S., Khayat K.-H. An experimental study on shear strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate, *Engineering structures*, 88, 154-162, 2015.
- [Arjunan et Kumar, 1994] Arjunan P., Kumar A., Rapid techniques for determination of free lime and free magnesia in cement clinker and portlandite in hydrates, *Cement and Concrete Research*, 24, 2, 343-352, 1994.
- [Arora et Singh, 2015] Arora S., Singh S. P., Flexural Fatigue Analysis of Concrete made with 100% Recycled Concrete Aggregates, *Journal of materials and engineering structures*, 2, 77-89, 2015.
- [Arora et Singh, 2016] Arora S., Singh S. P., Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% Coarse Recycled Concrete Aggregates, *Construction and Building Materials*, 102, 782-791, 2016.
- [Artoni *et al.*, 2017] Artoni R., Cazacliu B., Hamard E., Cothenet A., Parhanos R.S. Resistance to fragmentation of recycled concrete aggregates, *Materials and Structures*, 50, 11, 2017.
- [Arulrajah *et al.*, 2012] Arulrajah A., Piratheepan J., Disfani M. M., Bo M. W., Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications, *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, 25, 8, 1077-1088, 2012.
- [AS 1141, 1974] Australian Standards, Methods for testing and sampling aggregates, Australia, 1974.
- [Asakura *et al.*, 2010] Asakura H., Watanabe Y., Ono Y., Yamada M., Inoue Y., Alfaro A.M., Characteristics of fine processed construction and demolition waste in Japan and method to obtain fines having low gypsum component and wood contents, *Waste Management and Research*, 28, 634-646, 2010.
- [Asif *et al.*, 2007] Asif M., Muneer T., Kelley R., Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland, *Building and Environment*, 42, 3, 1391-1394, 2007.
- [Aslani et Nejadi, 2012] Aslani F., Nejadi S., Mechanical properties of conventional and self-compacting concrete: An analytical study, *Construction and Building Materials*, 36(6), 330-347, 2012.
- [Assié, 2004] Assié S., Durabilité des bétons auto-plaçants, INSA-Toulouse, Thèse de doctorat, 2004.
- [ASTM C127, 2015] Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate, ASTM, USA, 2015.
- [ASTM C128, 2015] Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate, ASTM, USA, 2015.
- [ASTM C192, 2007] Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM, USA, 2007.
- [ASTM C294, 2012] Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates, ASTM, USA, 2012.
- [ASTM C457, 2012] Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [ASTM C666/C666M, 2015] Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM, USA, 2015.

- [ASTM C88, 2013.] Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, ASTM, USA, 2013.
- [Aubert *et al.*, 2009] Aubert J.E., Escadeillas G., Leklou N., Expansion of five-year-old mortars attributable to DEF: relevance of the laboratory studies on DEF? *Construction and Building Materials*, 23, 12, 3583-3585, 2009.
- [Aubert *et al.*, 2013] Aubert J.E., Escadeillas G., Leklou N., Five-year monitoring of curing solutions of heat-cured mortars affected by delayed ettringite formation, *Advances in Cement Research*, 25, 3, 155-163, 2013.
- [B3131, 2006] ASI, ÖNORM B 3131: Gesteinskörnungen für Beton – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620, Austria, 2006.
- [B3140, 2013] ASI, ÖNORM B 3140: Rezyklierte Gesteinskörnungen für das Bauwesen. Austria, 2013.
- [BA 99] Boverket, Swedish manual on the use of recycled building materials BÅ 99, Sweden, 1999.
- [Baalbaki *et al.*, 1991] Baalbaki W., Benmokrane B., Chaallal O., Aitcin P-C., Influence of Coarse Aggregate on Elastic Properties of High-Performance Concrete, *ACI Materials Journal*, 88(5), 499-503, 1991.
- [Babu *et al.*, 2014] Babu V.S., Mullick A.K., Jain K.K., Singh P.K., Strength and durability characteristics of high-strength concrete with recycled aggregate – influence of mixing techniques, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 3, 2014.
- [Bach, 2013] Bach H., Evaluation of attrition tests for railway ballast. Graz University of Technology, 2013.
- [Bai et Sun, 2010] Bai W.-H., Sun B.-X., Experimental study on flexural behavior of recycled coarse aggregate concrete beam. *Applied Mechanics and Materials*, 29, 543-548, 2010.
- [Bairagi *et al.*, 1993] Bairagi N-K., Kishore R., Pareek V.-K., Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates, *Conservation and Recycling*, 9(1-2), 109-120, 1993.
- [Banfill, 2011] Banfill P. F. G., Additivity Effects in the Rheology of Fresh Concrete Containing Water-Reducing Admixtures, *Construction and Building Materials*, 25(6), 2955-60, 2011.
- [Barbudo *et al.*, 2012a] Barbudo A., Galvín A.P., Agrela F., Ayuso J., Jiménez J.R., Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes, *Waste Management*, 32, 6, 1229-1235, 2012.
- [Barbudo *et al.*, 2012b] Barbudo, A., F. Agrela, J. Ayuso, J. R. Jiménez, C. S. Poon. Statistical Analysis of Recycled Aggregates Derived from Different Sources for Sub-Base Applications, *Construction and Building Materials*, 28, 1, 129-38, 2012.
- [Barles, 2010] Barles S., Society, energy and materials: the contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues, *Journal of Environmental Planning and Management*, 4, 439-455, 2010.
- [Barles, 2014] L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés : l'apport de l'analyse des flux de matières, *Développement durable et territoires*, 5, 1, 2014.

- [Barnes *et al.*, 1978] Barnes, M.S., Diamond, S., Dolch, W.L., The contact zone between portland cement paste and glass aggregate surfaces, *Cement and Concrete Research*, 8, 233-244, 1978.
- [Baroghel-Bouny *et al.*, 2002] Baroghel-Bouny V., Chaussadent T., Croquette G., Divet L., Gawsewitch J., Godin J. Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons, Méthode d'essai N° 58, Paris, LCPC, 2002.
- [Baron-Lesage, 1976] Baron J., Lesage R., La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier, rapport de recherche LPC n° 64, ed LCPC, 1976.
- [Barra et Vazquez, 1996] Barra M., Vazquez E., The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete, *Waste Management*, 16, (1-3), 113-117, 1996.
- [Bartos, 1992] Bartos P., *Fresh Concrete: Properties and Tests*. Elsevier, Amsterdam, 1992.
- [Bažant et Chern, 1985] Bažant Z.P., Chern J.C., Concrete Creep at Variable Humidity: constitutive law and mechanism, *Materials and Structures*, 18, 103, 1-20, 1985.
- [Bazant et Kaplan, 1996] Bazant Z.P., Kaplan M.F., *Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models*, Longman, 1996.
- [BDF, 2017] BDF, *La démarche Bâtiment Durable Franciliens*, 2017.
- [BDM, 2008] BDM, *La démarche Bâtiment Durable Méditerranéens*, 2008.
- [Behera *et al.*, 2014] Behera M., Bhattacharyya S.K., Minocha A.K., Deoliya R., Maiti S., Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – a breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, *Construction and Building Materials*, 68, 501-516, 2014.
- [Belén *et al.*, 2011] Belén G-F., Martinez-Abella F., Carro Lopez D., Seara-Paz S., Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate, *Construction and Building Materials*, 25(5), 2335-2342, 2011.
- [Belin *et al.*, 2014] Belin P., Habert G., Thiery M., Roussel N., Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates, *Materials and Structures*, 47, 1451-1465, 2014.
- [Bello *et al.*, 2017] Bello L., Garcia-Diaz E., Rougeau P., An original test method to assess water absorption/desorption of lightweight aggregates in presence of cement paste, *Construction and Building Materials*, 154, 752-762, 2017.
- [Bello, 2014] Bello L., *Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons légers autoplaçants durables*, Université de Montpellier II, ED I2S, 2014.
- [Benboudjema et Torrenti, 2008] Benboudjema F., Torrenti J.-M., Early age behaviour of concrete nuclear containments, *Nuclear Engineering and Design*, 238(10), 2495-2506, 2008.
- [Bendimerad *et al.*, 2014] Bendimerad A. Z., Rozière E., Loukili A., Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates, *Material and Structures*, 48, 3557-3569, 2015.
- [Bendimerad *et al.*, 2016] Bendimerad A. Z., Rozière E., Loukili A., Plastic Shrinkage and Cracking Risk of Recycled Aggregates Concrete, *Construction and Building Materials*, 121, 733-745, 2016.

- [Bendimerad, 2016] Bendimerad, A. Z., Comportements au jeune âge et différé des bétons recyclés : influence de la saturation initiale en eau et du taux de substitution, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2016.
- [Bentur *et al.*, 2000] Bentur A., Alexander M.G., A review of the work of the RILEM TC159-ETC: Engineering of the interfacial transition zone in cementitious composites, *Materials and Structures*, 33, 82-87, 2000.
- [Benz et Garbockzi, 1991] Benz D.P., Garbockzi E.J., Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model, *Cement and Concrete Research*, 21, 1368-1376, 1991.
- [Bernard *et al.*, 2003] Bernard O., Ulm F.-J., Lemarchand E., A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, 33, 1293-1309, 2003.
- [Bezerra Cabral *et al.*, 2010] Bezerra Cabral A. E., Schalch V., Carpena Coitinho Dal Molin D., Duarte Ribeiro J.-L., Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 24, 421-430, 2010.
- [BIO IS, 2015] Bio Intelligence Service. Construction and Demolition Waste management in France, European Commission DG ENV, 2015.
- [Bissonnette *et al.*, 1999] Bissonnette B., Pierre P., Pigeon M., Influence of Key Parameters on Drying Shrinkage of Cementitious Materials, *Cement and Concrete Research*, 29, 1655-1662, 1999.
- [Blengini *et al.*, 2012] Blengini G. A., Garbarino E., Šolar S., Shields D. J., Hámor T., Vinai R., Agioutantis Z., Life Cycle Assessment guidelines for the sustainable production and recycling of aggregates: the Sustainable Aggregates Resource Management project (SARMA), *Journal of Cleaner Production*, 27, 177-181, 2012.
- [Bodet *et al.*, 2014] Bodet R., Fonteny S., Pillard W., Détermination des freins à l'utilisation des granulats recyclés en France. Rapport RECYBETON n°R/14/RECY/005, 112 p., 2014.
- [Bodet *et al.*, 2015] Bodet R., Fonteny S., Pillard W. Synthèse des documents internationaux sur l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons, Rapport RECYBETON n°R/15/RECY/025, 160 p., 2015.
- [Bogue, 1929] Bogue R. H., Calculation of the compounds in Portland Cement, *Industrie and Engineering Chemistry (Anal.)*, 1, 192-197, 1929.
- [Bougrain *et al.*, 2017] Bougrain F., Moisson P.H., Belaïd F., Impact de différentes mesures de politique publique sur le recyclage du béton, Rapport RECYBETON n°R/17/RECY/44, 63 p., 2017.
- [Boulay, 2007] Boulay C., Développement d'un dispositif de mesure du retrait endogène d'un béton au jeune âge. Actes des 8^e journées Scientifiques du RF2B, Montréal, 48-57, 2007.
- [Bovea et Powell, 2016] Bovea M.D., Powell J.C., Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes, *Waste Management*, 50, 151-172, 2016.
- [Bradley *et al.*, 2004] Design for Deconstruction, 2004.

- [Braga *et al.*, 2012] Braga M., de Brito J., Veiga R., Incorporation of fine concrete aggregates in mortars, *Construction and Building Materials*, 36, 960-968, 2012.
- [Braga *et al.*, 2014] Braga M., de Brito J., Veiga R., Reduction of the cement content in mortars made with fine concrete aggregates, *Materials and structures*, 47, 171-182, 2014.
- [Braga *et al.*, 2017] Braga A. M., Silvestre J. D., de Brito J., Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 2017.
- [Brand *et al.*, 2015] Brand A. S., Roesler J. R., Salas A., Initial Moisture and Mixing Effects on Higher Quality Recycled Coarse Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 79, 83-89, 2015.
- [Braunschweig *et al.*, 2011] Braunschweig A., Kytzia S., Stefan B., Recycled concrete: Environmentally beneficial over virgin concrete? In *Towards Life Cycle Sustainability Management*, Berlin, Allemagne, 635, 2007.
- [Bravo *et al.*, 2015] Bravo M., de Brito J., Pontes J., Evangelista L., Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants, *Construction and Building Materials*, 2015.
- [Braymand *et al.*, 2015] Braymand S., Roux S., Kunwufine D., Mihalcea C., Feugeas F., Fond C., Les granulats recyclés de bétons : un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons, *Matériaux*, Montpellier, France, 2014.
- [Braymand *et al.*, 2016] Braymand S., Roux S., Fares H., Déodonne K., Feugeas F., Separation and Quantification of Attached Mortar in Recycled Concrete Aggregates, *Waste Biomass Valorization*, doi:10.1007/s12649-016-9771-2, 2016.
- [Braymand *et al.*, 2017a] Braymand S., Roux S., Deodonne K., Feugeas F., Fond C., Use of recycled aggregates of concrete in total replacement of natural materials: Influence on the determination of concrete formulation parameters; *HISER International Conference – Advances in recycling and management of construction and demolition waste*, Delft, 189-192, 2017.
- [Braymand *et al.*, 2017b] Braymand S., Roux S., Fares H., Feugeas F., Multi-criteria study for recycled concrete aggregate separation processes, *Proceedings of International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste*, Delft, The Netherlands, 97-100, 2017.
- [BRE, 1998] Building Research Establishment, *Digest 433, Recycled Aggregates*, 1998.
- [Brecolotti *et al.*, 2015] Brecolotti M., D'Alessandro A., Roscini F., Bonfigli M.F., Investigation of stress – strain behaviour of recycled aggregate concrete under cyclic loads, *Environmental Engineering and Management Journal*, 14, 1543-1552, 2015.
- [Brecolotti et Materazzi, 2013] Brecolotti M., Materazzi A. L., Structural reliability of bonding between steel rebars and recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 47, 927-934, 2013.
- [BREEAM, 2016] BREEAM International new construction, *Technical Manuel SD 233 1.0*, United Kingdom, 2016.
- [Bresson, 2003] J. Besson, *Guide pour le recyclage des déchets de béton de l'Industrie du Béton*, DDP 92, CERIB, 2003.

- [Briffaut *et al.*, 2011] Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.-M., Nahas G., A thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age concrete behaviour of massive structures, *Cement and Concrete Research*, 41 (1), 56-63, 2011.
- [Brokk, 2000] Brokk AB., A handbook of demolition with Brokk, 2000.
- [Bru *et al.*, 2013] Bru K., Touzé S., Bourgeois F., Lippiatt N., Ménard Y., Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste, *International Journal of Mineral Processing*, 126, 90-98, 2014.
- [Bru *et al.*, 2017] Bru K., Touzé S., Parvaz D.B., Development of an innovative process for the up-cycling of concrete waste, *Proceedings of International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste*, Delft, The Netherlands, 55-58, 2017.
- [Bruneteau, 2005] Brunetaud X., Étude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique de l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton, Thèse, Châtenay-Malabry, École Centrale de Paris, 2005.
- [BS 8500-2+A1, 2012] BSI – Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1, Specification for constituent materials and concrete: national supplement, UK, 2012.
- [Buck, 1972] Buck A.D., Recycled concrete, DTIC Document, 1972.
- [Buck, 1977] Buck A. D., Recycled concrete as a source of aggregate, *ACI Journal*, 1997.
- [Butler *et al.*, 2011] Butler L., West J.S., Tighe S.L., The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement, *Cement and Concrete Research*, 41(10), 1037-1049, 2011.
- [Butler *et al.*, 2012] Butler L., West J.S., Tighe S.L., Effect of Recycled Concrete Aggregate Properties on Mixture Proportions of RA Concrete Developed for Structural Applications, *TRB 2012 Annual Meeting*, 18 p., 2012.
- [Buyle-Bodin et Hadjieva-Zaharieva, 2002] Buyle-Bodin F., Hadjieva-Zaharieva R., Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete, *Materials and Structures*, 2002.
- [Cabral *et al.*, 2010] Cabral A., Schalch V., Molin D. C. C., Ribeiro J. L. D., Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 24(4), 421-430, 2010.
- [Calvo Pérez *et al.*, 2002] Calvo Pérez B., Parra y Alfaro J.L., Astudillo B., Sanabria C.M., Carretón R., Aridos reciclados para hormigones y morteros. Caracterización mineralógica y química, LOEMCO, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, 2002.
- [Cameron *et al.*, 2012] Cameron D.A., Gabr A.R., Permanent strain testing of recycled concrete aggregate for evaluation of unbound bases, *2nd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG) Japan*, 10-12, 2012.
- [Carreira et Chu, 1985] Carreira D.J., Chu K.-H., Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression, *ACI Materials Journal*, 82(6), 797-804, 1985.
- [Cassagnabère *et al.*, 2009] Cassagnabère F., Mouret M., Escadeillas G., Broilliard P., Use of flash metakaolin in a slip-forming concrete for the precast industry, *Magazine of Concrete Research*, 61-10, 767-778, 2009.

- [Cast3M] Commissariat à l'Energie Atomique CEA – DEN/DM2S/SEMT, code éléments finis Cast3m. <<http://www-cast3m.cea.fr/>>.
- [Casuccio *et al.*, 2008] Casuccio M., Torrijos M.C., Giaccio G., Zerbino R., Failure mechanism of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 22(7), 1500-1506, 2008.
- [Cazacliu *et al.*, 2014] Cazacliu B., Sampaio C.H., Miltzarek G., Petter C., Le Guen L., Paranhos R., Huchet F., Kirchheim A.P., 2014, The potential of using air jigging to sort recycled aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 66, 46-53, 2014.
- [Cazacliu et Huchet, 2016] Cazacliu B., Huchet F., Technologies de séparation à sec des sables et des fines de recyclage – Étude bibliographique, Rapport RECYBETON n° R15RECY019, 62p, 2016.
- [Cazacliu, 2013] Cazacliu, B., Solution d'innovation pour la mesure de l'humidité des granulats (SIMH), rapport final du projet pour la région Pays de la Loire, 98 p., 2013.
- [CCTG, 2010] Cahier des Clauses Techniques Générales applicables aux travaux de gros œuvre, 2010.
- [CEB-FIP, 2010] Fib Model Code for Concrete Structures, Ernst & Sohn, Editor, London, ISBN: 978-3-433-03061-5, 434 pages, 2010.
- [Cedolin *et al.*, 1983] Cedolin L., Dei Poli S., Iori I., Experimental determination of the fracture process zone in concrete, *Cement and Concrete Research*, 13(4), 557-567, 1983.
- [CEE, 2011] Conseil des Communautés Européennes (CEE), Règlement n° 305/2011 du Parlement européen et du Conseil du 9 mars 2011 établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du Conseil « Règlement Produits de Construction », *Journal Officiel des Communautés Européennes* n° L 88 du 4 avril 2011, 5-43, 2011.
- [CEN, 2014] Comité Européen de Normalisation, Produits de construction – Évaluation de l'émission de substances dangereuses – Partie 2 : Essai horizontal de lixiviation dynamique des surfaces, CEN TS 16637-2, 2014.
- [CERC, 2018] Déchets et recyclage du Bâtiment et des Travaux Publics en France : les contributions du Réseau des CERC Enseignements de la consolidation des diagnostics départementaux Déchets et Recyclage du Bâtiment et des Travaux Publics des CERC, 2018.
- [CERC] Cellules Economiques Régionales de la Construction, Observatoires de la filière Construction regroupant les experts du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, de la CAPEB, de la FFB, de la FNTP et de l'UNICEM, <http://www.cerc-actu.com/>.
- [CEREMA, 2014] Valorisation des Graves de déconstruction, Guide Rhône-Alpes d'utilisation en Travaux Publics, 24 p., 2014.
- [CEREMA, 2016] Guide d'application : Acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs en construction – Les matériaux de déconstruction issus du BTP, CEREMA, Editions Reference, Sourdun, France, 39 p., 2016.
- [CERTIVEA, 2016] Certivea, Référentiel HQE Bâtiment Durable 2016, Annexe technique, France, October, 93 p., 2016.

- [CGDD- SOeS, 2013] La face cachée des matières mobilisées en France – CGDD SOeS – Le point sur n° 177 octobre 2013, 2013.
- [CGDD- SOeS, 2014] Commissariat Général au Développement Durable, Compatibilité des flux de matières dans les régions et départements-Guide méthodologique, Repères, 2014.
- [CGDD-SOeS, 2010] Commissariat Général au Développement Durable, 254 millions de tonnes de déchets produits par l'activité de construction en France en 2008, Chiffres et statistiques n° 164, 2010.
- [CGDD-SOeS, 2015] Commissariat Général au Développement Durable, Bilan 2012 de la production de déchets en France, à partir de l'enquête sur les déchets et les déblais produits par la construction et secteur de la dépollution en 2008, Chiffres et statistiques n° 615, 2015.
- [CGDD-SOeS, 2016] Commissariat Général au Développement Durable, Matières mobilisées par l'économie française : une baisse stabilisée depuis la crise de 2008, Chiffres et statistiques n° 761, 2016.
- [CGDD-SOeS, 2017a] Commissariat Général au Développement Durable, Bilan 2014 de la production de déchets en France, CGDD SOeS- Data-Lab, 2017.
- [CGDD-SOeS, 2017b] Entreprises du BTP : 227,5 millions de tonnes de déchets en 2014, CGDD SOeS- Data-Lab, 2017.
- [CGDD-SOeS, 2017c] http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/logement-construction/r/entreprises-btp-enquetes-thematiques.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=25289&cHash=067708a56cc57823d0c2bf6d61f9647c.
- [Chakradhara *et al.*, 2010] Chakradhara Rao-M., Bhattacharyya S. K., Barai S. V., Influence of Field Recycled Coarse Aggregate on Properties of Concrete, *Materials and Structures*, 44(1), 205-20, 2010.
- [Champeau et Potin, 2003] Champeau B., Potin J-N., Valorisation des sables, *Mines et Carrières*, 207, 41-49, 2003.
- [Château, 2015] Château L., Nouveaux systèmes constructifs démontables en rénovation ou déconstruction pour valorisation et recyclage simplifiés et attractifs des produits et matériaux (DEMOMULOR), ADEME, 2015.
- [Chatterjee, 1991] Chatterjee T.K., Burnability and clinkerization of cement raw mixes in Ghosh, S.N. *Progress in Cement and Concrete, Cement and Concrete Science Technology*, 1, 1, 1991.
- [Chatterji, 1989] Chatterji, S., Mechanisms of alkali-silica reaction and expansion. 8th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, Japan, 101-105, 1989.
- [Chen *et al.* 2012] Chen J., Brown B., University of Wisconsin system solid waste research program Student Project Report Leaching Characteristics of Recycled Aggregate used as Road Base May 2012 Student Investigators: J. Chen, B. Brown. Advisors: T. B. Edil, J. T. Un, 1-22, 2012.
- [Chen *et al.*, 2013] Chen J., Tinjum J.M., Edil T.B., Leaching of Alkaline Substances and Heavy Metals from Recycled Concrete Aggregate Used as Unbound Base Course, *Transportation Research Record, TRR 2349*, 81-90, 2013.

- [Chirjiv *et al.*, 2017] Chirjiv K.-A, Amor B., Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 408-416, 2017.
- [Choi et Yun, 2012] Choi W.C., Yun H.D., Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading, *Engineering Structures*, 41, 285-293, 2012.
- [Christensen et Johansen, 1979] Christensen N.H., Johansen V., Role of liquid phase and mineralizers, FLS-review in Proceedings of Cement Production and Use Conference; The engineering Foundation, New Hampshire, USA, 1979.
- [Christensen, 1979] Christensen N.H., Burnability of the raw mixes at 1 400 °C, the effect of the fineness, *Cement Concrete Research*, 9, 9-219, 1979.
- [Chrysochoou et Dermatas, 2007] Chrysochoou M., Dermatas D., Evaluation of ettringite and hydrocalumite formation for heavy metal immobilization: Literature review and experimental study, *Journal of Hazardous Materials*, 136(1), 20-33, 2007.
- [Circulaire du 15 février 2000] Circulaire du 15 février 2000 relative à la planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics (BTP).
- [Circulaire du 18 mai 2006] Circulaire du 18 mai 2006 relative à la planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics.
- [Code de l'environnement, 2018] Code de l'environnement, version consolidée, 2018.
- [Code de la santé publique, 2018] Code de la santé publique, version consolidée, 2018.
- [Code des douanes, 2018] Code des douanes, version consolidée, 2018.
- [Code des marchés publics, 2006] Code des marchés publics, 2006.
- [Code du travail, 2018] Code du travail, version consolidée, 2018.
- [Coelho et de Brito, 2013a] Coelho A., de Brito J., Conventional demolition versus deconstruction techniques in managing construction and demolition waste (CDW), *Handbook of recycled concrete and demolition waste*, Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [Coelho et de Brito, 2013b] Coelho A., de Brito J., Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis, *Journal of Cleaner Production*, 39, 338-352, 2013.
- [Coquillat, 1982] Coquillat G., Recyclage de matériaux de démolition dans la confection de béton, CEPTB – Service d'Etude des matériaux, Unité : technologie des bétons, 80, 61-248, 1982.
- [Coronado *et al.*, 2011] Coronado M., Dosal E., Coz A., Víguri J. R., Andrés A., Estimation of Construction and Demolition Waste (C&DW) Generation and Multicriteria Analysis of C&DW Management Alternatives: A Case Study in Spain; *Waste and Biomass Valorization*, 2, 209-225, 2011.
- [Cortas *et al.*, 2014] Cortas R., Rozière E., Staquet S., Hamami A., Loukili A., Delplancke-Ogletree M-P., Effect of the water saturation of aggregates on the shrinkage induced cracking risk of concrete at early age, *Cement and Concrete Composites*, 50, 1-9, 2014.

- [Cortas, 2012] Cortas R., Nouvelle approche expérimentale pour la maîtrise de la fissuration du béton jeune : influence de la nature et de la saturation des granulats, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2012.
- [Cree *et al.*, 2013] Cree D., Green M.F., Noumowé A., Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: a review, *Construction and Building Materials*, 45, 208-223, 2013.
- [Crumbie, 1994] Crumbie A.K., Characterisation of the microstructure of concrete, PhD thesis, University of London, 1994.
- [CSTB, 2015] HQE, Référentiel pour la qualité environnementale des bâtiments, Certification NF HQE-TM, 176 p., 2015.
- [Cuenca-Moyano *et al.*, 2017] Cuenca-Moyano G. M., Zanni S., Bonoli A., Valverde-Palacios I., Development of the life cycle inventory of masonry mortar made of natural and recycled aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 140, 1272-1286, 2017.
- [Cui *et al.*, 2004] Cui Z.L., Lu S.S., Wang Z.S., Influence of recycled aggregate on strength and preview the carbonation properties of recycled aggregate concrete, *Journal of Buildings and Materials*, 2004.
- [CUR 106, 2014] SBRCUR, CUR-Aanbeveling 106: 2014 – Beton met fijne fracties uit recyclinggranulaten als fijn toeslagmateriaal, Netherlands, 2014.
- [CUR 112, 2012] SBRCUR, CUR-Aanbeveling 112: 2014 – Beton met betongranulaat als grof toeslagmateriaal, Netherlands, 2012.
- [Cyr *et al.*, 2000] Cyr M., Lawrence P., Ringot E., Carles-Gibergues A., Variability of efficiency factors characterizing mineral admixtures, *RILEM, Materials and Structures*, 33, 231, 466-472, 2000.
- [Cyr *et al.*, 2014] Cyr M., Mouret M., Cassagnabere F., Nguyen, V.N., Évolution de la rhéologie du béton recyclé frais, Rapport RECYBÉTON n° R/14/RECY/012, 2014.
- [Da Costa, 2009] Da Costa M., Processes of demolition of structures (in Portuguese), Civil, Engineering MSc Thesis, Aveiro, Portugal, Universidade de Aveiro, 1999.
- [Dao *et al.*, 2014] Dao D-T, Sedran T., de Larrard F., Optimization of the recycling of concrete in concrete: application to an airport slab, 12th international symposium on concrete road, Prague, Czech Republic, 23-26, 2014.
- [Dao, 2012] Dao D.T., (Multi-) Recyclage Du Béton Hydraulique, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2012.
- [de Brito *et al.*, 2010] de Brito J., Alves F.T., Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research, *Materials and Structures*, 2010.
- [de Brito *et al.*, 2011] de Brito J., Barra M., Ferreira L., Influence of the Pre-Saturation of Recycled Coarse Concrete Aggregates on Concrete Properties, *Magazine of Concrete Research*, 63 (8), 617-627, 2011.
- [de Brito et Sakai, 2013] de Brito J., Saikia N., Recycled Aggregate in Concrete, Use of industrial, construction and demolition wastes, *Green Energy and Technology collection*, Springer, London, 2013.
- [de Juan *et al.*, 2009] de Juan M., Sánchez A., Gutiérrez P., Study on the Influence of Attached Mortar Content on the Properties of Recycled Concrete Aggregate, *Construction and Building Materials*, 23(2), 872-77, 2009.

- [de Juan et Gutierrez, 2009] de Juan M. S., Gutierrez P.A., Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 23(2), 872-877, 2009.
- [de La Torre *et al.*, 2002] de la Torre A.G., Bruque S., Campo J., Aranda M.A.G., The superstructure of C3S from synchrotron and neutron powder diffraction and its role in quantitative phase analyses, *Cement and Concrete Research*, 32, 1347-1356, 2002.
- [de Larrard *et al.*, 1997] de Larrard F., Bosc F., Catherine C. and De Florenne F., The AFREM Method for the Mix Design of HPC, *Materials and Structures*, 30, 201, 439-446, 1997.
- [de Larrard *et al.*, 2014] de Larrard F., Dao D.T., Mialon D., Rogat D., Recyclage du béton dans le béton – Le chantier expérimental de Chaponost (Rhône), *Revue Générale des Routes et Aéroports*, 924, 72-77, 2014.
- [de Larrard et Belloc, 1997] De Larrard F., Belloc A., The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete, *ACI Materials Journal*, 94 (5), 417-426, 1997.
- [de Larrard et Sedran, 1994] De Larrard, F., Sedran, T., Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of a Packing Model, *Cement and Concrete Research*, 24 (6), 997-1009, 1994.
- [de Larrard et Sedran, 2007] de Larrard F., Sedran T., Le logiciel BetonlabPro, Version 3, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 270-271, ed. LCPC, 75-85, 2007.
- [de Larrard, 1999] De Larrard F., *Concrete Mixture-Proportioning: a scientific approach*, Modern Concrete Technology, series No. 9, A. Bentur and S. Mindness editors, E & FN SPON, ISBN 0-419-23500-0, 1999.
- [de Larrard, 1999] de Larrard F., Why rheology matters? *Concrete international*, 21(8), 79-81, 1999.
- [de Larrard, 2000] de Larrard F., *Structures Granulaires et Formulation des Bétons*, Traduit de l'anglais par Lecomte A., LPC OA 34, 2000.
- [de Oliveira *et al.*, 1996] de Oliveira M.B., Vazquez E., The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete, *Waste Management, Bulk Inert Waste: an opportunity for use*, 16(1), 113-117, 1996.
- [de Sa et Benboudjema, 2016] de Sa C., Benboudjema F., Fissuration des parties d'ouvrage liées à la dessiccation – Modèle de prédiction de la fissuration des dalles du chantier de Chaponost, *Rapport RECYBETON n° R/16/RECY/031*, 2016.
- [de Schutter, 1999] De Schutter, G., Hydration and temperature development of concrete made with blast-furnace slag cement, *Cement and Concrete Research*, 29, 143-149, 1999.
- [Debieb *et al.*, 2010] Debieb F., Courard L., Kenai S., Degeimbre R., Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates, *Cement and Concrete Composite*, 32, 6, 421-426, 2010.
- [Decision 2014/955/EU, 2014] Decision 2014/955/EU of December 18th 2014 amending Decision 2000/532/EC on the list of waste pursuant to Directive 2008/98/EC, 2014.
- [Deer *et al.*, 1962] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., *Rock forming minerals*. W. Coves, London, 1962.

- [Delobel *et al.*, 2016] Delobel F., Bulteel D., Mechling J.-M., Lecomte A., Cyr M., Rémond S., Application of ASR tests to recycled concrete aggregates: Influence of water absorption, *Construction and Building Materials*, 124, 714-721, 2016.
- [Dent Glasser et Kataoka, 1981] Dent Glasser, L.S., Kataoka, N., The Chemistry of alkali-aggregate reaction. 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Cape Town, South Africa, 1981.
- [Dent Glasser, 1979] Dent Glasser L.S., Osmotic pressure and the swelling of gels, *Cement and Concrete Research*, 9, 515-517, 1979.
- [Deodonne, 2015] Deodonne K., Etudes des caractéristiques physico-chimiques des bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental, Thèse de l'Université de Strasbourg, 2015.
- [Destombes, 2003] Destombes M.A., Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile de France, les bétons et produits de démolition recyclés, Rapport Technique, 2003.
- [DGNB 2016] DGNB Global Benchmark for sustainability, <http://www.dgnb-system.de>, Germany.
- [DGPR, 2017] DGPR 25 avril 2017 : Guide Déchets et économie circulaire, Modalités d'application de la nomenclature des installations classées pour le secteur de la gestion des déchets, 2017.
- [Dhir *et al.*, 1999] Dhir R.K., Limbachiya M.C., Leelawat T., Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes, Institute of Civil Engineering – Structures Buildings, 1999.
- [Dhir et Paine, 2007] Dhir RK., Paine KA., Performance Related Approach to Use of Recycled Aggregates, WRAP and University of Dundee, Project code: AGG0074, Eds: Waste & Resources Action Programme, 65 p., 2007.
- [Dhonde *et al.*, 2007] Dhonde H.-B., Mo Y.-L., Hsu T. T.-C., Vogel J., Fresh and hardened properties of self-consolidating fiber-reinforced concrete, *ACI materials journal*, 104(5), 491-500, 2007.
- [Diamond, 1989] Diamond, S., ASR: another look of mechanism, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 83-94, 1989.
- [DICOM-DGPR, 2018] DICOM-DGPR/PLA, Feuille de route de l'économie circulaire (FREC) – 50 mesures pour une économie 100 % circulaire, 2018.
- [DIN 4226-100, 2002] DIN, Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen, Germany, 2002.
- [Ding *et al.*, 2016] Ding T., Xiao J., Tam V. W. Y., A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China, *Waste Management*, 56, 367-375, 2016.
- [Directive 2008/98/CE, 2008] Commission Européenne, Directive 2008/98/CE sur les déchets (Waste Framework Directive), 2008.
- [Directive 2008/98/CE, 2008] Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets, 2008.

- [Directive verte, 2007] Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe. Directive sur les matériaux de construction recyclés – Directive verte, 7^e édition, Austria, 7th Directive, 2007.
- [Divet *et al.*, 1998] Divet L., Randriambololona R., Delayed ettringite formation: the effect of temperature and basicity on the interaction of sulphate and C-S-H Phase, *Cement and Concrete Research*, 28, 3, 357-363, 1998.
- [Djerbi Tegguer, 2012] Djerbi Tegguer T.A., Determining the Water Absorption of Recycled Aggregates Utilizing Hydrostatic Weighing Approach, *Construction and Building Materials* 27(1), 112-16, 2012.
- [Domingo-Cabo *et al.*, 2009] Domingo-Cabo A., Lázaro C., López-Gayarre F., Serrano-López M. A., Serna P., Castaño-Tabares J. O., Creep and Shrinkage of Recycled Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (7), 2545-2553, 2009.
- [Dong et Keru, 2001] Dong Z., Keru W., Fracture properties of highstrength concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(1), 86-88, 2001.
- [Dreux et Festa, 1995] Dreux G. et Festa J., Nouveau guide du béton : composants et propriétés, composition et dosage, fabrication, transport et mise en œuvre, contrôle et normalisation, ed. Eyrolles, 1995.
- [Dron *et al.*, 1998] Dron R., Brivot F., Chaussadent T., Mécanisme de la réaction alcali-silice, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts-et-Chaussées*, 214, 61-68, 1998.
- [DS 2426, 2011] Danish Standards Association, Beton – Materialer – Regler for anvendelse af EN 206-1, Denmark, 2011.
- [DS 411, 1999] Danish Standards Association, Norm for betonkonstruktioner DS411: Brand, Denmark, 1999.
- [Dugat *et al.*, 1996] Dugat J., Roux N., Bernier G., Mechanical properties of reactive powder concretes, *Materials and Structures*, 233-240, 1996.
- [ECO-BAU, 2007] ECO-BAU, KBOB – Béton de granulats recyclés. Recommandations, Switzerland, 6p, 2007.
- [ECO-BAU, 2011] ECO-BAU, ECO-CFC, Fiches de construction écologique selon le code des frais de construction (CFC), Switzerland, 73p, 2011.
- [Ecoinvent, 2011] Ecoinvent : Ecoinvent Report, Data v2.2, Dübendorf, Switzerland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2011.
- [Eguchi *et al.*, 2007] Eguchi K., Teranishi K., Akira N., Hitoshi K., Kimihiko S., Masafumi N., Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction, *Construction and Building Materials*, 21, 1542-1551, 2007.
- [EHE Project, 2003] Spanish Standardization Committee, Draft of Spanish Regulations for the use of recycled aggregates in the production of structural concrete, Spain, 2003.
- [Eligehausen et Balazs, 1993] Eligehausen R., Balazs G. L., Bond and detailing, *Bulletin d'Information CEB*, 217, 173-226, 1993.
- [Elsharief *et al.*, 2005] Elsharief A., Cohen M.D., Olek J., Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar, *Cement and Concrete Research*, 35, 1368-1376, 2005.

- [Engagements pour la croissance verte] <http://www2.developpement-durable.gouv.fr/Les-premiers-engagements-pour-la.html>.
- [Engelsen *et al.*, 2009] Engelsen C.J., Van der Sloot H., Wibetoe G., Petkovic G., Stoltenberg-Hansson E., Lund W., Release of major elements from recycled concrete aggregates and geochemical modelling, *Cement and Concrete Research*, 39, 446-459, 2009.
- [Engelsen *et al.*, 2010] Engelsen C.J., Van Der Sloot H., Wibetoe G., Justnes H., Lund W., Stoltenberg-Hansson E., Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Research*, 40(12), 1639-1649, 2010.
- [Engelsen *et al.*, 2012] Engelsen C.J., Wibetoe G., Van der Sloot H., Lund W., Petkovic G., Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction, *Science of the Total Environment*, 427-428, 86-97, 2012.
- [Erdogdu, 2015] Erdogdu S., PFE 5^e année INSA Strasbourg – La valorisation des granulats de bétons recyclés dans les bétons, Encadré par F. Feugeas, M. Leguil, N. Serres, N. Bur, P. Vuillemin, 2011.
- [Erichsen *et al.*, 2011] Erichsen E., Ulvi A., Sævik K., Mechanical Degradation of Aggregate by the Los Angeles, the Micro-Deval and the Nordic Test Methods, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44, 333-337, 2011, doi:10.1007/s00603-011-0140-y.
- [Ermco, 2014] Ermco, Annual ready-mixed concrete industry statistics, Year 2014.
- [Etxberria, 2004] Etxberria M., The role and influence of recycled aggregate, *Recycled Materials in Building and Structures*, RILEM, Barcelona, Spain, 2004.
- [Etxberria *et al.*, 2007a] Etxberria M., Mari A.R., Vasquez E., Recycled aggregate concrete as structural material, *Materials and Structures*, 40(5), 529-541, 2006.
- [Etxberria *et al.*, 2007b] Etxberria M., Vazquez E., Mari A., Barra M., Influence of the amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735-742, 2007.
- [Evangelista *et al.*, 2015] Evangelista L., Guedes M., de Brito J., Ferro A.C., Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste, *Cement and Concrete Composites*, 86, 178-188, 2015.
- [Evangelista et Brito, 2007a] Evangelista L., Brito J., Environmental life cycle assessment of concrete made with fine recycled concrete aggregates, In *Portugal SB07 Sustainable construction, Materials and practices-Challenge of the industry for the new Millenium*. Amsterdam, IOS Press, 789-794, 2007.
- [Evangelista et de Brito, 2007b] Evangelista L., de Brito J., Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and concrete composites*, 29(5), 397-401, 2007.
- [Evangelista et de Brito, 2010] Evangelista L., de Brito J., Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 32, 9-14, 2010.
- [Faessel *et al.*, 1971] Faessel P., Robinson J.R., Morisset A., *Tables d'états limites ultimes des poteaux en béton armé, SDTBTP*, Paris, 1971.

- [Faleschini *et al.*, 2016] Faleschini F., Zanini M. A., Pellegrino C., Pasinato S., Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a medium-size integrated plant, *Waste Management*, 49, 146-155, 2016.
- [Fan *et al.*, 2014] Fan Y., Xiao J., Tam V. W., Effect of old attached mortar on the creep of recycled aggregate concrete, *Structural Concrete*, 15(2), 169-178, 2014.
- [Farah *et al.*, 2013] Farah M., Grondin F., Matallah M., Loukili M., Saliba J., Multi-scales characterization of the early-age creep of concrete, *Proceedings of 9th Concreep*, Boston, USA, 2013.
- [Fares *et al.*, 2010] Fares H., Remond S., Noumowe A., Cousture A., High temperature behaviour of self-consolidating concrete: Microstructure and physicochemical properties, *Cement and Concrete Research*, 40, 2010.
- [Fares, 2009] Fares H., Propriétés Mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée, L2MGC Université de Cergy-Pontoise, Thèse de doctorat, 2009.
- [Fascicule 29, 2006] Bulletin Officiel du Ministère de l'Équipement, Cahier des clauses techniques générales – Fascicule 29 – Exécution des revêtements de voirie et espaces publics en produits modulaires, 2006.
- [Fascicule 65, 2014] Bulletin Officiel du Ministère de l'Équipement, Cahier des clauses techniques générales – Fascicule n° 65 applicable aux marchés de génie civil – Exécution des ouvrages de génie civil en béton, Version 1.2, 2014.
- [Fascicule 74, 1998] Bulletin Officiel du Ministère de l'Équipement, Cahier des clauses techniques générales – Fascicule 74 – Construction de réservoirs en béton, 1998.
- [Fathifazl *et al.*, 2011a] Fathifazl G., Razaqpur A.G., Isgorc O. B., Abbas A., Fournier B., Foof S., Shear capacity evaluation of steel reinforced recycled concrete (RRC) beams, *Engineering Structures*, 33(3), 1025-1033, 2011.
- [Fathifazl *et al.*, 2011b] Fathifazl G., Ghani Razaqpur A., Burkan Isgor O., Abbas A., Fournier B., Foo S., Creep and Drying Shrinkage Characteristics of Concrete Produced with Coarse Recycled Concrete Aggregate, *Cement and Concrete Composite*, 33 (10), 1026-1037, 2011.
- [Fathifzl *et al.*, 2009] Fathifazl G., Razaqpur A. G., Isgor O. B., Abbas A., Fournier B., Foo S., Flexural Performance of Steel-Reinforced Recycled Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, 106(6), 858-867, 2009.
- [Feraille-Fresnet, 2016] Feraille-Fresnet A., Du matériau à l'ouvrage : quelques apports méthodologiques relatifs à l'Analyse de Cycle de Vie, Habilitation à Diriger des Recherches, Paris Est, 2016.
- [Ferraris et de Larrard, 1998] Ferraris C-F., de Larrard F., Testing and Modelling of Fresh Concrete Rheology, *National Institute of Standards and Technology*, 59, 1998.
- [Ferraris, 1996] Ferraris C-F., Measurement of Rheological Properties of High Performance Concrete: State-of-the-Art Report. P. 33 in *National Institute of Standards and Technology*. Gaithersburg, 1996.
- [Ferreira *et al.*, 2011] Ferreira L., de Brito J., Barra M., Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties, *Magazine of Concrete Research*, 63, 617-627, 2011.

- [FFB, 2017] Fédération Française du Bâtiment, Benchmark européen sur la gestion des déchets de chantier, Rapport final, 249p, 2017.
- [FFB] Fédération Française du Bâtiment, <http://www.dechets-chantier.ffbatiment.fr/>.
- [FHWA, 2007] Long-Life Concrete Pavements in Europe and Canada, report n°FHWA-PL-07-027, 80 p., 2007.
- [Fleischer et Rubby, 1999] Fleischer W., Rubby M., Recycled aggregates from old concrete highway pavements, Proc., Int. Seminar Exploiting Wastes in Concrete, Thomas Telford, London, 151-161, 1999.
- [Florea et Brouwers, 2013] Florea M.V.A., Brouwers H.J.H., Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use, Cement and Concrete Research, 52, 11-21, 2013.
- [FNTP, 2009] Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons, Recommandations professionnelles provisoires, FNTP-FFB-CERIB, 2009.
- [Folino et Xargay, 2014] Folino P., Xargay H., Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression, Construction and Building Materials, 56, 21-31, 2014.
- [Fouré *et al.*, 1996] Fouré B., de Larrard F., Paultre P., Justifications sous sollicitations normales. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, special XIX, Extension des règlements BAEL / BPEL aux bétons à 80 MPa, 31-41, 1996.
- [Fouré, 1986] Fouré B., Comportement en compression, flexion, flexion composée et flambement. Granulats et bétons légers, Bilan de dix ans de recherches, Presses de l'ENPC, Paris, chapitre 11, 321-348, 1986.
- [Fouré, 1996] Fouré B., Empirical constitutive law for concrete in compression and extrapolation to very high strength concrete, AFPC / AFREM Fourth International Symposium on Utilization of high strength/high performance concrete BHP 96, Paris, Presses de l'ENPC, 2, 663-668, 1996.
- [Fouré, 2005] Comportement mécanique du béton, Chapitre 1, Introduction : modélisation et règlements, Hermès / Lavoisier éditeur, Paris, 2005, 21-64.
- [Fundal, 1996] Fundal E., Burnability of cement raw meal with matrix correction, World Cement Technology Research and Development, 63-86, 1991.
- [Galvin *et al.* 2014] Galvín A.P., Agrela F., Ayuso J., Beltrán M.G., Barbudo A., Leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete, Waste Management (New York, N.Y.), 34(9), 1693-704, 2014.
- [Galvin *et al.*, 2012] Galvín A.P., Ayuso J., Jiménez J.R., Agrela F., Comparison of batch leaching tests and influence of pH on the release of metals from construction and demolition wastes, Waste Management (New York, N.Y.), 32(1), 88-95, 2012.
- [Galvin *et al.*, 2013] Galvín A.P., Ayuso J., Agrela F., Barbudo A., Jiménez, J.R., Analysis of leaching procedures for environmental risk assessment of recycled aggregate use in unpaved roads, Construction and Building Materials, 40, 1207-1214, 2013.
- [Garboczi et Bentz, 1996] Garboczi E.J., Bentz D.P., Modelling of the microstructure and transport properties of concrete, Construction and Building Material, 10, 293-330, 1996.

- [Gaspar *et al.*, 2015] Gaspar L., Stryk J., Marchtrenker S., Bencze S., Recycling reclaimed road material in hydraulically bound layers, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 168(3), 276-287, 2015.
- [GB/T 14902, 2012] CNIS (China National Institute of Standardization). 预拌混凝土 – Ready Mixed Concrete, China, 2012.
- [GBC, 2018] GBC, World Green Bulding Council, www.bgc.org, 2018.
- [Geng *et al.*, 2017] Geng S., Wang Y., Zuo J., Zhou Z., Du H., Mao G., Building life cycle assessment research: A review by bibliometric analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 176-184, 2017.
- [Gesoglu et Ozbay, 2007] Gesoğlu M., Özbay E., Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems, *Materials and Structures*, 40(9), 923-937, 2007.
- [Ghorbel *et al.*, 2017] Ghorbel E., Omary S., Wardeh G., Evaluation de l'impact d'un dosage de 10 % de recyclé sur les propriétés des bétons. Rapport RECYBETON N° R/17/RECY/040, 2017.
- [Gomes *et al.*, 2013] Gomes F., Brière R., Feraille A., Habert G., Lasvaux S., Tessier C., Adaptation of environmental data to national and sectorial context: Application for reinforcing steel sold on the French market, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 5, 926-938, 2013.
- [Gomez-Soberon, 2002a] Gomez-Soberon J. M., Creep of Concrete with Substitution of Normal Aggregate by Recycled Concrete Aggregate, *ACI Material Journal*, 209, 461-474, 2002.
- [Gomez-Soberon, 2002b] Gomez-Soberon J. M. V., Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, An experimental study, *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1301-1311, 2002.
- [Gómez-Soberón, 2003] Gómez-Soberón J. M., Relationship between Gas Adsorption and the Shrinkage and Creep of Recycled Aggregate Concrete, *Cement and Concrete Aggregates*, 25, 42-48, 2003.
- [Goncalves *et al.*, 2004] Gonçalves A., Esteves A., Vieira M., Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability, *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, 2004.
- [González *et al.*, 2013] González J.G., Robles D.R., Valdés A.J., Morán del Pozo, J.M. Romero, M.I.G., Influence of Moisture States of Recycled Coarse Aggregates on the Slump Test, *Advances Materials Research*, 742, 379-383, 2013.
- [Gonzalez-Fonteboa *et al.*, 2007] Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F., Shear strength of recycled concrete beams, *Construction and Building Materials*, 21(4), 887-893, 2007.
- [Granger, 1995] Granger L., Comportement différée du béton dans les enceintes de centrales nucléaires, Analyse et modélisation, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.
- [Granju, 2012] Granju J.-L., Béton armé – Théorie et applications selon l'Eurocode 2, Eyrolles, Paris, 2012.

- [Grondin *et al.*, 2010] Grondin F., Bouasker M., Mounanga P., Khelidj A., Perronnet A., Physico-chemical deformations of solidifying cementitious systems: multiscale modelling, *Materials and Structures*, 43 (1-2), 151-165, 2010.
- [Grondin et Matallah, 2014] Grondin F., Matallah M., How to consider the Interfacial Transition Zones in the finite element modelling of concrete? *Cement and Concrete Research*, 58, 67-75, 2014.
- [Grübl et Nealen, 1998] Grübl P., Nealen A., Construction of an office building using concrete made from recycled demolition material, *Darmstadt Concrete*, 13, 63-177, 1998.
- [Guerra *et al.*, 2014] Guerra M., Ceia F., de Brito J., Julio E., Anchorage of steel rebars to recycled aggregates concrete, *Construction and Building Materials*, 72, 113-123, 2014.
- [Guo *et al.*, 2016] Guo M., Grondin F., Alam S.Y., Loukili A., Fracture process analysis of recycled aggregate concrete with combined acoustic emission and digital image correlation techniques, *Proceeding of FraMCoS-9*, Berkeley, USA, 2016.
- [Gustavsson *et al.*, 1994] Gustavsson M., Karawacki E., Gustafsson S.E., Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensors, *Review of Scientific Instruments*, 65, 3858, 1994.
- [Haase et Dahms, 1998] Haase R., Dahms J., Material cycles on the example of concrete in the northern parts of Germany, *Beton*, 48(6), 350-355, 1998.
- [Habert *et al.*, 2010] Habert G., Castillo E., Morel J.C., Sustainable Indicators for Resources and Energy in Building Construction, *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Ancona, Italy, 2010.
- [Hájek *et al.*, 2011] Hájek P., Fiala C., Kynčlová M., Life cycle assessments of concrete structures – a step towards environmental savings, *Structural Concrete*, 12, 1, 13-22, 2013.
- [Hamard et Cazacliu, 2014a] Hamard E., Cazacliu B., Influence du type de concassage sur les différentes fractions granulaires, *Rapport RECYBETON n° R/14/RECY/008*, 33 p., 2014.
- [Hamard et Cazacliu, 2014b] Hamard E., Cazacliu B., Etude de la validité des normes d'essai mécaniques pour les granulats recyclés, *Rapport RECYBETON n° R14RECY011*, 48 p., 2014.
- [Hammer *et al.*, 2007] Hammer TA., Fossa KT., Bjøntegaard Ø., Cracking tendency of HSC: tensile strength and self generated stress in the period of setting and early hardening, *Materials and Structures*, 40, 319-24, 2007.
- [Hanehara *et al.*, 2008a] Hanehara S., Oyamada T., Fukuda S., Fujiwara T., Delayed ettringite formation and alkali aggregate reaction, *8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures CONCREEP'08*, Ise-Shima, Japan, 1051-1056, 2008.
- [Hanehara *et al.*, 2008b] Hanehara S., Oyamada T., Fujiwara T., Reproduction of delayed ettringite formation in concrete and its mechanism, *1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*, Nanjing, China, 143-152, 2008.

- [Hansen et Almudaiheem, 1987] Hansen W., Almudaiheem JA., Ultimate Drying Shrinkage of Concrete – Influence of major parameters, *ACI Materials*, 84, 217-223, 1987.
- [Hansen et Boegh, 1985] Hansen T. C., Boegh E., Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled Aggregate Concrete, *ACI Journal*, 82 (82), 648-652, 1985.
- [Hansen et Mattock, 1966] Hansen C. T., Mattock A. H., Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Crrep of Concrete, *Journal of American Institut for Conservation*, 63-10, 267-290, 1966.
- [Hansen et Narud, 1983] Hansen T.C., Narud H., Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate, *Concrete International*, 5(1), 79-83, 1983.
- [Hansen, 1986] Hansen T.C., Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments, *Materials and Structure*, 19, 1945-1985, 1986.
- [Hansen, 1992a] Hansen T.C., Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete: Second State-of- the-Art, Report 1945-1989, 1992.
- [Hansen, 1992b] Hansen T.C., Recycling of demolished concrete and masonry, Rapport RILEM 07, E&FN Spon, London, 1992.
- [Harrisson, 2010] Harrisson A., Free lime: the fifth phase, *International Cement Revue*, 59-61, 2010.
- [Hayakawa et Itoh, 1982] Hayakawa M., Itoh Y., A new concrete mixing method for improving bond mechanism, *Bond in concrete*, Ed. by P. Bartos, Applied Science Publishers, London, 24-33, 1982.
- [HB 155, 2002] Guide to the use of recycled concrete and masonry materials, Australia, 2002.
- [Hendriks et Xing, 2004] Hendriks C., XingW., 2004, Suitable separation treatment of stony components in construction and demolition waste (CDW). In: Vázquez, E., Hendriks, Ch. F., Janssen, G.M.T. (Eds.), *Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, RILEM Publications SARL, 166-172, 2004.
- [Heng *et al.*, 2005] Heng N., Hashimoto C., Wanatabe T., Ueda T., Effect of the mixing method with oscillation of mixture inserting vibrators on properties of concrete with low treated recycled aggregate *JCA Proceedings of Cement and Concrete*, 58, 525-532, 2005.
- [Higuchie, 1980] Higuchi Y., Coated-sand technique produces high strength concrete, *Concrete International*, 2, 4, 75-76, 1980.
- [Hobbs, 1993] Hobbs, D.W., Deleterious alkali-silica reactivity in the laboratory and under field conditions, *Magazine of Concrete Research*, 45, 163, 103-112, 1993.
- [Homand-Etienne et Houpert, 1989] Homand-Etienne F., Houpert R., Thermally induced microcracking in granites: characterization and analysis, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26, 1989.
- [Hong et Glasser, 2002] Hong S. H., Glasser F. P., Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels: Part II Role of alumina, *Cement and Concrete Research*, 32, 1101-1111, 2002.

- [Hu et Wang, 2011] Hu J., Wang K., Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Concrete Rheology, *Construction and Building Materials*, 25(3), 1196-1204, 2011.
- [Huang *et al.*, 2002] Huang W.-L., Lin D.-H., Chang N.-B., Lin K.-S., Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process, *Resources, Conservation and Recycling*, 37, 23-37, 2002.
- [Huntzinger et Eatmon, 2009] Huntzinger D. N., Eatmon T. D., A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies; Present and Anticipated Demands for Natural Resources: Scientific, Technological, Political, Economic and Ethical Approaches for Sustainable Management, 17, 7, 668-675, 2009.
- [Idir *et al.*, 2015] Idir R., Feraille A., Serres N., Braymand S., Evaluation environnementale du béton de granulats recyclés – CEREMA, ENPC, ICUBE, Rapport RECYBETON n° R/15/RECY/024, 2015.
- [IFSTTAR n° 78, 2011] IFSTTAR, Méthode d'essai n° 78 – Essai sur granulats pour béton. Mesure de l'absorption totale d'eau par un sable concassé, 2011.
- [IFSTTAR, 2017], Guide Technique GTI5, Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, ed. Ifsttar, 70p, 2017.
- [Ignjatovic *et al.*, 2013] Ignjatovic I. S., Marinkovic S. B., Miskovic Z., Savic A. R., Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading, *Materials and Structures*, 46(6), 1045-1059, 2013.
- [IN 0034, 2011] SNCF, Exécution des Ouvrages en Béton Armé et Béton Précontraint, 2011.
- [Ioannidou *et al.*, 2015] Ioannidou D., Nikias V., Brière R., Zerbi S., Habert G., Land-cover-based indicator to assess the accessibility of resources used in the construction sector, *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 80-91, 2015.
- [ISO 1920-10, 2010] ISO, Testing of concrete – Part 10: determination of static modulus of elasticity in compression, 2010.
- [ISO 1920-x] ISO, Testing of concrete – Various parts.
- [ISO 6892-1, 2009] Metallic materials – Tensile strength – Part 1: Method of test at room temperature, International organization for standardization, Genève, 2009.
- [Jansson, 2004a] Jansson R., Material properties related to fire spalling of concrete, Thesis work, Lund Institute of Technology, 2004.
- [Jansson, 2004b] Jansson R., Measurement of concrete thermal properties at high temperatures. In: Fib task group 4.3 workshop “Fire design of concrete structures: What now? What next?”, Milan, 2004.
- [Jeong *et al.*, 2016] Jeong J., Ramezani H., Leklou N., Why does the modified Arrhenius' law fail to describe the hydration modeling of recycled aggregate? *Thermochimica Acta*, 626, 13-30, 2016.
- [Jezequel, 2014a] Jezequel F., Etude de variabilité des caractéristiques de granulats recyclés issus de diverses sources et suivi, Rapport RECYBETON n° R/14/RECY/013, Octobre 2014.

- [Jezequel, 2014b] Jezequel F., Incertitude de mesure et pertinence des essais de masse volumique et absorption d'eau sur les granulats recyclés, Rapport RECYBÉTON n°R/14/RECY/014, 2014.
- [Jezequel, 2017] Jezequel F., Etude de variabilité des caractéristiques de granulats recyclés issus de diverses sources et suivi, Sigma Béton, Rapport RECYBETON thème 2, 2014, 2017.
- [JGJ 52, 2006] Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete, Chinese Standard, 2006.
- [JGJ/T 2040, 2011] CNIS (China National Institute of Standardization). 再生骨料应用技术规程 – technical provisions for the use of recycled aggregates, China, 2011.
- [Ji *et al.*, 2013] Ji T., Chen C.-Y., Chen Y.-Y., Zhuang Y.-Z. Chen, J.-F., Lin, X., Effect of moisture state of recycled fine aggregate on the cracking resistibility of concrete, *Construction and Building Materials*, 44, 726-733, 2013.
- [Ji *et al.*, 2016] Ji C., Hong T., Jeong J., Kim J., Lee M., Jeong K., Establishing environmental benchmarks to determine the environmental performance of elementary school buildings using LCA, *Energy and Buildings*, 127, 818-829, 2016.
- [JIS A 5021, 2011] JSA (Japanese Standards Association), コンクリート用再生骨材H – H Class Recycled Aggregates for concrete, Japan, 2011.
- [JIS A 5022, 2012] JSA (Japanese Standards Association), 再生骨材Mを用いたコンクリート Concrete containing M Class Recycled Aggregates, Japan, 2012.
- [JIS A 5023, 2012] JSA (Japanese Standards Association), 再生骨材Lを用いたコンクリート – Concrete containing L Class Recycled Aggregates, Japan, 2012.
- [JIS A 5308, 2014] JSA (Japanese Standards Association), レディーミクストコンクリート – Ready Mixed Concrete, Japan, 2014.
- [Johansson, 2014] Johansson R., Air Classification of Fine Aggregates. Doktorsavhandlingar Vid Chalmers Tekniska Högskola, N.S., 3817, Göteborg: Chalmers Univ. of Technology, 2014.
- [Jolliet *et al.*, 2010] Jolliet O., Saade Myriam M., Crettaz P., Shaked S., Analyse du cycle de vie Comprendre et réaliser un écobilan, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2010.
- [Jones, 1997] Jones T.N., A new interpretation of alkali-silica reaction and expansion mechanisms in concrete, *Chemistry and Industry*, 40-44, 1988.
- [Josa *et al.*, 2004] Josa A., Aguado A., Heino A., Byars E., Cardim A., Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU, *Cement and Concrete Research*, 34, 8, 1313-1320, 2004.
- [Josa *et al.*, 2007] Josa A., Aguado A., Cardim A., Byars E., Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU, *Cement and Concrete Research*, 37, 5, 781-788, 2007.
- [Joseph *et al.*, 2015] Joseph M., Boehme L., Sierens Z., Vandewalle L., Water absorption variability of recycled concrete aggregates, *Magazine of Concrete Research*, 67, 592-597, 2015.
- [JSCE, 2002] Standard specifications for concrete structures, Japan society of civil engineers, Tokyo, 2002.

- [Jullien *et al.*, 2012] Jullien A., Proust C., Martaud T., Rayssac E., Ropert C., Variability in the environmental impacts of aggregate production, *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 1-13, 2012.
- [Kadri *et al.*, 2009] Kadri E-H., Aggoun S., De Schutter G., Interaction between C₃A, Silica Fume and Naphthalene Sulphonate Superplasticiser in High Performance Concrete, *Construction and Building Materials*, 23(10), 3124-28, 2009.
- [Kaihua *et al.*, 2016] Kaihua L., Jiachuan Y., Qiong H., Yao S., Chaoying Z., Effects of parent concrete and mixing method on the resistance to freezing and thawing of air-entrained recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 106, 264-273, 2016.
- [Kameche *et al.*, 2012] Kameche Z. E., Ghomari F., Khelidj A., Choinska M., La perméabilité relative comme indicateur de durabilité : Influence de l'état hydrique du béton et de la taille des éprouvettes, AUGC, 2012.
- [Kang *et al.*, 2014] Kang T. H-K, Kim W., Kwak Y-K, Hong S-G., Flexural Testing of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Aggregates, *ACI Structural Journal*, 111(3), 607-616, 2014.
- [Karihaloo *et al.*, 2006] Karihaloo B.L., Abdalla H.M., Xiao Q.Z., Deterministic size effect in the strength of cracked concrete structures, *Cement and Concrete Research*, 36(1), 171-188, 2006.
- [Katz, 2003] Katz A., Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 703-711, 2003.
- [Kavyrchine *et al.*, 1976] Kavyrchine M., Fouré B., Bronsart O., Flambement de poteaux en béton léger armé sous charge de courte durée – Recherche "IU", Rapport CEBTP, 1976.
- [Kawabata et Yamada, 2015] Kawabata Y., Yamada K., Evaluation of alkalinity of pore solution based on the phase composition of cement hydrates with supplementary cementitious materials and its relation to suppressing ASR expansion, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13, 538-553, 2015.
- [Kawai, 2011] Kawai K., Application of performance-based environmental design to concrete and concrete structures, *Structural Concrete*, 12, 1, 30-35, 2011.
- [Khalaf *et al.*, 2004] Khalaf F.M., DeVenny A.S., Recycling of Demolished Masonry Rubble as Coarse Aggregate in Concrete: Review, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 16, 331-340, 2004.
- [Khaliq *et al.*, 2011] Khaliq W., Kodur V., Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 41, 1112-1122, 2011.
- [Khelidj et Loukili, 1998] Khelidj A., Loukili A., Etude Expérimentale du couplage hydro-chimique dans les bétons en cours de maturation : incidence sur les retraits, *Materials and Structure*, 31, 588-594, 1998.
- [Khoshkenari *et al.*, 2014] Khoshkenari A. G., Shafigh P., Moghimi M., Bin Mahmud H., The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete, *Materials and Design*, 64, 345-354, 2014.

- [Khoury *et al.*, 2017] Khoury E., Cazacliu B., Remond S., Impact of the initial moisture level and pre-wetting history of Recycled Concrete Aggregates on their Water Absorption, *Materials and Structures*, 50, 229, 2017.
- [Kikucki *et al.*, 1988] Kikuchi M., Mukai T., Koizumi H., Properties of concrete products containing recycled aggregate. In: Proc. 2nd international symposium on demolition and re-use of concrete and masonry, 2, 595-604, 1988.
- [Kim et Bentz, 2008] Kim H., Bentz D., Internal Curing with Crushed Returned Concrete Aggregates for High Performance Concrete, In NNRMCA Concrete Technology Forum: Focus on Sustainable Development, 1-12, 2008.
- [Kim et Choi, 2012] Kim Y. J., Choi Y. W., Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement, *Construction and Building Materials*, 30, 500-504, 2012.
- [Kim et Kim, 1996] Kim J.-K., Kim Y.-Y., Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(10), 1513-1523, 1996.
- [Kim et Yun, 2013] Kim S.-W., Yun H.-D., Influence of recycled coarse aggregates on the bond behavior of deformed bars in concrete, *Engineering Structures*, 48, 133-143, 2013.
- [Kim et Yun, 2014] Kim S.-W., Yun H.-D., Evaluation of the bond behavior of steel reinforcing bars in recycled fine aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 46, 8-18, 2014.
- [Kim, 2014] Kim T.-H., A Study on Carbon Emission Impact Analysis of Concrete Mixing Recycled Aggregate, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 31, 96-104, 2014.
- [Kjellsen *et al.*, 1998] Kjellsen K.O., Wallevik O.H., Fjalberg L., Microstructure and microchemistry of the paste-aggregate interfacial transition zone of high-performance concrete, *Advanced Cement Research*, 10, 33-40, 1998.
- [Kleijer *et al.*, 2017] Kleijer A. L., Lasvaux S., Citherlet S., Viviani M., Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 210-218, 2017.
- [Klinkenberg, 1941] Klinkenberg, L.J., The permeability of porous media to liquid and gases. *Drilling and Production Practice*, American Petroleum Institute, New York, 1941.
- [Knaac et Kurama, 2015] Knaack A.-M., Kurama Y.-C., Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates, *Journal of Structural Engineering*, 141, 2015.
- [Knoeri *et al.*, 2013] Knoeri C., Sanyé-Mengual E., Althaus H.-J., Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 5, 909-918, 2013.
- [Kofoworola et Gheewala, 2008] Kofoworola O. F., Gheewala S. H., Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, 6, 498, 2008.
- [Kohno *et al.*, 1999] Kohno K., Okamoto T., Isikawa Y., Sibata T., Mori H., Effects of Artificial Lightweight Aggregate on Autogenous Shrinkage of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, 611-614, 1999.

- [Koji, 2010] Koji S., The current state and future prospects of waste and recycling in Japan, In: Proceedings of the First International Conference on Sustainable Urbanization, Hong Kong, 837-845, 2010.
- [Kong *et al.*, 2010] Kong D., Lei T., Zheng J., Ma C., Jiang J., Jiang J., Effect and mechanism of surface-coating pozzolanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 24, 701-708, 2010.
- [Kordina et Blume, 1985] Kordina K., Blume F., Empirische Zusammenhänge zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit stabförmiger Stahlbetonelemente, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 364, 1985.
- [Kou *et al.*, 2012] Kou S., Poon C., Wan H., Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 36, 881-9, 2012.
- [Kou et Poon, 2010] Kou S.C. Poon C.S., Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 2010.
- [Kou et Poon, 2012] Kou S.C., Poon C.S., Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Construction and Building Materials*, 35, 69-76, 2012.
- [Kou et Poon, 2013] Kou S.-C., Poon C.-S., Long term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash, *Cement and Concrete Composites*, 37, 12-19, 2013.
- [Kou, 2006] Kou S.H., Reusing recycled aggregates in structural concrete, *The Hong Kong Polytechnic university*, 312, 2006.
- [Koulouris *et al.*, 2004] Koulouris A., Limbachiya MC, Fried AN, Roberts JJ, Use of recycled aggregate in concrete application: case studies. Sustainable waste management and recycling: construction demolition waste. In: International Conference, Concrete and Masonry Research Group, Kingston University, 245-257, 2004.
- [Kumar *et al.*, 2011] Kumar R., Singh B., Bhargava P., Flexural capacity predictions of self-compacting concrete beams using stress-strain relationship in axial compression, *Magazine Concrete Research*, 63(1), 49-59, 2011.
- [Kurowa *et al.*, 1999] Kurowa R., Tsuji M., Sawamoto T., Tanaka Y, Effect of water condition in aggregate and mixing procedure under decreased pressure on compressive strength of recycled aggregate concrete, *JCA Proceedings of Cement & Concrete*, 53, 535-542, 1999.
- [Kwan *et al.*, 2012] Kwan W.H., Ramli M., Kam K.J., Sulieman M.Z., Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties, *Construction and Buildings Materials*, 26, 2012.
- [Laby, 2007] Laby, F., Le recyclage des déchets de démolition pourrait être amélioré par la déconstruction sélective, *Actu-Environnement.com*, 2007.
- [Laneyrie *et al.*, 2014] Laneyrie C., Beaucour A.L., Noumowe A., Evaluation des méthodes de caractérisation des granulats naturels appliquées aux recyclés. Rapport RECYBÉTON n°R/14/RECY/009, 2014.

- [Laneyrie *et al.*, 2016] Laneyrie C., Beaucour A-L., Green M., Hebert R., Ledesert B., Noumowé A., Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 111, 368-378, 2016.
- [Laneyrie, 2014] Laneyrie C., Valorisation des déchets de chantiers du BTP : comportement à haute température des bétons de granulats recyclés, Thèse de l'université de Cergy-Pontoise, 2014.
- [Langton et Roy, 1980] Langton C.A, Roy D.M., Morphology and microstructure of cement paste/rock interface regions, *Proceeding of 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, France, 127-132, 1980.
- [Lavaud, 2017] Lavaud R., Caractérisation des granulats, rapport interne non publié, Technodes S.A.S. HeidelbergCement GROUP, 2017.
- [LC 21-901, 2008] Transports Québec. Détermination de la composition d'un matériau recyclé contenant des résidus d'enrobé et de béton de ciment, Québec, 2008.
- [LCPC, 2003] Guide Technique, Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel, éd. LCPC, 2003.
- [Le *et al.*, 2016] Le T., Remond S., Le Saout G., Garcia-Diaz E., Fresh behavior of mortar based on recycled sand – Influence of moisture condition, *Construction and building materials*, 106, 35-42, 2016.
- [Le *et al.*, 2017] Le T., Le Saout G., Garcia-Diaz E., Remond S., Hardened behavior of mortar based on recycled aggregate: Influence of saturation state at macro- and microscopic scales, *Construction and Building Materials*, 141, 479-490, 2017.
- [Le Guen, 2015] Le Guen L., Technologie de tri sélectif des granulats de béton concassé et détection en continu de la présence d'éléments indésirables dans les granulats recyclés, Rapport RECYBETON n° R/15/RECY/018, 83p, 2015.
- [Le Moigne, 2014] Le Moigne R. Economie circulaire : les nouveaux business models, Futuribles.com, 5, 2014.
- [Le Moigne, 2018] Le Moigne R., L'économie circulaire 2^e édition, Stratégie pour un monde durable, Dunod, 2018.
- [Le Saoût *et al.*, 2011] Le Saoût G., Kocaba V., Scrivener K., Application of the Rietveld method to the analysis of anhydrous cement, *Cement and Concrete Research*, 41, 133-148, 2011.
- [Le, 2015] Le T., Influence de l'humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l'état frais et durcissant des mortiers. Thèse, École des Mines de Douai, France, 2015.
- [Le, 2015] Le T., Influence de l'humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l'état frais et durcissant des mortiers, Thèse, École des Mines de Douai, 2015.
- [Lea, 2003] Lea's chemistry of cement and concrete, 4th edition, edited by Peter C. Hewlett, Elsevier, 2003.
- [Lee *et al.*, 2006] Lee Y., Yi S.T., Kim M. S., Kim J. K., Evaluation of a Basic Creep Model with Respect to Autogenous Shrinkage, *Cement Concrete Research*, 36 (7), 1268-1278, 2006.

- [LEED, 2017] LEED, v4 for building design and construction, United State, 161 p., 2017.
- [Legrand, 1972] Legrand C., Contribution to the study of the rheology of fresh concrete, *Materials and structures*, 5(5), 275-295, 1972.
- [Leklou, 2008] Leklou N., Contribution à la connaissance de la réaction sulfatique interne. Thèse, Université Paul Sabatier III, 2008.
- [Li *et al.*, 2012] Li W., Xiao J., Sun Z., Kawashima S., Shah S.P., Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches, *Construction and Building Materials*, 35, 1045-1055, 2012.
- [Li, 2008] Li X., Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I, Material behaviour of recycled aggregate concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), 36-44, 2008.
- [Liang *et al.*, 2015] Liang, Y., Ye, Z., Vernerey, F., Xi, Y., Development of Processing Methods to Improve Strength of Concrete with 100% Recycled Coarse Aggregate, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27, 2015.
- [Limbachiya *et al.*, 2000] Limbachiya M.C., Dhir R.K., Leelawat T., Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete, *Materials and Structures*, 33, 2000.
- [Limbachiya *et al.*, 2007] Limbachiya M.C., Marrochino E., Koulouris A. Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate, *Waste Management*, 27, 201-208, 2007.
- [Limbachiya, 2004] Limbachiya, M.C., RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development, RILEM Publications SARL. N. Kashino and Y. Ohama, 2004.
- [Lin *et al.*, 2004] Lin Y. H., Yaw-Yuan T., Ta-Peng C., Ching-Yun C., An Assessment of Optimal Mixture for Concrete Made with Recycled Concrete Aggregates, *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1373-80, 2004.
- [Linß *et al.*, 2004] Linß E., Mueller A., High-performance sonic impulses, an alternative method for processing of concrete, *International Journal of Mineral Processing*, 74, 2004.
- [Lipovac *et al.*, 2014] Villes durables : leviers de nouveaux modèles économiques et de développement ? Développement durable et territoires, 5, 1, 2014.
- [Liu *et al.*, 2016] Liu Y., Wang W., Chen Y.F., Ji H., Residual stress-strain relationship for thermal insulation concrete with recycled aggregate after high temperature exposure, *Construction and Building Materials*, 129, 37-47, 2016.
- [Liu *et al.*, 2010] Liu C.L., Bai G., Wang L., Quan Z., Experimental study on the compression behavior of recycled concrete columns, 2nd International Conference on Waste Engineering and Management – ICWEM, 2010.
- [Liu *et al.*, 2011] Liu Q., Xiao J.Z., Sun Z.H., Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete, *Cement and Concrete Research*, 41 (10), 1050-1057, 2011.
- [Liu *et al.*, 2016] Liu K., Yan J., Hu, Q., Sun Y., Zou C., Effects of parent concrete and mixing method on the resistance to freezing and thawing of air-entrained recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 106, 264-273, 2016.

- [Lo *et al.*, 2005] Lo T., Cui H.Z., Tang W.C., Leung W.M., The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 22, 623- 628, 2008.
- [Loi n° 2009-967, 2009] Loi n° 2009-967 du 3 août 2009, Programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, 2009.
- [Loi n° 2010-788, 2010] Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, 2010.
- [Loi n° 2015-992, 2015] Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, 2015.
- [Loi n° 75-633, 1975] Loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux, 1975.
- [Loi n° 85-704, 1985] Loi MOP n° 85-704 du 12 juillet 1985, Loi sur les contrats de projet public et sa relation avec la gestion de projets privés, 1985.
- [Loi n° 92-646, 1992] Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement, 1992.
- [López Gayarre *et al.*, 2016] López Gayarre F., González Pérez J., López-Colina Pérez C., Serrano López M., López Martínez A., Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 113, 41-53, 2016.
- [Lotfi *et al.*, 2014] Lotfi S., Deja J., Rem P., Mróz R., van Roekel E., van der Stelt H., Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates, *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 117-125, 2014.
- [Lotfi *et al.*, 2015] Lotfi S., Eggimann M., Wagner E., Mroz R., Deja J., Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology, *Construction and Building Materials*, 2015.
- [Mahmoud, 2005] Mahmoud S., Classification of Recycled Sands and their Applications as Fine Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures, PhD, Kassel University, Deutschland, 2005.
- [Maki, *et al.*, 1995] Maki I., Fukuda K., Imura T., Yoshida H., Ito S., Formation of belite clusters from quartz grains in Portland cement clinker, *Cement and Concrete Research*, 25, 4, 835-840, 1995.
- [Malesev *et al.*, 2010] Malesev M., Radonjanin V., Marinkovic S., Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production, *Sustainability*, 2, 1204-1225, 2010.
- [Malhotra, 1978] Malhorta V.M., Use of recycled concrete as a new aggregate. Proceedings of Symposium on energy and resource conservation in the cement and concrete industry, CANMET, Report N° 76-9, Ottawa, 1978.
- [Manzi *et al.*, 2013] Manzi S., Mazzotti C., Bignozzi M. C., Short and Long-Term Behavior of Structural Concrete with Recycled Concrete Aggregate, *Cement and Concrete Composites*, 37, 312-318, 2013.
- [Marinkovic *et al.*, 2013] Marinkovic S., Radonjanin V., Life cycle assessment of concrete with recycled aggregate; In *Handbook of recycled concrete and demolition waste* (Woodhead Publishing, 23), Torgal, Fernando Pacheco, 2013.

- [Marinković *et al.*, 2017] Marinković S., Dragaš J., Ignjatović I., Tošić N., Environmental assessment of green concretes for structural use, *Journal of Cleaner Production*, 154, 633-649, 2017.
- [Marinkovic et Ignjatovic, 2013] Marinkovic S.B., Ignjatovic I., Life-cycle assessment of concrete with recycled aggregates. In: *Handbook of recycled concrete and demolition waste – Woodhead Publishing series in Civil and Structural Engineering*, number 47 (§ 23.2 Properties of concrete with recycled aggregates), 2013.
- [Marinkovic, 2013] Marinkovic, S, Life cycle assessment (LCA) aspects of concrete, In *Eco-efficient concrete* (Woodhead Publishing). Cambridge: F Pacheco-Torgal, S Jalali, J Labrincha, VM John, 2013.
- [Martinez-Lage *et al.*, 2012] Martínez-Lage I., Martínez-Abella F., Vázquez-Herrero C., Pérez-Ordóñez J. L., Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate, *Construction and Building Materials*, 37, 171-176, 2012.
- [Martin-Morales *et al.*, 2013] Martin-Morales M., Zamorano, M, Valverde-Palacios G., Cuenca-Moyano M. and Sánchez-Roldán Z., Quality control of recycled aggregates (RAs) from construction and demolition waste (CDW) in *Handbook of recycled concrete and demolition waste*, Woodhead Publishing, 2013.
- [Maruyama et Sato, 2005] Maruyama I., Sato R., A Trial of Reducing Autogenous Shrinkage By Recycled Aggregate, In *Proceedings of the Fourth International Research Seminar*, Report TVBM-3126, Gaithersburg, Maryland, USA, 264-270, 2005.
- [Masuy *et al.*, 2013] Masuy-Stroobant G., Costa R. (dir.), *Analyser les données en sciences sociales : de la préparation des données à l'analyse multivariée*, Bruxelles, Bern, Berlin : P.I.E.P. Lang, 2013.
- [Materrio, 2017] <https://www.unicem.fr/2017/11/27/www-materrio-construction-recyclage-et-valorisation-des-materiaux/>.
- [Mazars, 1984] Mazars J., *Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture de béton de structures*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 1984.
- [Mbemba, 2010] Mbemba-Kiele E.-P., *Influence du vent et de la cure sur le comportement des betons au tres jeune âge*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2010.
- [Mechling *et al.*, 2003] Mechling J.M., Lecomte A., Merriaux K., The water absorption measurement of mineral admixture for concretes by evaporometry, *Materials and Structures*, 36, 255, 32-39, 2003.
- [MEDDE, 2012] Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. National framework for waste prevention, 2012.
- [MEDDE, 2013] Direction Générale des Risques – Service des risques technologiques 'Nomenclature des installations classées – liste des activités soumises à la TGAP', 2013.
- [Medina *et al.*, 2012] Medina C., Frias M., Sanchez de Rojas M., Polnaco J., Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 31, 6, 112-118, 2012.

- [Mefteh *et al.*, 2013] Mefteh H., Kebaïli O., Oucief H., Berredjem L., Arabi N., Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete, *Journal of cleaner production*, 54, 282-288, 2013.
- [Meinel, 2010] Meinel A., Fine and Very Fine Screening, *Mineral Processing*, 51, 2-8, 2010.
- [Menard *et al.*, 2013] Menard Y., Bru K., Touze S., Lemoign A., Poirier J.E., Ruffie G., Bonnaud F., Von Der Weid F., Innovative process routes for a high-quality concrete recycling, *Waste Management*, 33, 2013.
- [Metha, 1986] Mehta P.K., Hardened cement paste-microstructure and its relationships to properties, *Proceeding of 8th International Congress on the Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, Brazil, 113-121, 1986.
- [Méthode LPC n° 37, 1993] IFSTTAR, Essai pour déterminer les alcalins solubles dans l'eau de chaux, 1993.
- [MINERGIE, 2016] Label MINERGIE-ECO® s'appliquant aux bâtiments, Switzerland, 2016.
- [Ministère de Transition écologique et solidaire] <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr>.
- [Mohamed, 2011] Mohamed Mohamed AS., Influence de la valorisation des microfibrilles végétales sur la formulation et la résistance aux cycles de gel-dégel de BAP, Université de Cergy-Pontoise-L2MGC, Thèse de doctorat, 2011.
- [Momber, 2004] Momber A.W., Aggregate liberation from concrete by flow cavitation, *International Journal of Mineral Processing*, 74, 2004.
- [Mongear et Dross, 2015] Mongear L., Dross A., La ressource en matériaux inertes recyclables dans le béton en France – Estimation des pratiques actuelles et des évolutions potentielles à partir des études publiées par les Cellules Économiques Régionales de la Construction. Lafarge France LC/15/RECY/65, 2015.
- [Mongear et Dross, 2016] Mongear L., Dross A., La ressource en matériaux inertes recyclables dans le béton en France, Rapport RECYBETON n° R/16/RECY/032, 72 p., 2016.
- [Mongear et Santos, 2014] Mongear L., Santos E. G., Recyclage des déchets de chantier dans l'habitat populaire en France et au Brésil – Actes du colloque franco-brésilien Attilio, Lille, 2014.
- [Mongear et Veschambre, 2014] Mongear L., Veschambre V., Eléments pour une histoire de la déconstruction : évolutions en matière de démolition de l'habitat social (agglomération lyonnaise : 1978-2013) – Actes du 2^e congrès francophone d'histoire de la construction, ENSAL, Vaulx-en-Velin, 2014.
- [Monteiro *et al.*, 1985] Monteiro P.J.M., Maso J.C., Olivier J.P., The aggregate-mortar interface, *Cement and Concrete Research*, 15, 953-958, 1985.
- [Montero *et al.*, 2010] Montero A., Tojo Y., Matsuo T., Matsut, T., Yamada M., Asakura H., Ono Y., Gypsum and organic matter distribution in a mixed construction and demolition waste sorting process and their possible removal from outputs, *Journal of Hazardous Materials*, 175, 747-753, 2010.

- [Moreno *et al.*, 2015] Moreno J., Cothenet A., Cazacliu B., Influence du malaxage sur la rhéologie des bétons de granulats recyclés, Rapport RECYBETON n° R15RECY016, 41 p., 2015.
- [Moreno *et al.*, 2016] Moreno J., Cazacliu B., Artoni R., Cothenet A., Recycled concrete aggregate friability during mixing new concrete, *Construction and Building Materials*, 116, 299-309, 2016.
- [Mounanga *et al.*, 2006] Mounanga P., Baroghel-Bouny V., Loukili A., Khelidj A., Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro-macro correlations, *Cement and Concrete Research*, 36, 110-122, 2006.
- [Mousavi *et al.*, 2017] Mousavi M., Ventura A., Antheaume N., LCA Modeling of Cement Concrete Waste Management, 35^e Rencontres de l'AUGC, Nantes, 134-137, 2017.
- [MRF, 2014] MRF, Diagnostic rapide et environnemental appliqué aux matériaux recyclés issus du BTP, Projet DREAM – Synthèse, MRF Agence DLB, Convention ASEME 1206C0068, 22 p., 2014.
- [Mueller, 2014] Mueller, A., Recycled Aggregate Characterization Methods. III Progress of Recycling in the Built Environment, I. Martins, C. Ulsen and S. C. Angulo, 244-276, 2015.
- [Mukai et Kikuchi, 1988] Mukai T., Kikuchi M., Properties of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate, In: Demolition and reuse of concrete and masonry, 2, 670-679, 1988.
- [Mulder *et al.*, 2007] Mulder E., de Jong T.P.R., Feenstra L., Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste, *Waste Management*, 27, 1408-1415, 2007.
- [Müller *et al.*, 2015] Müller C., Reiners J., Palm S., Closing the loop: What type of concrete re-use is the most sustainable option (Technical Report No. A-2015-1860), European Cement Research Academy, 41, 2015.
- [Müller et Wienke, 2004] Müller A., Wienke L., Measurements and models for the gravity concentration of C&D waste through jiggling. In: Vázquez, E., Hendriks, Ch. F., Janssen, G.M.T. (Eds.), Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, RILEM Publications SARL, 115-122, 2004.
- [Multon *et al.*, 2008] Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Leklou, N., Petit, L., Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, *Cement and Concrete Research*, 38, 3, 350-359, 2008.
- [Mulugeta *et al.* 2011] Mulugeta, M., Engelsen, C.J., Wibetoe, G., & Lund, W. Charge-based fractionation of oxyanion-forming metals and metalloids leached from recycled concrete aggregates of different degrees of carbonation: A comparison of laboratory and field leaching tests, *Waste Management*, 31(2), 253-258, 2011.
- [Murata et Kukokawa, 1992] Murata J., Kukokawa H., Viscosity Equations for Fresh Concrete, *ACI Materials Journal*, 89(3), 230-37, 1992.
- [Nagataki *et al.*, 2004] Nagataki S., Gokce A., Saeki T., Hisada M., Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Research*, 34, 6, 965-971, 2004.

- [Naik *et al.*, 2012] Naik S. M., Venkata Subramanya B.V., Sathyamurthy R., Prasad N., Evaluation of Fatigue Strength of Recycled Aggregate Concrete for Pavement Construction, Proceedings of International Conference on Advances in Architecture and Civil Engineering (AARCV 2012), ed. Bonfring, Bangalore, 112-118, 2012.
- [NB 26, 2014] Norsk Betongforening. Publikasjon nr.26 – Materialgjenvinning av betong og murverk for betongproduksjon, Norway, 2014.
- [NEN 5905+A1, 2008] Nederlandse aanvulling op NEN-EN 12620 “Toeslagmaterialen voor beton”, Netherlands, 2008.
- [NEN, 2004] Netherlands standardisation institute, Leaching characteristics – Determination of the leaching of inorganic components from moulded or monolithic materials with a diffusion test – Solid earthy and stony materials, NEN 7375, 2004.
- [Neveu *et al.*, 2016] Neveu A., Artoni R., Richard P., Descantes Y., Fracture of granular materials composed of arbitrary grain shapes: A new cohesive interaction model, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 95, 308-319, 2016.
- [Neveu, 2016] Neveu A., Simulation numérique de la fragmentation des granulats, thèse de doctorat de l'Ecole doctorale SPIGA, 2016.
- [Neville *et al.*, 1983] Neville A., Dilger W., Brooks J., Creep of plain and structural concrete, Construction Press, 1983.
- [Neville, 2004] Neville A., The confused world of sulphate attack on concrete, Cement and Concrete Research, 34, 1275-1296, 2004.
- [NF 033, 2016] Référentiel de certification du béton prêt à l'emploi, révision 24, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2016.
- [NF DTU 21, 2017] Travaux de bâtiment – Exécution des ouvrages en béton – Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2017.
- [NF EN 1097-1, 2011] Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval), AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2011.
- [NF EN 1097-2, 2010] Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2 : méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation, AFNOR, Paris, La Plaine Saint-Denis, 2010.
- [NF EN 1097-6, 2014] Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2014.
- [NF EN 12350-2, 2012] Essais pour béton frais. Partie 2 : Essai d'affaissement, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF EN 12350-7, 2012] Essais pour béton frais. Partie 7 : Teneur en air – Méthode de la compressibilité, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF EN 12350-x] Essais sur béton frais (différentes parties), AFNOR, La Plaine Saint-Denis.
- [NF EN 12390-13, 2014] Essai pour béton durci – Partie 13 : détermination du module sécant d'élasticité en compression, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2014.

- [NF EN 12390-3, 2012] Essais pour béton durci – Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF EN 12390-5, 2012] Essais pour béton durci. Partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF EN 12390-6, 2012] Essais pour béton durci. Partie 6 : détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF EN 12390-x] Essais sur béton durci (différentes parties), AFNOR, La Plaine Saint-Denis.
- [NF EN 12457-2, 2002] Caractérisation des déchets – Lixiviation – Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues – Partie 2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité), AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2002.
- [NF EN 12620, 2008] Granulats pour béton. Caractéristiques des granulats et des fillers élaborés à partir de matériaux naturels, artificiels ou recyclés et des mélanges de ces granulats qui sont utilisés dans la fabrication du béton, NF EN 12620+A1, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2008.
- [NF EN 13139, 2002] Granulats pour mortiers, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2002.
- [NF EN 13369, 2013] Règles communes pour les produits préfabriqués en béton, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2013.
- [NF EN 13670, 2013] Exécution des structures en béton, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2013.
- [NF EN 13670/CN, 2013] Exécution des structures en béton – Complément national à la NF EN 13670, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2013.
- [NF EN 1367-4, 2008] Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats – Partie 4 : détermination du retrait au séchage, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2018.
- [NF EN 13877-1, 2013] Chaussées en béton – Partie 1 : matériaux, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2013.
- [NF EN 14630, 2007] Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Méthodes d'essais – Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphtaléine, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2007.
- [NF EN 15804, 2012] Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF EN 1744-1+A1, 2014] Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 1 : analyse chimique, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2014.
- [NF EN 1744-5, 2007] Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 5 : détermination des sels chlorures solubles dans l'acide, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2007.
- [NF EN 1744-6, 2007] Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats – Partie 6 : détermination de l'influence d'un extrait de granulats recyclés sur le temps de prise initial du ciment, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2007.

- [NF EN 196-1, 2016] Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : détermination des résistances, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2016.
- [NF EN 196-3, 2017] Méthodes d'essai des ciments – Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2017.
- [NF EN 197-1, 2012] Ciment – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF EN 1992-1-1, 2005] Eurocode 2 : calcul des structures en béton, Partie 1-1 : Règles générales et règles pour le bâtiment, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2005.
- [NF EN 1992-1-1/A1, 2015] Eurocode 2 : calcul des structures en béton, Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, Amendement A1, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2015.
- [NF EN 1992-2, 2006] NF EN 1992-2, Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 2 : ponts en béton – Calcul des dispositions constructives, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2006.
- [NF EN 206, 2013] Béton – Spécification, performances, production et conformité, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2013.
- [NF EN 206/CN, 2014] Béton – Spécification, performance, production et conformité – Complément National à la Norme NF EN 206, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2014.
- [NF EN 932-3, 1996] Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 3 : procédure et terminologie pour la description pétrographique simplifiée AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 1996.
- [NF EN 933-1, 2012] Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1 : détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF EN 933-11, 2009] Essais pour déterminer les caractéristiques des granulats – Partie 11 : essai de classification des constituants des gravillons recyclés, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2009.
- [NF EN 933-3, 2012] Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 3 : détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF EN 933-9, 2013] Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 9 : qualification des fines – Essai au bleu de méthylène, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2013.
- [NF EN ISO 14040, 2006] Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2006.
- [NF EN ISO/CEI 17025, 2015] Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2015.
- [NF FD CEN/TR 15739, 2010] Produits préfabriqués en béton – Surface et parements de béton – Éléments d'identification, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2010.
- [NF FD P 18-503, 1989] Surfaces et parements de béton – éléments d'identification, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 1989.

- [NF FD P 18-541, 2015] Granulats – Guide pour l'élaboration du dossier carrière dans le cadre de la prévention des désordres liés à l'alcali-réaction, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2015.
- [NF FD P18-456, 2004] Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction – Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2004.
- [NF FD P18-464, 2014] Béton – Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2014.
- [NF FD P18-542, 2015] Granulats – Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2015.
- [NF ISO 5725-2, 1994] Application de la statistique – Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 1994.
- [NF P 18-417, 1989] Béton – Mesure de la dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 1989.
- [NF P 18-424, 2008] Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'eau – Dégel dans l'eau, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2008.
- [NF P 18-425, 2008] Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'air – Dégel dans l'eau, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2008.
- [NF P 18-452, 2017] Bétons – Mesure du temps d'écoulement des bétons et mortiers au maniabilimètre, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2017.
- [NF P 18-454, 2004] Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction – Essai de performance, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2004.
- [NF P 18-459, 2010] Essais pour béton durci – essai de porosité et de masse volumique, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2010.
- [NF P 18-542, 1988] Bétons – Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers au maniabilimètre, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 1988.
- [NF P 18-545, 2011] Granulats – Éléments de définition, conformité et codification, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2011.
- [NF P 18-566, 2014] Granulats – Analyse granulométrique – Essai à l'aide d'un appareil d'ombroscopie, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2014.
- [NF P 18-576, 2013] Granulats – Détermination du coefficient de friabilité du sable, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2013.
- [NF P 18-594, 2015] Granulats – Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2015.
- [NF P 98-170, 2006] Chaussées en béton de ciment – Exécution et contrôle, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2006.
- [NF P18-454, 2004] Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction – Essai de performance, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2004.
- [NF P18-594, 2015] Granulats – Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2015.

- [NF prCEN/TS 12390-12, 2010] Méthode d'essai béton durci – Partie 12, Détermination du potentiel de résistance à la carbonatation du béton : méthode de carbonatation accélérée, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2010.
- [NF XP 18-581, 1997] Granulats – Dosage rapide des sulfates solubles dans l'eau – Méthode par spectrophotométrie, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 1997.
- [NF XP 18-594, 2004] Granulats – Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2004.
- [NF XP P 18-420, 2012] Béton – Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF XP P 18-427, 1996] Béton – Détermination des variations dimensionnelles entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 1996.
- [NF XP P 18-543, 2017] Granulats – Étude pétrographique des granulats appliquée à l'alcali-réaction, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2017.
- [NF XP P 18-544, 2015] Granulats – Détermination des alcalins actifs solubles dans l'eau de chaux, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2015.
- [NF XP P01-064/CN, 2014] Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction – Complément national à la NF EN 15804, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2014.
- [NF XP P18-458, 2008] Essai pour béton durci – Essai de carbonatation accélérée – Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2008.
- [NF XP P18-462, 2012] Essai sur béton durci – Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non-stationnaire – Détermination du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2012.
- [NF XP P18-463, 2011] Bétons – Essai de perméabilité aux gaz sur béton durci, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2011.
- [NF XP P18-543, 2015] Granulats – Etude pétrographique des granulats appliquée à l'alcali-réaction, AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2015.
- [NF XP P18-544, 2015] Granulats – Détermination des alcalins actifs solubles dans l'eau de chaux, AFNOR 2015,.
- [Ngo *et al.*, 2010] Ngo T. T., Kadri E. H., Bennacer R., Cussigh F., Use of Tribometer to Estimate Interface Friction and Concrete Boundary Layer Composition during the Fluid Concrete Pumping, *Construction and Building Materials*, 24(7),1253-61, 2010.
- [Nguyen *et al.*, 2013] Nguyen V-H., Leklou N., Aubert J-E., Mounanga P., The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars, *Construction and Building Materials*, 48, 479-484, 2013.
- [Nguyen *et al.*, 2014] Nguyen T.D., Le Saout G., Devillers P., Garcia-Diaz E., The effect of limestone aggregate porosity and saturation degree on the interfacial zone, 2th International Symposium on Cement-Based Materials For Nuclear Waste (NUWCEM 2014), Avignon, France, 2014.

- [NIEA, 2013] Northern Ireland Environment Agency WRAP quality protocol – Aggregates from inert waste, Waste & Resources Action Programme – Technical report, 24 p., 2013.
- [Niry, 2015] Niry R.-R., Comportement des bétons à haute température : influence de la nature du granulat, Thèse de l'université de Cergy-Pontoise, 2015.
- [Nixon, 1978] P.J. Nixon, Recycled concrete as an aggregate for concrete – A review, Materials and Structures: RILEM Publications, 65, 11, 371-378, 1978.
- [Noguchi *et al.*, 2011] Noguchi T., Kitagaki R., Tsujino M., Minimizing environmental impact and maximizing performance in concrete recycling, Structural Concrete, 12, 36-46, 2011.
- [Noguchi, 2015] Noguchi T., Outline of AIJ recommendation for Mix Design, Production and Construction Practice of Concrete with Recycled Concrete Aggregate, Concrete Journal, 53 2, 165-171, 2015.
- [NQ 2560-600, 2002] BNQ. Granulats – Matériaux recyclés fabriqués à partir de résidus de béton, d'enrobés bitumineux et de briques – classification et caractéristiques, Quebec, 2002.
- [NS 3473, 2003] Norsk Betongforening, Prosjektering av betongkonstruksjoner – Beregnings- og konstruksjonsregler, Norway, 2003.
- [Oberholster, 1983] Oberholster R.E., Alkali reactivity of siliceous rock aggregates: diagnosis of the reaction, testing of cement and aggregate and prescription of preventive measures. 6th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Idorn, G.M. and Rostam S., Eds., Danish Concrete Association, 419-433, 1983.
- [Odler *et al.*, 1995] Odler I., Chen Y., Effect of cement composition on the expansion of heat-cured cement pastes, Cement and Concrete Research, 25, 4, 853-862, 1995.
- [OFEV, 2006] OFEV, Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux. Environnement pratique, 31, 36 p., 2006.
- [OFRIR, 2016] OFRIR, Observatoire français des ressources dans les infrastructures. <http://ofrir2.ifsttar.fr/>, 2016.
- [Ogawa et Nawa, 2012] Ogawa H., Nawa T., Improving the Quality of Recycled Fine Aggregate by Selective Removal of Brittle Defects, Journal of Advanced Concrete Technology, 10(12), 395-410, 2012.
- [Oikonomou, 2005] Oikonomou N. D., Recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Research, 27, 2, 315-318, 2005.
- [Oksri-Nelfia *et al.*, 2016] Oksri-Nelfia L., Mahieux P.Y., Amiri O., Turcry Ph., Lux J., Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials, Materials and Structures, 49, 3239-3251, 2016.
- [Oliveira, 1992] Oliveira W.S., Réactivité et aptitude à la cuisson du cru et son influence sur la spécification des réfractaires pour zones de cuisson et de transfert des fours rotatifs à ciment. Ciments, Bétons, Plâtres et Chaux, 796, 3/92, 169-176, 1992.
- [Olivier *et al.*, 1995] Olivier J.P., Maso J.C., Bourdette B., Interfacial transition zone in concrete, Advance Cement Based Material, 2, 30-38, 1995.

- [Olorunsogo et Padayachee, 2002] Olorunsogo F.T., Padayachee N., Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes, *Cement and Concrete Research*, 32, 2002.
- [Omar *et al.*, 2009] Omar M., Loukili A., Pijaudier-Cabot G., Le Pape Y., Creep-Damage Coupled Effects: Experimental Investigation on Bending Beams with Various sizes, *Journal of Material Civil Engineering*, 21(2), 65-72, 2009.
- [Omary *et al.*, 2015] Omary S., Ghorbel E., Wardeh G., Influence de l'incorporation des granulats recyclés de démolition sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons fluides, *Proceedings of 33th Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Orléans, 2015.
- [Omary *et al.*, 2016] Omary S., Ghorbel E., Wardeh G., Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties, *Construction and Building Materials*, 108, 163, 2016.
- [Omary, 2017] Omary S., Effet de l'incorporation des granulats recyclés sur le comportement et la durabilité vis-à-vis du gel-dégel des bétons, Thèse de l'Université de Cergy Pontoise, 2017.
- [Ordonnance n° 2010-1579] du 17/12/10 portant diverses dispositions d'adaptation au droit de l'Union européenne dans le domaine des déchets, 2010.
- [ORÉE, 2015] Circular economy, Serving the preservation of resources and the climate, A flows and channels approach to a territorial ecosystem, 2015.
- [Orsetti, 1997] Orsetti S., Influence des sulfates sur l'apparition et le développement de pathologies dans les matériaux de génie civil traités ou non aux liants hydrauliques, Cas du plâtre dans les granulats issus de produits de démolition, Thèse de l'Université Paris 6, 1997.
- [Ortiz *et al.*, 2009] Ortiz O., Castells F., Sonnemann G., Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA, *Construction and Building Materials*, 23, 1, 28-39, 2009.
- [Otsuki *et al.*, 2003] Otsuki N., Miyazato S., Yodsudjai W., Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete, *Journal of materials in civil engineering*, 15, 443-451, 2003.
- [Padmini *et al.*, 2009] Padmini A.K., Ramamurthy K., Mathews M.S., Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 23, (2), 829-836, 2009.
- [Palmieri *et al.*, 2014] Palmieri R., Bonifazi G., Serranti S., Automatic detection and classification of EOL-concrete and resulting recovered products by hyperspectral imaging, in: VoDinh, T., Lieberman, R.A., Gauglitz, G.G. (Eds.), *Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XI*, Spie-Int Soc Optical Engineering, Bellingham, 91060D, 2014.
- [Paranhos *et al.*, 2016] Paranhos R.S., Cazacliu B.G., Sampaio C.H., Petter C.O., Neto R.O., Huchet F., A sorting method to value recycled concrete, *Journal of Cleaner Production* 112, Part 4, 2249-2258, 2016.
- [Park *et al.* 2012] Park J., Tae S., Kim, T., Life cycle CO₂ assessment of concrete by compressive strength on construction site in Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5, 2940-2946, 2012.

- [Pavoine *et al.*, 2007] Pavoine A., Divet L., Réactivité d'un béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne, Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Méthode d'essai des LCPC 66, 19 p., 2007.
- [Pavoine *et al.*, 2012] Pavoine A., Brunetaud X., Divet L., The impact of cement parameters on Delayed Ettringite Formation, Cement and Concrete Composites, 34, 4, 521-528, 2012.
- [PD 6682-1, 2009] BSI, Aggregates – Part 1: Aggregates for concrete – Guidance on the use of BS EN 12620, UK, 2009.
- [PDR, 2000] PDR, US Département of Housing & Urban Development – Office of Policy Development and Research, A guide to Deconstruction, 2000.
- [Pedro *et al.*, 2014] Pedro D., de Brito J., Evangelista L., Influence of the Use of Recycled Concrete Aggregates from Different Sources on Structural Concrete, Construction and Building Materials, 71, 141-151, 2014.
- [Pedro *et al.*, 2015] Pedro D., Brito J. de Evangelista L., Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process, Materials and Structures, 48, 3965-3978, 2015.
- [Pepe, 2015] Pepe M., A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications, Springer theses, ISSN 2190-5053, 167 p., 2015.
- [Petavratzi *et al.*, 2007] Petavratzi E., Kingman S.W., Lowndes I.S., Assessment of the dustiness and the dust liberation mechanisms of limestone quarry operations, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 46, 1412-1423, 2007.
- [Petitpain *et al.*, 2017] Petitpain M., Dehaut S., Jacquemot F., Rougeau P., Economie circulaire – Utilisation des matières premières secondaires dans les bétons, Annales du BTP, 68, 4, ESKA, 2017.
- [Pettingell, 2008] Pettingell H., An effective dry sand manufacturing process from japan; potential to replace natural sand entirely in concrete, Quarry Management Magazine, 2008.
- [Pillard *et al.*, 2018] Pillard W., Bodet R., Braymand S., Certifications pour évaluer la qualité environnementale des bâtiments, Rapport RECYBETON, 35 p., 2018.
- [PN RECYBETON, 2011] RECYclage Complet Des BETONs ; <http://www.pnrecybeton.fr/>.
- [Poole, 1992] Poole, A.B., Alkali-silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion. 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, London, England, 1, 782-789, 1992.
- [Poon *et al.*, 2004] Poon C.S., Shui Z.H., Lam L., Fok H., Kou S.C., Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. Cement and Concretes Research, 34, 31-36, 2004.
- [Poon et Chan, 2007a] Poon C., Chan D., Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates, Construction and Building Materials, 21(1), 164-175, 2007.
- [Poon et Chan, 2007b] Poon C., Chan D., The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong, Resources, Conservation and Recycling, 50 (3), 293-305, 2007.

- [PREDEC Région Île-de-France] Plan régional de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers du Bâtiment et des Travaux Publics, <http://www.oree.org/>, association Build Green <https://www.build-green.fr/>.
- [Prezzi *et al.*, 1997] Prezzi M., Monteiro J.M., Sposito G., The alkali-silica reaction, Part 1: Use of the double layer theory to explain the behaviour of reaction-products gels, *ACI Materials Journal*, 94, 10-17, 1997.
- [Prince et Singh, 2013] Prince M. J. R., Singh B., Bond behaviour of deformed steel bars embedded in recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 49, 852-862, 2013.
- [Prince et Singh, 2014] Prince M. J. R., Singh B., Bond strength of deformed steel bars in high-strength recycled aggregate concrete, *Materials and Structures*, 48(12), 3913-3928, 2014.
- [PTV 406, 2003] COPRO, Granulats recyclés – Granulats de débris de béton, de débris mixtes, de débris de maçonnerie et de débris asphaltiques – Pierres concassées et graves – Granulats pour béton, MTLH et GNT, Belgique, 2003.
- [Pumain *et al.*, 1997] Pumain D., Saint-Julien T., Mathian H., L'analyse spatiale. 1. Localisations dans l'espace, Paris : A. Colin, 1997.
- [Pumain et St Julien, 2010] Pumain D., Saint-Julien T., L'analyse spatiale. 2, Les interactions, Paris : A. Colin, 2010.
- [Purnell et Black, 2012] Purnell P., Black L., Embodied carbon dioxide in concrete: Variation with common mix design parameters, *Cement and Concrete Research*, 42, 6, 874-877, 2012.
- [Puttallaz *et al.*, 2016] Putallaz J.C. et al. Guide technique d'application pour l'utilisation de matériaux minéraux de recyclage. Technical report from Canton of Valais, AVE WBV and AVGB, Mineral Resources commission, January 28, 76 p., 2016.
- [Quattrone *et al.*, 2016] Quattrone M., Cazacliu B., Angulo S.C., Hamard E., Cothenet A., Measuring the water absorption of recycled aggregates, what is the best practice for concrete production? *Construction and Building Materials*, 123, 690-703, 2016.
- [Radocea, 1994] Radocea A., A model of plastic shrinkage, *Magazine of Concrete Research*, 46, 125-132, 1994.
- [Raeis *et al.*, 2015] Raeis S., Reza B., Daniotti B., Pelosato R., Dotelli G., Properties of Cement-lime Mortars vs. Cement Mortars Containing Recycled Concrete Aggregates, *Construction and Building Materials*, 84, 84-94, 2015.
- [Rafila, 1971] Rafila K., Formules empiriques pour le calcul de la capacité au cisaillement des poutres en béton armé, *Strasse, Brücke, Tunnel* 23(12), 311-320, 1971.
- [Ravina et Shalon, 1968] Ravina D, Shalon R., Plastic shrinkage cracking, *ACI Journal*, 65(22), 282-94, 1968.
- [Ravindrarajah et Tam, 1985] Ravindrarajah S.R., Tam C.T., Recycling concrete as fine aggregate in concrete, *International Journal Cement and Composite, Lightweight Concrete*, 9(4), 235-241, 1985.
- [RECYC-QUEBEC, 1999] RECYC-QUEBEC, Guide d'information sur le recyclage des matériaux secs, 1999.

- [Reggad, 1993] Reggad A., Influence de la finesse de mouture d'un cru quartzeux et alcalin sur la texture du clinker et les propriétés des ciments, Ciments, Bétons, Plâtres et Chaux, 103, 3/93, 242-244, 1993.
- [Repellin *et al.*, 2014] Repellin, Duret, Barles, Comptabilité des flux de matières dans les régions et les départements, Guide méthodologique, La Défense : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'énergie – CGDD (coll. « Repères »), 2014.
- [Resolução 307/02, 2002] CONAMA, Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, Brazil, 2002.
- [Richardson *et al.*, 2011] Richardson A., Coventry K., Bacon J., Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete, Journal of Cleaner Production, 19, 2011.
- [Ricotier, 2012] Ricotier D., Dimensionnement des structures en béton selon l'Eurocode 2. Editions du Moniteur, Paris, 2012.
- [RILEM – TC 107-CSP, 1998] Standardized Test Methods for Creep and Shrinkage. Materials and Structures, 31, 507-512, 1998.
- [RILEM, 1994] Specifications for concrete with recycled aggregates, RILEM, Materials and Structures, 27, 557-559, 1994.
- [RILEM, 1995] Compressive strength for service and accident conditions, RILEM Draft Recommendation 129-MHT Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures, Materials and Structures, 28, 7, 410-414, 1995.
- [Robinson et Modjabi, 1968] Robinson J.R., Modjabi S.S., La prévision des charges de flambement des poteaux en béton armé par la méthode de M. P. Faessel, Annales de l'ITBTP, 1295-1316, 1968.
- [Robinson et Morisset, 1969] Robinson J.R., Morisset A., Paramètres fondamentaux de la fissuration des tirants en béton armé. Annales de l'ITBTP, n° 254, série Béton, Béton armé (102), 227-246, 1969.
- [Rogers et Hooton, 1991] Rogers C.A., Hooton R.D., Reduction in mortar and concrete expansion with reactive aggregates due to alkali leaching, Cement Concrete and Aggregates, 13, 1, 42-49, 1991.
- [Rønning, 2001] Rønning T. F., Freeze-thaw resistance of concrete: effect of: curing conditions, moisture exchange and materials. PhD thesis in Civil Engineering, Norwegian Institute of Technology, Division of Structural Engineering, Trondheim, Norway, 2001.
- [Roubault *et al.*, 1963] Roubault M., Fabries J., Touret J., Weisbrod A., Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant, Editions Lamarre-Poinat, 1963.
- [Roussel, 2006] Roussel N., Correlation between Yield Stress and Slump: Comparison between Numerical Simulations and Concrete Rheometers Results, Materials and Structures, 39, 501-9, 2006.
- [Roziere *et al.*, 2015] Roziere E., Cortas R., Loukili A., Tensile behaviour of early age concrete: New methods of investigation, Cement and Concrete Composites, 55, 153-161, 2015.

- [Ryu, 2002a] Ryu J.S., An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties, *Magazine of Concrete Research*, 2002.
- [Ryu, 2002b] Ryu J.S., Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate, *Journal of Materials Science Letters*, 21, 1565-1567, 2002.
- [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001] Sagoe-Crentsil K. K., Brown T., Taylor A. H., Performance of Concrete Made with Commercially Produced Coarse Recycled Concrete Aggregate, *Cement and Concrete Research*, 31, 707-712, 2001.
- [Salgues *et al.*, 2016] Salgues M., Souche J.-C., Devillers P., Garcia-Diaz E., Influence of initial saturation degree of recycled aggregates on fresh cement paste characteristics: consequences on recycled concrete properties, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2016, DOI: 10.1080/19648189.2016.1245630.
- [Saliba *et al.*, 2013] Saliba S., Grondin F., Matallah M., Loukili A., Boussa H., Relevance of a mesoscopic modeling for the coupling between creep and damage in concrete, *Mechanics of time-dependent materials*, 17(3), 481-499, 2013.
- [Samouh *et al.*, 2016] Samouh H., Soive A., Roziere E., Loukili A., Experimental and numerical study of size effect on long-term drying behavior of concrete: influence of drying depth, *Materials and Structures*, 1-20, 2016.
- [Sampaio *et al.*, 2016] Sampaio C.H., Cazacliu B.G., Miltzarek G.L., Huchet F., Le Guen L., Petter C.O., Paranhos R., Ambrós W.M., Oliveira M.L.S., 2016, Stratification in air jigs of concrete/brick/gypsum particles, *Construction and Building Materials*, 109, 63-72, 2016.
- [Sampaio et Tavares, 2005] Sampaio C.H., Tavares L.M.M., Beneficiamento gravimétrico. Uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade, Editora da Ufrgs, 2005.
- [Sanchez de Juan et Aleajos, 2004] Sanchez de Juan M., Aleajos Gutiérrez P., Influence of recycled aggregate quality on concrete properties, *International Rilem Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona, Spain, 545-553, 2004.
- [Sánchez *et al.*, 2004] Sánchez de Juan M., Aleajos Gutierrez P. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures*, Barcelona, Espana, 2004.
- [Sánchez-Roldán *et al.* 2016] Sánchez-Roldán Z., Martín-Morales M., Valverde-Palacios I., Valverde-Espinosa I., Zamorano M., Study of potential advantages of pre-soaking on the properties of pre-cast concrete made with recycled coarse aggregate, *Materiales de Construcción* 66, 2016.
- [Sarhat et Sherwood, 2013] Sarhat S. Sherwood E., Residual Mechanical Response of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperature, *Journal of Material in Civil Engineering*, 25, 1721-1730, 2013.
- [Sato *et al.*, 2007] Sato R., Maruyama I., Sogabe T., Sogo M., Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5, 43-61, 2007.

- [Schmidt et Kern, 2001] Schmidt R., Kern A., Quantitative XRD phase analysis. *World Cement*, 32, 35-42, 2001.
- [Schnellert et Mueller, 2011] Schnellert T., Kehr K., Müller A., Development of a separation process for gypsum-contaminated concrete aggregates. In: John, V.M., Vazquez, E., Angulo, S.C., Ulsen, C. (Eds.), *Proceedings of the Second International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment*, RILEM Publications SARL, 477-482, 2011.
- [Schouenborg *et al.*, 2004] Schouenborg B., Aurstad J., Pétursson P., Test methods adapted to alternative aggregates. In: Vázquez E, Hendriks ChF, Janssen GMT (eds) *International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, Barcelona, 1154-1162, 2004.
- [Schubert *et al.*, 2012] Schubert S., Hoffmann C., Leemann A., Moser K., Motavalli M., Recycled aggregate concrete: Experimental shear resistance of slabs without shear reinforcement, *Engineering Structures*, 41, 490-497, 2012.
- [Schwartzentruber et Catherine, 2000] Schwartzentruber A., Catherine C., La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvants, *Material and Structures*, 33, 8, 475-482, 2000.
- [Scott, 2006] Scott H. C., Mitigating alkali silicate reaction in recycled concrete, PhD Thesis, University of New Hampshire, 2006.
- [Scrivener *et al.*, 1988] Scrivener K.L., Bentur A., Pratt P.L., Quantitative characterization of the transition zone in high strength concretes, *Advances in Cement Research*, 1, 230-237, 1988.
- [Scrivener *et al.*, 2004] Scrivener K.L., Crumbie A.K., Laugesen P., The Interfacial Transition Zone (ITZ) between cement past and aggregate in concrete, *Interface Science*, 12, 411-421, 2004.
- [Scrivener et Gartner, 1987] Scrivener K.L., Gartner E.M., Microstructural Gradients in Cement Paste Around Aggregate Particles, *MRS Proceeding*, 114, 77-86, 1987.
- [Scrivener et Pratt, 1996] Scrivener K.L., Pratt P.L., in *Interfacial Transition Zone in Concrete*, Ed. J.C. Maso E&FN, Spon London, 3-17, 1996.
- [Scrivener, 1999] Scrivener, K.L., Characterization of the ITZ and its quantification by test methods. In: Alexander MG, Arliguie G, Ballivy G, Bentur A, Marchand J, editors. *Engineering and transport properties of the interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*, RILEM Report, 20, RILEM Publications, 3-14, 1999.
- [Seara-Paz *et al.*, 2013] Seara-Paz S., Gonzalez-Fontboa B., Bond behavior between steel reinforcement and recycled concrete, *Materials and Structures*, 47(1), 323-334, 2013.
- [Sedran *et al.*, 2010] Sedran T., Durand C., de Larrard F., An example of UHPFRC recycling, "Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development", Chapter 44, ed. J. Resplendino, F. Toulemonde, November 2010, Wiley-ISTE, 814 p., 2010.
- [Sedran et de Larrard, 1994] Sedran T., de Larrard F., RENÉ-LCPC : Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 194, 11-12, 1994.

- [Sedran et Le Mouel, 2016] Sedran T., Le Mouel J., Comportement du béton recyclé durci en fatigue par flexion pour utilisation routière, Rapport RECYBETON n° R/16/RECY/035, 2016.
- [Sedran, 2013] Sedran T., Mise au point des formules de béton de référence, Projet National RECYBETON n° R/13/RECY/003, Rapport IFSTTAR, Nantes, 2013.
- [Seghier 2009] Seghier C., La production mondiale de déchets progresse toujours, Actu environnement.com, 2009.
- [Serres *et al.*, 2016] Serres N., Braymand S., Feugeas F., Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment, *Journal of Building Engineering*, 5, 24-33, 2016.
- [SETRA, 2011] Guide sur l'acceptabilité en technique routière de matériaux alternatifs – évaluation environnementale, 32 p., 2011.
- [SETRA-LCPC, 1997] Manuel de dimensionnement des structures neuves, Guide Technique, ed. SETRA-LCPC, 248 p., 1997.
- [SETRA-LCPC, 1998] Catalogue des structures types de chaussées neuves, ed. SETRA-LCPC, 1998.
- [Shannag, 2000] Shannag M.J., High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume, *Cement and Concrete Composites*, 22(6), 399-406, 2000.
- [Shehata *et al.*, 2010] Shehata M.H., Christidis C., Mikhael W., Rogers C., Lachemi M., Reactivity of reclaimed concrete aggregate produced from concrete affected by alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 40, 575-582, 2010.
- [Shehata et Thomas, 2000] Shehata M.H., Thomas M.D.A., The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 30, 7, 1063-1072, 2000.
- [Shen *et al.*, 1995] Shen K.L., Soong T. T., Chang K.C., Lai M. L., Seismic behaviour of reinforced concrete frame with added viscoelastic dampers, *Engineering Structures*, 17(5), 372-380, 1995.
- [Shen *et al.*, 2009] Shen L., Struble L., Lange D., Modeling Dynamic Segregation of Self-Consolidating Concrete, *ACI Materials Journal*, 106(4), 375-380, 2009.
- [Shima *et al.*, 2005] Shima H., Tateyashiki H., Matsuhashi R., Yoshida Y., An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3, 2005.
- [SIA, 2010] Société Suisse des ingénieurs et architectes, Béton de recyclage, Cahier technique 2030, Switzerland, 6p, 2010.
- [Silva *et al.*, 2014a] Silva, R.V., de Brito, J., Dhir, R.K., Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Construction and Building Materials*, 65, 201-217, 2014, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117.
- [Silva *et al.*, 2014b] Silva R.V., de Brito J., Dhir R.K., The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(7), 825-849, 2014.

- [Silva *et al.*, 2015a] Silva R.V., de Brito J., Dhir R.K., Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 83, 108-118, 2015.
- [Silva *et al.*, 2015b] Silva, R.V, Neves, R., de Brito, J, Dhir, R.K. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 62, 22-32, 2015.
- [Silva *et al.*, 2016] Silva R.-V., de Brito J., Evangelista L., Dhir R.-K., Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2, *Construction and Building Materials*, 105, 144-156, 2016.
- [Silva *et al.*, 2017] Silva R. V., de Brito J., Dhir R. K., Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review, *Journal of Cleaner Production*, 143, 598-614, 2017.
- [Sim et Park, 2011] Sim J., Park C., Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate, *Waste Manage (Oxford)*, 2011.
- [Slowik *et al.*, 2008] Slowik V., Schmidt M., Fritzsche R., Capillary Pressure in Fresh Cement-Based Materials and Identification of the Air Entry Value, *Cement and Concrete Composite*, 30 (7), 557-565, 2008.
- [Slowik et Ju, 2011] Slowik V., Ju J.W., Discrete Modeling of Plastic Cement Paste Subjected to Drying, *Cement and Concrete Composite*, 33 (9), 925-935, 2011.
- [SNBPE, 2011] BETie, Béton et impacts Environnementaux, tool for calculation of environmental impact of concrete, available on <http://www.snbpe.org>.
- [Sobhan *et al.*, 2016] Sobhan K., Gonzalez L., Reddy D. V., Durability of a pavement foundation made from recycled aggregate concrete subjected to cyclic wet-dry exposure and fatigue loading, *Materials and Structures*, 49, 2271-2284, 2016.
- [Sobhan et Krizek, 1999] Sobhan K., Krizek R. J., Fatigue behavior of fiber-reinforced recycled aggregate base course, *Journal of Material Civil Engineering*, 11(2), 124-130, 1999.
- [Soualhi *et al.*, 2015] Soualhi H., Kadri E. H, Ngo T. T., Bouvet A., Cussigh F., Benabed B., Rheology of Ordinary and Low-Impact Environmental Concretes, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29(20), 2160-75, 2015.
- [Soualhi *et al.*, 2016] Soualhi H., Kadri E. H, Ngo T. T., Bouvet A., Cussigh F., Tahar Z. E. A., Design of Portable Rheometer with New Vane Geometry to Estimate Concrete Rheological Parameters, *Journal of Civil Engineering and Management*, 3730, 1-9, 2016.
- [Souche *et al.*, 2016] Souche J.-C., Devillers P., Salgues M., Garcia-Diaz E., Influence of recycled coarse aggregates on permeability of fresh concrete, submitted to *Cement and Concrete Composite*, 2016.
- [Souche, 2015] Souche J.-C., Etude du retrait plastique des bétons à base de granulats recyclés avec mesure de l'influence de leur degré de saturation, Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2015.
- [SRBTP, 2014] Syndicat des Recycleurs du BTP, Guide de conception et de fonctionnement des installations de traitement des déchets du BTP, 144p, 2014.

- [Sri Ravindrarajah et Tam, 1987] Sri Ravindrarajah R., Tam C.T., Recycling concrete as fine aggregate in concrete, *International Journal of Cement Composite and Lightweight Concrete*, 9, 1987.
- [SS EN 137003, 2008] SIS. Betong – Användning av EN 206-1 i Sverige, Sweden, 2008.
- [Stanton, 1940] Stanton T.E., Expansion of concrete through reaction between cement and aggregates, *Proceedings of The American Society of Civil Eng*, 1940.
- [Stassi, 2016] Stassi F., Le recyclage du béton bute sur plusieurs obstacles. *Usine nouvelle.com*, 7 octobre, 2016.
- [Stefan *et al.*, 2010] Stefan L., Benboudjema F., Torrenti J.M., Bissonnette B., Prediction of elastic properties of cement pastes at early ages, *Computational Materials Science*, 47, 775-784, 2010.
- [Stutzman *et al.*, 2014], Stutzman P., Heckert A., Tebbe A., Leigh S., Uncertainty in Bogue-calculated phase composition of hydraulic cements, *Cement and Concrete Research*, 61-62, 40-48, 2014.
- [Sucic et Lotfy, 2016] Sucic A., Lotfy A., Effect of new paste volume on performance of structural concrete using coarse and granular recycled concrete aggregate of controlled quality, *Construction and Buildings Materials*, 2016.
- [Tahar *et al.*, 2016] Tahar Z. E. A., Kadri E. H, Ngo T. T., Bouvet A., Kaci A., Influence of Recycled Sand and Gravel on the Rheological and Mechanical Characteristic of Concrete, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(4), 392-411, 2016.
- [Tahar *et al.*, 2017] Tahar Z. E. A., Ngo T. T., Kadri E. H., Bouvet A., Aggoun S., Effect of Cement and Admixture on the Utilization of Recycled Aggregates in Concrete, *Construction and Building Materials*, 149, 91-102, 2017.
- [Takahashi et Ando, 2009] Takahashi H., Ando M., 2009, DEM Simulation of Crushing for Concrete Blocks by Mobile Crusher, in: Nakagawa, M., Luding, S. (Eds.), *Powders and Grains*, American Institut of Physics, Melville, 843-846, 2009.
- [Tam *et al.*, 2005] Tam V.W.Y., Gao X.F., Tam C.M., Microstructural analysis of recycled concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement Concrete Research*, 35, 6, 1195-1203, 2005.
- [Tam *et al.*, 2007] Tam V.W.Y., Tam C.M., Le K.N., Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, *Resources, Conservation and Recycling* 50, 50 (1), 82-101, 2007.
- [Tam *et al.*, 2008] Tam V.W., Gao X., Tam C., Chan C. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 22(3), 364-9, 2008.
- [Tam et Tam, 2007] Tam V.W.Y, Tam C.M., Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach, *Journal of Materials Science*, 42, 2007.
- [Tam et Tam, 2008] Tam V. W. Y., Tam, C. M., Diversifying Two-Stage Mixing Approach (TSMA) for Recycled Aggregate Concrete : TSMA S and TSMA Sc., *Construction and Building Materials*, 122 (10), 2068-2077, 2008.
- [Tam, 2008] Tam V.W.Y., Economic comparison of concrete recycling: A case study approach, *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 821-828, 2008.

- [Tam, 2013] Tam V.W.Y., Improving waste management plans in construction projects, Handbook of recycled concrete and demolition waste, Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [Tamimi, 1994] Tamimi A.K., The effects of a new mixing technique on the properties of the cement paste-aggregate interface, Cement and Concrete Research, 24, 1299-1304, 1994.
- [Tasong *et al.*, 1999] Tasong W.A., Lynsdale C.J., Cripps J.C., Aggregate-cement paste interface, Cement and Concrete Research, 29, 1999.
- [Tavakoli et Soroushian, 1996a] Tavakoli, M., Soroushian, P., Strengths of Recycled Aggregate Concrete Made Using Field-Demolished Concrete as Aggregate, ACI Materials Journal, 93, 178-181, 1996.
- [Tavakoli et Soroushian, 1996b] Tavakoli M., Soroushian P., Drying Shrinkage Behavior of Recycled Aggregate Concrete, Concrete International, 58-61, 1996.
- [Taylor *et al.*, 2000] Taylor J. C., Hinczak I., Matulis C. E., Rietveld Full-Profile Quantification of Portland Cement Clinker: The Importance of Including a Full Crystallography of the Major Phase Polymorphs, Powder Diffraction, 15, 7-18, 2000.
- [Taylor *et al.*, 2001] Taylor H.F.W., Famy C., Scrivener K.L., Delayed ettringite formation, Cement and Concrete Research, 31, 5, 683-693, 2001.
- [Taylor, 1997] Taylor H.F.W., Cement chemistry, 2nd edition, Telford, London, 1997.
- [Technical Guide HB 155-20022, 2002] Standards Australia. Guide to the use of recycled concrete and masonry material. Technical Guide HB 155-20022, Australia, 2002.
- [Teh *et al.*, 2017] Teh S. H., Wiedmann T., Castel A., de Burgh J., Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia, Journal of Cleaner Production, 152, 312-320, 2017.
- [Teramoto *et al.*, 1998] Teramoto Y., Tsuji M., Kobayashi T., Application of mixing technique under decreased pressure on recycled concrete, 52, 456-461, 1998.
- [Thiery *et al.*, 2013] Thiery M., Dangla P., Belin P., Habert G., Roussel N., Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: A laboratory study on model materials, Cement and Concrete Research, 46, 50-65, 2013.
- [Thomas *et al.*, 1996] Thomas, M.D.A., Blackwell, B.Q., Nixon P.J., Estimating the alkali contribution from fly ash to expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete, Magazine of Concrete Research, 48, 177, 251-264, 1996.
- [Thomas *et al.*, 2013] Thomas Setién J., Polanco J.A., P. Alaejos P., Sánchez de Juan M., Durability of recycled aggregate concrete, Construction and Buildings Materials, 40, 2013.
- [Thomas *et al.*, 2014a] Thomas C., Sosa I., Setién J., Polanco J. A., Cimentada A. I., Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete, Journal of Cleaner Production, 65, 397-405, 2014.
- [Thomas *et al.*, 2014b] Thomas C., Sosa I., Setién J., Polanco J. A., Lombillo I., Cimentada A. I. (2014) Fatigue limit of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials, 52, 146-154, 2013.

- [Thomas et Jennings, 2009] Thomas J.-J., Jennings H., Materials of Cement Science Primer TEA-21, Year 5, Final Report, 2009.
- [Tomas, 1999] Tomas J., Schreier M., Gröger T., Ehlers S., Impact crushing of concrete for liberation and recycling, Powder Technology, 105, 39-51, 1999.
- [Topçu et Sengel, 2004] Topçu I.B. & Sengel S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate, Cement and Concrete Research, 34(8), 1307-12, 2004.
- [Topic *et al.*, 2017] Topic J., Prosek Z., Plachy T., Influence of increasing amount of recycled concrete powder on mechanical properties of cement paste, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 236, 2017, 012094.
- [Torgal, 2013] Torgal F.P., Handbook of recycled concrete and demolition waste / edited by Pacheco-Torgal F., Tam V., Labrincha J., Ding Y., de Brito J. Woodhead Pub, Cambridge, Philadelphia, 2013.
- [Torrenti et Benboudjema, 2005] Torrenti J.-M., Benboudjema F., Mechanical threshold of concrete at an early age, Materials and Structures, 38(277), 299-304, 2005.
- [Touzé *et al.*, 2017] Touzé S., Bru K., Ménard Y., Weh A., Von der Weid F., Electrical fragmentation applied to the recycling of concrete waste – Effect on aggregate liberation, International Journal of Mineral processing, 158, 68-75, 2017.
- [Tovar-Rodríguez *et al.*, 2013] Tovar-Rodríguez G., Barra M., Pialarissi S., Aponte D., Vázquez E., Expansion of mortars with gypsum contaminated fine recycled aggregates, Construction and Building Materials, 38, 1211-1220, 2013.
- [TRA 550, 2011] CRIC-OCCN, Règlement d'application BENOR BETON TRA 550, Belgium, 2011.
- [Tsoumani *et al.*, 2015] Tsoumani A.A., Barkoula N.-M., Matikas T.E., Recycled aggregate as structural material, Waste Biomass Valor, 6, 883-890, 2015.
- [Turcry et Loukili, 2006] Turcry P., Loukili A., Evaluation of Plastic Shrinkage Cracking of Self-Consolidating Concrete. ACI Materials Journal, 103 (4), 272-279, 2006.
- [Turcry, 2004] Turcry P., Retrait et Fissuration Des Bétons Autoplaçans : Influence de la formulation, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2004.
- [Ulsen *et al.*, 2013] Ulsen C., Kahn H., Hawlitschek G., Masini E.A., Angulo S.C., Separability studies of construction and demolition waste recycled sand, Waste Management 33, 656-662, 2013.
- [UNI 8520-1, 2005] UNI, Aggregati per calcestruzzo – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 – Parte 1: Designazione e criteri di conformità, Italy, 2005.
- [UNI 8520-2, 2005] UNI, Aggregati per calcestruzzo – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 – Requisiti, Italy, 2005.
- [UNICEM] <http://www.unicem.fr/accueil/materiaux-du-quotidien/economie-et-statistiques/>
- [UNPG, 2016] UNPG, L'industrie Française des granulats en 2015, UNICEM-UNPG, Rapport technique, 2016.
- [VALIDEO, 2001] VALIDEO, Construire durable aujourd'hui Certification des compétences et réalisations en construction durable, Belgique, 2011.

- [Van den Heede et De Belie, 2012] Van den Heede P., De Belie N., Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations, *Cement and Concrete Composites*, 34, 4, 431-442, 2012.
- [Vandecasteele *et al.*, 2013] Vandecasteele C., Heynen J., Goumans H., *Materials Recycling in Construction: A Review of the Last 2 Decades Illustrated by the WASCON Conferences, Waste and Biomass Valorization*, 4, 4, 695-701, 2013.
- [Vázquez *et al.*, 2014] Vázquez E., Barra M., Aponte D., Jiménez C., Valls S., Improvement of the Durability of Concrete with Recycled Aggregates in Chloride Exposed Environment, *Construction and Building Materials*, 67, 61-67, 2014.
- [Vegas *et al.*, 2015] Vegas I., Broos K., Nielsen P., Lambertz O., Lisbona A., Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology, *Construction and Building Materials*, 75, 121-128, 2015.
- [VERDE, 2016] VERDE Certificate, <http://www.gbce.es>, Spain.
- [Vicat, 1817] Vicat L., Principaux résultats de diverses expériences sur les chaux de construction, les mortiers ordinaires et les bétons, In *Annales Chimie Physique*, 5, 387-392, 1817.
- [Vieira *et al.*, 2011] Vieira JPB., Correia JR., Brito J., Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates, *Cement Concrete Research*, 41, 533-541, 2011.
- [Vieira *et al.*, 2016] Vieira D. R., Calmon J. L., Coelho, F. Z., Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 124, 656-666, 2016.
- [Villain *et al.*, 2007] Villain G., Thiery M., Platret G., Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry, *Cement and Concrete Research*, 37, 1182-1192, 2007.
- [Vitale *et al.*, 2017] Vitale P., Arena N., Di Gregorio F., Arena U. Life cycle assessment of the end-of-life phase of a residential building, *Special Thematic Issue: Urban Mining and Circular Economy*, 60, 311-321, 2017.
- [Vivian 2009] Vivian W.Y.T., Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. *Journal of Cleaner Production*, 17, 688-702, 2009.
- [Vrijders et Wastiels, 2017] Vrijders J., Wastiels L., Environmental impact of concrete with recycled aggregates an evaluation through 4 case studies, *HISER International Conference – Advances in recycling and management of construction and demolition waste*, Delft, 255-259, 2017.
- [Wallevik et Wallerik, 2011] Wallevik O. H., Wallevik J. E., Rheology as a Tool in Concrete science: The Use of Rheographs and Workability Boxes, *Cement and Concrete Research*, 41, 12, 1279-88, 2011.
- [Wallevik, 2006] Wallevik J. E., Relationship between the Bingham Parameters and Slump, *Cement and Concrete Research*, 36, 7, 1214-21, 2006.
- [Wang *et al.*, 2011] Wang, Z., Wang, L., Cui, Z., Zhou, M., Effect of recycled coarse aggregate on concrete compressive strength, *Transactions of Tianjin University*, 17, 229-234, 2011.

- [Wang et Gillott, 1991] Wang H., Gillott J.E., Mechanisms of alkali-silica reaction and significance of calcium hydroxide, *Cement and Concrete Research*, 21, 647-654, 1991.
- [Wardeh *et al.*, 2015a] Wardeh G., Ghorbel E., Gomart H., Mix Design and Properties of Recycled Aggregate Concretes: Applicability of Eurocode 2, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(1), 1-20, 2015.
- [Wardeh *et al.*, 2015b] Wardeh G., Fiorio B., Ghorbel E., Gomart H. Adhérence béton recyclé / armatures HA. Rapport RECYBETON n° R/15/RECY/021, rapport L2MGC, Cergy-Pontoise, 2015.
- [Wardeh et Ghorbel, 2013] Wardeh G., Ghorbel E., Prediction of fracture parameters and strain-softening behavior of concrete: effect of frost action, *Materials and Structures*, 48(1-2), 1-16, 2013.
- [Wardeh et Ghorbel, 2015] Wardeh G., Ghorbel E., Analyse du coefficient de ductilité en courbure des sections en béton armé incorporant des granulats recyclés, 9^e colloque National AFPS, Marne-La-Vallée, France, 2015.
- [Wasserman et Bentur, 1996] Wasserman R., Bentur A., Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength, *Cement and Concrete Composite*, 18, 67-76, 1996.
- [Wee *et al.*, 1996] Wee T., Chin M., Mansur M., Stress-Strain Relationship of High-Strength Concrete in Compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(2), 70-76, 1996.
- [Weil *et al.*, 2006] Weil M., Jeske U., Schebek L., Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values, *Waste Management and Research*, 24, 3, 197-206, 2006.
- [Weimann *et al.*, 2003] Weimann K., Giese L.B., Mellmann G., Simon F.-G., Building materials from waste, *Materials Transactions*, 44, 1255-1258, 2003.
- [Wen *et al.*, 2014] H. Wen, D. McLean, S. Boyle, T. Spry, D. Mjelde, Evaluation of recycled concrete as aggregate in new concrete pavements, WSDOT Rapport de Recherche, WA-RD 826.1, 2014.
- [Wijayasundara *et al.*, 2017] Wijayasundara M., Crawford R. H., Mendis P., Comparative assessment of embodied energy of recycled aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*, 152, 406-419, 2017.
- [Wil, 2015] Wil V.S., Stochastic service-life modeling of chloride-induced corrosion in recycled-aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 2015.
- [Wittmann, 1976] Wittmann F.H., On the action of capillary pressure in fresh concrete. *Cement and Concrete Research*, 6, 49-56, 1976.
- [Wong *et al.*, 2006] Wong H.S., Head M.K., Buenfeld N.R., Pore segmentation of cement-based materials from backscattered electron images, *Cement and Concrete Research*, 36, 6, 1083-1090, 2006.
- [WRAP www.wrap.org.uk/construction] Linking demolition and new build – a step by step guide – The efficient use of materials in regeneration projects.
- [WRAP, 2007a] Waste and Resources Action Programme (WRAP), Aggregates Research Programme. Engineering properties of concrete containing recycled aggregates, Banbury (UK), 2007.

- [WRAP, 2007b] Waste and Resources Action Programme (WRAP). An investigation into the effects of recycled aggregates on the engineering properties of concrete, 104, 2007.
- [Wu *et al.*, 2001] Wu K.-R., Chen B., Yao W., Zhang D., Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1421-1425, 2001.
- [Wu *et al.*, 2014] Wu P., Xia B., Zhao X., The importance of use and end-of-life phases to the life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of concrete – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 360-369, 2014.
- [Wyrzykowski *et al.*, 2015] Wyrzykowski M., Trtik P., Munch B., Weiss J., Vontobel P., Lura P., Plastic shrinkage of mortars with shrinkage reducing admixture and lightweight aggregates studied by neutron tomography. *Cement and Concrete Research*, 73: 238-245, 2015.
- [Xia et Bakker, 2014] Xia H., Bakker M.C.M., Reliable classification of moving waste materials with LIBS in concrete recycling, *Talanta*, 120, 239-247, 2014.
- [Xiao *et al.*, 2006a] Xiao J.-Zh., Li J.-B., Zhang Ch., On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview, *Materials and Structures*, 39, 655-664, 2006.
- [Xiao *et al.*, 2006b] Xiao J., Sun Y., Falkner H., Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete, *Engineering Structures*, 28(1), 1-8, 2006.
- [Xiao *et al.*, 2012] Xiao J., Lei B., Zhang C., On carbonation behavior of recycled aggregate concrete, *Science China Technological Science*, 2012.
- [Xiao *et al.*, 2013a] Xiao J., Fan Y., Tawana M.M., Residual compressive and flexural strength of a recycled aggregate concrete following elevated temperatures, *Berlin – Structural Concrete* 14 (2), 2013.
- [Xiao *et al.*, 2013b] Xiao J., Li H., Yang Z., Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings, *Construction and Building Materials*, 38, 681-688, 2013.
- [Xiao *et al.*, 2013b] Xiao J., Lu D., Ying J., Durability of recycled aggregate concrete: An overview, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2013.
- [Xiao *et al.*, 2014] Xiao J.Z., Ying J.W., Tam V.W.Y., Gilbert I., Test and prediction of chloride diffusion in recycled aggregate concrete, *Science China Technological Science*, 2014.
- [Xiao et Falkner 2007] Xiao J., Falkner H., Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars, *Construction and Building Materials*, 21(2), 395-401, 2007.
- [Xiao et Zhang, 2007] Xiao J.Z., Zhang C.Z., Fire damage and residual strengths of recycled aggregate concrete, *Key Engineering Materials*, 348-349, 937-940, 2007.
- [Xing *et al.*, 2002] Xing W., Pietersen H., Hendriks C., Rem P., Improve the quality of construction and demolition waste by separation techniques, in: *Advances in Building Technology*, Elsevier, Oxford, 1439-1446, 2002.
- [Xing *et al.*, 2015] Xing Z., Beaucour A.-L., Hebert R., Noumowe A., Ledesert B., Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature, *Construction and Building Materials*, 95, 18-28, 2015.

- [Xing et Hendriks, 2006] Xing W., Hendriks C., Decontamination of granular wastes by mining separation techniques, *Journal of Cleaner Production*, 14, 748-753, 2006.
- [Yagishita *et al.*, 1994] Yagishita F., Sano M., Yamada M., Behavior of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate. In: *Demolition and reuse of concrete & masonry RILEM proceeding*, 23, 331-342, E&FN Spon, London, 1994.
- [Yang *et al.*, 1996] Yang R., Lawrence C.D., Sharp J.H., Delayed ettringite formation in 4-year old cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 26 (11), 1649-1659, 1996.
- [Yang *et al.*, 2006] Yang Z., Brown H., Cheney A., Influence of Moisture Conditions on Freeze and Thaw Durability of Portland Cement Pervious Concrete, *Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete*, Citeseer, 2006.
- [Yang *et al.*, 2011] Yang J., Qiang D., Yiwang B., Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1935-1945, 2011.
- [Yermak *et al.*, 2017] Yermak N., Pliya P., Beaucour A-L., Simon A., Noumowe A., Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: spalling, transfer and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 132, 2017.
- [Yermak, 2015] Yermak N., Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres, Thèse de l'université de Cergy-Pontoise, 2015.
- [Yildrin *et al.*, 2015] Yildrin S.T., Meyer C., Herfellner S., Effects of internal curing on strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates, *Construction and Building Material*, 91, 288-296, 2015.
- [Yoda *et al.*, 2003] Yoda K., Harada M., Sakuramoto F., Field application and advantage of concrete recycled in-situ Recycling Systems, Thomas Telford Serv, 2003.
- [Yun *et al.*, 2011] Yun H.D., You Y.C., Lee D.H., Effects of replacement ratio of recycled coarse aggregates on the shear performance of reinforced concrete beams without shear reinforcement, *LHI Journal*, 2(4), 471-477, 2011.
- [Zaharieva *et al.*, 2004] Zaharieva R., Buyle-Bodin F, Wirquin E., Frost resistance of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004.
- [Zega *et al.*, 2010] Zega C.J., Villagrán-Zaccardi Y.A., Maio A.A.D., Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Materials and Structures*, 43, 195-202, 2009.
- [Zega et Di Maio, 2006] Zega C.J., Di Maio A.A., Recycled concrete exposed to high temperatures, *Magazine of Concrete Research*, 58 (10), 675-682, 2006.
- [Zega et Di Maio, 2009] Zega C.J., Di Maio A.A., Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature, *Construction and Building Materials*, 23, 2047-2052, 2009.
- [Zerbi *et al.*, 2017] Zerbi T., Landò R., Vinai R., Grigoriadis K. and Soutsos M., Indexing and sorting robot based on hyperspectral and reflectance information for CDW recycling, *Proceedings of HISER International Conference*, 2017.

- [Zhang *et al.*, 2015] Zhang J., Shi C., Li Y., Pan X., Poon C.S., Xie Z. Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar, *Construction and Building Materials*, 98, 1-7, 2015.
- [Zhang et Zhao, 2016] Zhang H., Zhao Y., Performance of recycled concrete beams under sustained loads coupled with chloride ion ingress, *Construction and Building Materials*, 128, 96-107, 2016.
- [Zhao *et al.*, 2008] Zhao Z., Kwon S. H., Shah S. P., Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy, *Cement and Concrete Research*, 38(8-9), 1049-1060, 2008.
- [Zhao *et al.*, 2013a] Zhao Z., Rémond S., Damidot D., Xu W. Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2013.
- [Zhao *et al.*, 2013b] Zhao Z., Wang S., Lu L., Gong C., Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar, *Construction and Building Materials*, 43, 2013.
- [Zhao *et al.*, 2015a] Zhao Z., Damidot D., Rémond S., Courard L. Toward the quantification of the cement paste content of fine recycled concrete aggregates by salicylic acid dissolution corrected by a theoretical approach. 14th International Congress on the Chemistry of Cement, Beijing, China, 2015.
- [Zhao *et al.*, 2015b] Zhao Z., Remond S., Damidot D., Xu W., Influence of Fine Recycled Concrete Aggregates on the Properties of Mortars, *Construction and Building Materials*, 81, 179-86, 2015.
- [Zhao, 2014] Zhao Z., Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication des mortiers, Thèse de Génie Civil, Ecole des mines de Douai et Université Lille 1, 2014.
- [Zhou *et al.*, 2010] Zhou J.H., He H.J., Meng X.H., Huan S., Experimental study of recycled concrete columns under large eccentric compression, *Proceedings of the 12th international conference on engineering, science, construction, and operations in challenging, environments*, 2010, Doi :10.1061/ 411096(336)54.
- [Zhuang, 2007] Zhuang X.J., Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading. *J. Tongji University*, 35(11), 1445-1449, 2007.
- [Zhutovsky *et al.*, 2002] Zhutovsky S., Kovler K., Bentur A., Efficiency of Lightweight Aggregates for Internal Curing of High Strength Concrete to Eliminate Autogenous Shrinkage, *Materials and Structures*, 35, 97-101, 2002.
- [Zimbelman, 1985] Zimbelman R., A contribution to the problem of cement aggregate bond, *Cement and Concrete Research*, 15, 801-808, 1985.
- [Zuo *et al.*, 2012] Zuo J., Zillante G., Wilson L., Davidson K., Pullen S. Sustainability policy of construction contractors: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6, 3910-3916, 2012

Annexe 1. Constituants de référence

Les paragraphes suivants résument les propriétés des constituants utilisés pour formuler les différents bétons de référence utilisés par les partenaires du projet RECYBETON. Pour éviter des problèmes de variabilité, les quantités nécessaires de chaque granulat ont été produites en une seule fois, au début du projet. De même, les ciments n'ont fait l'objet que d'une seule fourniture. Les adjuvants, dont la durée de vie est limitée, et les fillers calcaires, supposés plus réguliers, ont été distribués sur demande aux partenaires.

Annexe 1.1. Adjuvants

Un superplastifiant à base de polycarboxylate éther (PCE) et un retardateur sans chlorure ont été utilisés au besoin dans les bétons de référence.

Tableau A.1

Principales propriétés du superplastifiant et du retardateur

Propriétés	Superplastifiant	Retardateur
Masse volumique (kg/l)	1,06	1,08
Extrait sec (% en masse)	30	20
Plage de dosage recommandé (en kg pour 100 kg de ciment)	0,2-3	2-8

Annexe 1.2. Ciments

Trois ciments différents ont été utilisés :

- un CEM II/A-L 42,5 N CE CP2 NF classique disponible sur le marché, référencé C ;
- un CEM I produit spécifiquement pour le projet. Un sable de GBR a été introduit dans le four en remplacement d'environ 15 % des matières premières traditionnelles (voir chapitre 4), référencé CR1 ;
- un ciment composé, référencé CR2, produit spécifiquement pour le projet, dans lequel environ 25 % de sable de GBR ont été concassés, broyés, puis mélangés et homogénéisés avec du clinker comme autre constituant principal, en remplacement du calcaire. Dans une future version de la norme NF EN 197-1, ce ciment pourrait être considéré comme un nouveau ciment de type CEM II/B-SBR, où SBR signifie Sable de Béton Recyclé (voir chapitre 5).

Tableau A.2

Principales propriétés des trois ciments

Propriétés	C	CR1	CR2
Constituants (%) :			
– Clinker K	87	100	73,4
– Calcaire L ou LL	11	0	0
– Sable de GBR	0	0	26,6
– Autres	2	0	0
Gypse (%)	3,4	6	6
Composition du clinker (%) :			
– C ₃ S	61	61,8	53,9
– C ₂ S	11,1	17,8	4,8
– C ₃ A	7,9	6,1	6,8
– C ₄ AF	12	11,6	6
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3 700	3 630	4 548
Classe à 2 jours (MPa)	25,1	35	20,8
Classe à 28 jours (MPa)	58,1	62,2	41,5
Masse volumique (kg/l)	3,09	3,14	2,97

Le taux de saturation du superplastifiant a été mesuré selon la méthode AFREM [de Larrard *et al.*, 1996]. La compacité virtuelle des ciments a été calculée à partir de leur demande en eau sur pâte normale [Sedran *et al.*, 2007]. Le tableau A.3 montre que la compatibilité entre le ciment CR1 et le superplastifiant sélectionné est manifestement faible, car sa compacité n'augmente pratiquement pas en présence du superplastifiant.

Tableau A.3

Autres propriétés des ciments

Propriétés	C	CR1	CR2
Taux de saturation en superplastifiant (en % d'extrait sec/masse de ciment)	0,35	0,50	0,40
Compacité sans superplastifiant	0,548	0,469	0,557
Compacité avec superplastifiant dosé à saturation	0,598	0,498	0,638

Annexe 1.3. Filler calcaire

Un filler calcaire a été utilisé pour améliorer le squelette granulaire ou pour remplacer le ciment afin de contrôler la résistance à la compression.

Son dosage de saturation en superplastifiant a été mesuré selon la méthode AFREM [de Larrard *et al.*, 1996], sur un mélange à 50 % en masse de filler calcaire et 50 % de CEM II/A-LL. Connaissant le dosage de saturation du ciment, celui du filler calcaire en a été déduit.

La compacité a été mesurée sur pâte normale [Sedran *et al.*, 2007] sur deux mélanges : l'un avec 90 % en masse de filler calcaire et 10 % de CEM II/A-LL, l'autre avec 80 % en masse de filler calcaire et 20 % de CEM II/A-LL. La compacité du filler a été extrapolée linéairement à partir de la compacité mesurée sur les deux mélanges.

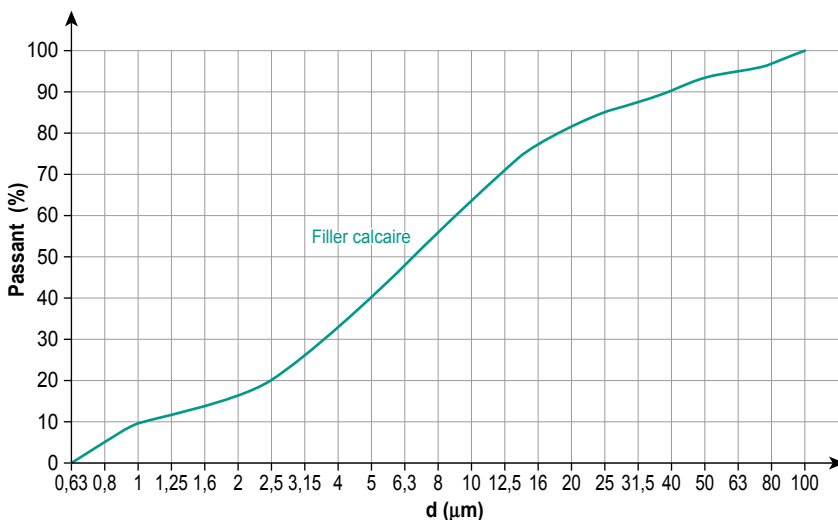
Tableau A.4

Propriétés du filler calcaire

Propriété	
Masse volumique réelle (kg/l)	2,7
Surface Spécifique Blaine (cm ² /g)	4 620
CaCO ₃ (%)	98,8
Dosage de saturation en superplastifiant (en % d'extrait sec/masse du ciment)	0,15
Compacité sans superplastifiant	0,591
Compacité en présence de la dose de saturation en superplastifiant	0,681

Figure A.1

Granularité du filler calcaire (les valeurs inférieures à 1 µm ont été extrapolées)



Annexe 1.4. Granulats

On trouvera des informations détaillées dans les chapitres 3, 10 et 15.

Les Tableaux et Figures qui suivent résument les principales propriétés des granulats naturels et recyclés (GBR) de référence.

Tableau A.5

Nature, origine des granulats de référence
et classification des GBR selon la norme NF EN 933-1

Matériau	Nature	Origine	Type
Sable de GBR 0/4	Béton recyclé	Plateforme de recyclage, Gonesse (95)	–
Gravillon de GBR 4/10	Béton recyclé	Plateforme de recyclage, Gonesse (95)	Rcu ₉₈
Gravillon de GBR 10/20	Béton recyclé	Plateforme de recyclage, Gonesse (95)	Rcu ₉₉
Sable naturel 0/4	Silico-calcaire semi-concassé	Sandrancourt (78)	–
Gravillon naturel 4/10	Calcaire concassé	Givet (08)	–
Gravillon naturel 6,3/20	Calcaire concassé	Givet (08)	–

Tableau A.6

Propriétés des granulats.

Les valeurs entre parenthèses ont été mesurées sur le refus à 63 µm

Matériau	MVR (kg/l)	Ab ₂₄ (%)	LA (%)	MDE (%)
Sable de GBR 0/4	2,08 (2,18)	8,9 (7,3)	–	–
Gravillon de GBR 4/10	2,29	5,6	–	–
Gravillon de GBR 10/20	2,26	5,8	37	23
Sable naturel 0/4	2,58 (2,59)	0,8 (1)	–	–
Gravillon Naturel 4/10	2,71	0,51	–	–
Gravillon Naturel 6,3/20	2,71	0,46	16	17

La masse volumique réelle MVR et l'absorption d'eau Ab₂₄ ont été mesurées selon NF EN 1097-6, la valeur Los Angeles LA selon NF EN 1097-2 et la valeur Micro Deval MDE selon NF EN 1097-1.

Le coefficient de résistance à la compression K_g , le coefficient de résistance à la traction K_t et le module d'élasticité E ont été obtenus à partir d'essais sur bétons (voir chapitre 10). La compacité expérimentale C_{exp} de chaque matériau a été mesurée sur un échantillon de 7 kg compacté dans un cylindre de \varnothing 160 mm, en repérant la hauteur H de l'empilement ([LCPC, 2004 ; de Larrard *et al.*, 2003]). À partir de cette valeur, la compacité virtuelle β de chaque classe élémentaire a été calculée avec le Modèle d'Empilement Compressible [de Larrard, 1999].

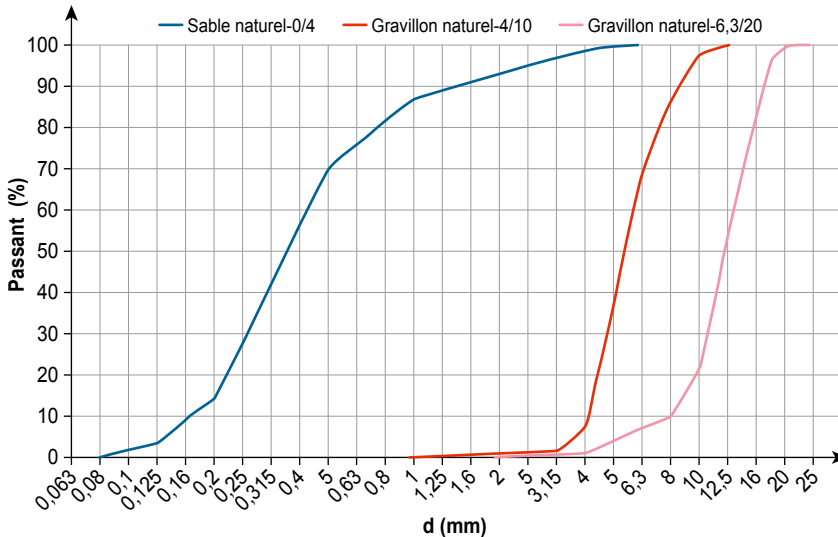
Tableau A.7

Propriétés complémentaires des granulats

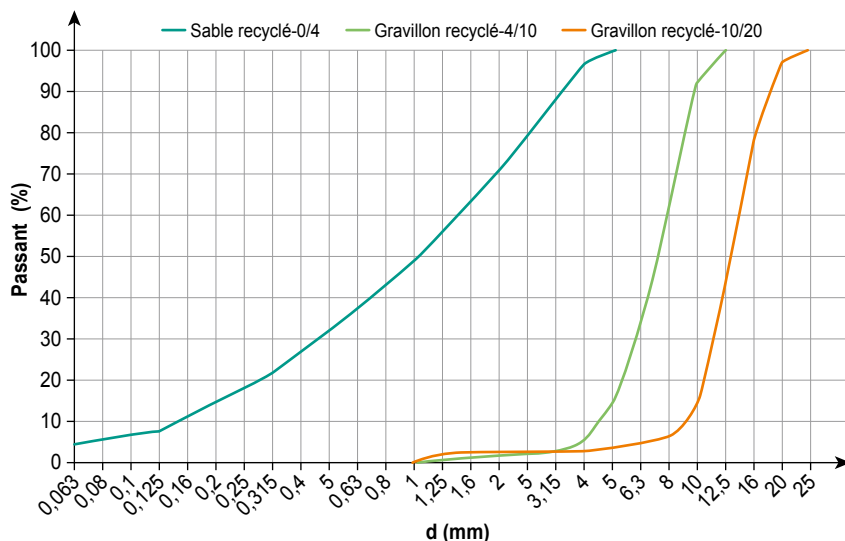
Matériau	K_g	K_t	C_{exp}	E (GPa)	β	H (mm)
Sable de GBR 0/4	4,42	0,364	0,690	49,5	0,563	237,1
Gravillon de GBR 4/10	5,173	0,364	0,569	49,5	0,593	267,3
Gravillon de GBR 10/20	5,173	0,364	0,554	49,5	0,594	277,8
Sable naturel 0/4	5,767	0,453	0,676	66,2	0,632	199,8
Gravillon Naturel 4/10	5,767	0,453	0,580	66,2	0,611	221,4
Gravillon Naturel 6,3/20	5,767	0,453	0,583	66,2	0,627	220,2

Figure A.2

Granularité des granulats naturels



Granularité des granulats de béton recyclé (GBR)



Annexe 2. Bétons de référence

Une description détaillée de la composition des bétons de référence est donnée dans [Sedran, 2017]. Les spécifications sont les suivantes :

- résistance moyenne à la compression à 28 jours de 30 MPa et 40 MPa pour les C25/30 et C35/45, respectivement ;
- affaissement entre 160 et 210 mm (classe S4 selon EN 206/CN), après 90 min ;
- classe d'exposition XC1 pour les bétons C25/30 et XF1 pour les bétons C35/45, selon NF EN 206/CN (les exigences de ces classes ont été respectées, excepté pour un certain nombre de bétons où le taux de substitution en GBR a été plus élevé que celui autorisé).

La codification des mélanges est la suivante :

- C25/30 xSyG : pour les bétons C25/30 fabriqués avec le ciment C dans lequel le sable de GBR représente x % en masse du sable total, et les gravillons de GBR représentent y % en masse des gravillons totaux ;
- C35/45 xSyG : pour les bétons C35/45 dans lesquels le sable de GBR représente x % en masse du sable total, les gravillons de GBR représentent y % en masse des gravillons totaux ;
- le terme CR1 ou CR2 est ajouté lorsque le ciment CR1 ou CR2 est utilisé à la place du ciment C.

Tableau A.8

Bétons de référence C25/30 fabriqué avec le ciment ordinaire C ;
composition pour un mètre cube, avec granulats secs

Constituants (kg/m ³)	C25/30 0S0G	C25/30 0S30G	C25/30 0S100G	C25/30 30S0G	C25/30 30S30G	C25/30 100S100G
Eau ajoutée	190	210	244	213	228	303
Ciment C (CEM II/A-L 42,5)	270	276	282	276	277	326
Filler Calcaire	45	31	31	31	31	50
Sable naturel 0/4	780	813	806	549	500	
Sable de GBR 0/4				235	218	673
Gravillon naturel 4/10	267	228		190	171	
Gravillon de GBR 4/10			163		145	304
Gravillon naturel 6,3/20	820	462		829	552	
Gravillon de GBR 10/20		296	701		167	442
Superplastifiant	1,31	1,51	1,4	1,16	1,08	1,18
Retardateur	0	0		1,1	1,1	2,6
Eau efficace (E _{eff})	180	185	189	185	185	199
Eau efficace/liant équ. (E _{eff} /C _{equ})*	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,59
Sable naturel 0/4 (% vol)	43	45	45	30,3	27,6	0
Sable de GBR 0/4 (% vol)	0	0	0	16,1	14,9	49,6
Gravillon naturel 4/10 (% vol)	14	12	0	10	9	0
Gravillon de GBR 4/10 (% vol)	0	0	10,25	0	9	20,4
Gravillon naturel 6,3/20 (% vol)	43	24,3	0	43,6	29	0
Gravillon de GBR 10/20 (% vol)	0	18,7	44,75	0	10,5	30
Superplastifiant (ES %/masse ciment)	0,15	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11
Retardateur (% liquide/masse ciment)	0	0	0	0,4	0,4	0,8
Résistance moyenne visée Rc ₂₈ (MPa)**	34	33	31	32	32	30
Résistance expérimentale Rc ₂₈ (MPa)	33,9		32	33,6		28,5

* selon NF EN 206/CN.

** Certaines valeurs attendues de Rc₂₈ sont supérieures à la résistance visée de 30MPa. Ceci est dû au fait que la classe XC1 selon la norme NF EN 206/CN impose un rapport E_{eff}/C_{equ} ≤ 0,65.

Tableau A.9

Bétons de référence C35/45 fabriqué avec le ciment ordinaire C ;
composition pour un mètre cube, avec granulats secs

Constituants (kg/m ³)	C35/45 0S0G	C35/45 0S100G	C35/45 30S30G	C35/45 100S100G
Eau ajoutée	185	238	220	284
Ciment C (CEM II/A-L 42,5)	299	336	321	381
Filler Calcaire	58	53	44	70
Sable naturel 0/4	771	782	491	
Sable de GBR 0/4			214	663
Gravillon naturel 4/10	264		168	
Gravillon de GBR 4/10		158	142	299
Gravillon naturel 6,3/20	810		542	
Gravillon de GBR 10/20		682	164	435
Superplastifiant	2,1	2,18	1,64	2,78
Retardateur	0	0	1,3	3
Eau efficace (E_{eff})	175	185	179	184
Eau efficace/liant équ. ($E_{\text{eff}}/C_{\text{equ}}$)*	0,59	0,54	0,57	0,47
Sable naturel 0/4 (% vol)	43	45	27,6	0
Sable de GBR 0/4 (% vol)	0	0	14,9	49,6
Gravillon naturel 4/10 (% vol)	14	0	9	0
Gravillon de GBR 4/10 (% vol)	0	10,25	9	20,4
Gravillon naturel 6,3/20 (% vol)	43	0	29	0
Gravillon de GBR 10/20 (% vol)	0	44,75	10,5	30
Superplastifiant (ES %/masse ciment)	0,21	0,20	0,16	0,22
Retardateur (% liquide/masse ciment)	0	0	0,4	0,8
Résistance moyenne visée $R_{C_{28}}$ (MPa)	40	40	40	40
Résistance expérimentale $R_{C_{28}}$ (MPa)	38,7	39,3	40,1	38,5

* selon NF EN 206/CN.

Tableau A.10

Bétons de référence fabriqué avec le ciment spécial CR1 ou CR2 ;
composition pour un mètre cube, avec granulats secs

Constituants (kg/m ³)	C25/30 0S0G CR1	C35/45 0S0G CR1	C25/30 0S0G R2
Eau ajoutée	191	180	183,7
Ciment CR1 (CEM I)	252	250	
Ciment CR2 (CEM II/B-SBC)			293
Filler Calcaire	108	140	0
Sable naturel 0/4	760	759	790
Gravillon naturel 4/10	260	259	270
Gravillon naturel 6,3/20	799	797	830
Superplastifiant	2,16	2,9	1,13
Retardateur	0	0	2,93
Eau efficace (E_{eff})	181,3	170,9	175,6
Eau efficace/liant équ. ($E_{\text{eff}}/C_{\text{equ}}$)*	0,65	0,62	0,60
Sable naturel 0/4 (% vol)	43	43	43
Gravillon naturel 4/10 (% vol)	14	14	14
Gravillon naturel 6,3/20 (% vol)	43	43	43
Superplastifiant (ES %/masse ciment)	0,26	0,35	0,12
Retardateur (%liquide/masse ciment)	0	0	1
Résistance moyenne visée R_{c28} (MPa)**	37,5	40,0	30,0
Résistance expérimentale R_{c28} (MPa)	38		31

* selon NF EN 206/CN.

** Certaines valeurs attendues de R_{c28} sont supérieures à la résistance visée de 30MPa. Ceci est dû au fait que la classe XC1 selon la norme NF EN 206/CN impose un rapport $E_{\text{eff}}/C_{\text{equ}} \leq 0,65$.

Fiche bibliographique

Collection Ouvrage scientifique		Sous-collection	
ISSN 2558-3018	ISBN Papier 978-2-85782-746-7 PDF 978-2-85782-747-4	Réf. OSI4	
Titre Le béton recyclé			
Sous-titre			
Coordinateur François de Larrard et Horacio Colina			
Date de publication Novembre 2018		Langue Français	
Résumé 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 granulats 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.			
Mots-clés Analyse du cycle de vie, béton recyclé, chantiers, ciment, développement durable, durabilité, feu, formulation, granulats, normes, procédés, propriétés, recyclage, règlements, ressource			
Nbre de pages 792		Prix Papier 55 € HT PDF gratuit	

Publication data form

Collection Scientific articles		Sub-collection	
ISSN 2558-3018	ISBN Print 978-2-85782-746-7 PDF 978-2-85782-747-4	Réf. OSI4	
Title Recycled concrete			
Subtitle			
Coordinator François de Larrard and Horacio Colina			
Publication date November 2018		Language French	
Summary This book deals with the recycling of crushed concrete into new concrete. It summarizes most of RECYBETON's outputs. 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.			
Key Words Aggregates, cement, codes, construction sites, durability, fire, life-cycle analysis, mix-design, process, properties, recycled concrete, recycling, resource, standards, sustainability			
Nbr of page 792		Price Print 55 € HT PDF free of charge	

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 granulats 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 outputs. 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)



LES COLLECTIONS DE L'IFSTTAR

ISBN : 978-2-85782-747-4

ISSN : 2558-3018

Réf : OSI4

Novembre 2018