

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

CARBONATATION ACCÉLÉRÉE DE GRANULATS DE BÉTON RECYCLÉ : LE PROJET FASTCARB

TORRENTI Jean Michel^A, pour l'ensemble des partenaires du projet FastCarb

A Ifsttar, France

Résumé : Le projet de recherche et développement FastCarb recherche (Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclé – www.fastcarb.fr) est un projet collaboratif impliquant plusieurs entreprises et instituts de recherche. Il est le résultat de la conjonction de deux constatations. D'une part, la production de ciment est une source importante de CO₂ dans le monde (5-7% des émissions totales). Environ deux tiers de ces émissions sont dues à la décarbonatation du calcaire au cours du processus de fabrication du ciment Portland. Ce processus est naturellement inversé : c'est la carbonatation du béton.

D'autre part, une grande quantité de béton recyclé provenant de la déconstruction des bâtiments et des structures est disponible tandis que les ressources naturelles doivent être préservées. Même si les granulats de béton recyclés (GBR) peuvent déjà être utilisés dans le béton en ajustant les mélanges, ils présentent une plus grande porosité. Ceci a un impact sur les performances du béton de granulats recyclés : une porosité plus élevée, une absorption d'eau plus élevée et des propriétés mécaniques légèrement dégradées.

Cependant, les granulats recyclés incorporent de la portlandite et des silicates hydratés qui peuvent être carbonatés plus rapidement que le béton dans les structures. Le but du projet FastCarb est donc de stocker le CO₂ dans les GBR, en améliorant la qualité de ces granulats par le colmatage de la porosité et en diminuant finalement l'impact CO₂ du béton dans les structures. Il a deux objectifs principaux: (i) optimiser en conditions de laboratoire le processus de carbonatation accélérée qui peut être transposé à l'échelle industrielle à un coût approprié (ii) pour montrer que le procédé pourrait être utilisé dans des conditions industrielles (test pilote dans une usine de production de ciment en particulier), de la production de GBR carbonatés à la réalisation d'exemples d'éléments en béton recyclant ces granulats.

Mots-clés: béton, carbonatation, granulats recyclés, CO₂, économie circulaire, impact environnemental.

1. INTRODUCTION

Le projet FastCarb (Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclé – www.fastcarb.fr) est le résultat de la conjonction de deux constatations. D'une part, la production de ciment est une source importante de CO₂ dans le monde (5-7% des émissions totales). Environ deux tiers de ces émissions sont dues à la décarbonatation du calcaire au cours du processus de fabrication du ciment Portland. Ce processus est naturellement inversé : c'est la carbonatation du béton. Mais la carbonatation naturelle est un processus très lent.

D'autre part, une grande quantité de béton recyclé provenant de la déconstruction des bâtiments et des structures est disponible tandis que les ressources naturelles doivent être préservées. Même si les granulats de béton recyclés (GBR) peuvent déjà être utilisés dans le béton en ajustant les mélanges, ils présentent une plus grande porosité. Ceci a un impact sur les performances du béton de granulats recyclés : une porosité plus élevée, une absorption d'eau plus élevée et des propriétés mécaniques légèrement dégradées. La conséquence est qu'il est nécessaire d'augmenter la teneur en liant du mélange si l'objectif est d'effectuer un recyclage à fort taux tout en conservant les propriétés d'ingénierie requises par le béton.

Cependant, les granulats recyclés incorporent de la portlandite et des silicates hydratés qui peuvent être carbonatés plus rapidement que le béton dans les structures. Le but du projet FastCarb, qui a démarré en 2018, est donc de stocker le CO₂ dans les GBR, en améliorant la qualité de ces granulats par le colmatage de la porosité et en diminuant finalement l'impact CO₂ du béton dans les structures.

Dans cet article, après avoir rappelé le contexte, les enjeux du projet et une analyse bibliographique des recherches sur le même sujet, nous présenterons le programme de recherche du projet.

2. CONTEXTE ET ENJEUX

2.1 Le recyclage des bétons dans les bétons

En France, les déchets inertes du secteur du bâtiment et des travaux publics représentent près de 200 millions de tonnes par an, dont 17 millions de tonnes sont à base de béton uniquement (Mongear et Dross, 2016). Pour ces derniers, on estime que seule la moitié est recyclée actuellement en granulats de béton recyclés (GBR). De plus, le volume de déchets générés par la déconstruction des bâtiments et infrastructures en fin de vie augmente, et va devenir très important dans les prochaines années. En effet, suivant le cycle normal de la construction, une partie des bâtiments de plus de 50 ans arrivera prochainement en fin de vie et sera démolie. Les volumes de bétons à recycler produits seront alors très importants.

Actuellement, les granulats de béton recyclés (GBR) sont traités essentiellement de deux façons, soit par l'enfouissement, soit par le recyclage en matériau de remblai à faible valeur ajoutée pour les terrassements routiers. Avec l'arrivée prochaine de volumes plus importants, la filière routière ne pourra pas, sous cette forme, les absorber, et le coût environnemental de traitement va donc augmenter de façon importante. De plus, si les GBR étaient utilisés comme granulats pour le béton, des matériaux inertes comme les laitiers sidérurgiques ou les Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux pourraient être davantage valorisés dans les routes.

En parallèle, les granulats naturels utilisés pour fabriquer du béton ou des couches de roulement de chaussées sont une ressource non renouvelable, techniquement illimitée mais de plus en plus difficilement accessible pour des raisons sociétales et environnementales. Dans un tel contexte, réussir à fabriquer du béton en économisant les granulats est un enjeu majeur.

Les normes actuelles permettent d'utiliser les GBR selon les caractéristiques de ces granulats (et le % de produits autres que du béton ou des granulats polluant les GBR) et selon les classes d'exposition des ouvrages construits (liées à l'environnement de l'ouvrage), et cela avec un pourcentage très limité (30% de substitution par rapport à des granulats naturels au maximum et, par exemple, le sable de GBR ne peut être utilisé pour refaire du béton armé).

La raison essentielle de cette limite vient du fait que les GBR ont une porosité plus élevée et donc une absorption d'eau plus importante, et des caractéristiques mécaniques légèrement dégradées par rapport à des granulats naturels (résistance au choc et friabilité). Ces caractéristiques conduisent soit à des bétons de plus faibles performances (mécaniques et durabilité), soit, si l'on veut maintenir les performances à un bon niveau, à une quantité de granulats recyclés limitée (à environ 10% de l'ensemble

des granulats), soit à un dosage plus important du nouveau béton en ciment si l'on veut introduire davantage de granulats recyclés.

Les travaux du PN Recybéton ont permis d'obtenir de nombreux résultats permettant de mieux maîtriser la formulation des bétons incluant de forts taux de GBR et leurs propriétés à l'état frais et durci afin, à terme, de faire évoluer la normalisation vers une utilisation plus importante de ces GBR dans les bétons.

2.2 Potentiel de recarbonatation des bétons recyclés

On peut encore améliorer les performances des GBR par des techniques de traitement, notamment si l'on veut réutiliser les parties fines des GBR pour les introduire à nouveau dans des bétons. Parmi les pistes étudiées, la carbonatation est celle que nous proposons d'étudier dans ce projet.

Le sujet de la recarbonatation de granulats de béton recyclé est un sujet de recherche en train d'émerger. Les publications sur ce thème mettent en évidence les potentialités des GBR qui constituent un puits potentiel de stockage du CO₂, stockage qui permettrait de surcroît une amélioration de leurs propriétés constructives suite à leur carbonatation, et donc une possibilité de réemploi facilitée dans la construction (Jang et al., 2016).

Le béton déconstruit est en effet un puits permettant de stocker du CO₂ grâce à la matrice cimentaire qui entoure les granulats naturels. Pour fabriquer ce ciment, il a été émis environ 800 kg de CO₂ par T de ciment (dans le cas d'un ciment de type CEM I). 60% de ce CO₂ – soit quasiment 500kg/T de ciment - est dû à la décarbonatation du calcaire et peut être théoriquement re-stocké par l'opération inverse. Cette inversion peut se faire naturellement mais dans ce cas sa cinétique est très lente. Dans le projet FastCarb, des procédés de carbonatation accélérée sont testés. Les essais préliminaires en laboratoire à l'Ifsttar montrent que, dans un temps très limité, on peut stocker 50 kg de CO₂/T de GBR (Cazacliu et al., 2016). Des résultats récents de la littérature montrent que ce niveau de carbonatation est atteignable surtout pour les fractions fines (Fang et al., 2017).

La production actuelle de clinker en France est actuellement voisine de 13 M de T (source : <https://www.infociments.fr/chiffres-cles>). Comme indiqué auparavant, pour produire une tonne de clinker on émet environ 800 kg de CO₂. La production annuelle française correspond donc à 10,4 M de T de CO₂. Si l'on suppose que l'on dispose de 20 M de T de granulats de béton recyclé pouvant être recarbonatés, en reprenant l'hypothèse de 50 kg de CO₂/T de GBR stockés, on arrive à un potentiel de 1M de T de CO₂ stocké soit 10% des émissions liées au ciment.

La production annuelle de béton avoisine actuellement les 100 M de T/an : 35 M de m³ de béton prêt à l'emploi (source www.snbpe.org pour 2015) soit environ 77 M de T de béton et 19 M de T de produits préfabriqués en béton (source www.fib.org). Même si c'est surtout le rythme de la déconstruction et l'organisation de la filière de valorisation qui va déterminer l'évolution du potentiel de GBR recarbonatable celui-ci va s'accroître au cours du temps et donc aussi la quantité de CO₂ stockable dans les GBR

Bien sûr, tous les GBR ne pourront être recarbonatés de manière économiquement et/ou environnementalement viable (la question du transport des GBR pèse en effet dans les bilans). Néanmoins, les chiffres précédents montrent que le procédé permet de stocker une partie non négligeable des émissions de CO₂ associées au béton.

Dans un contexte où l'on regarde pour les bâtiments non seulement leur consommation énergétique en service mais aussi leur empreinte environnementale (cf. le label E+C- en France), et, compte tenu des enjeux climatiques, de la perspective d'une hausse du coût de la tonne de CO₂, l'objectif est d'abaisser encore l'impact carbone de la construction en béton, même si des études montrent que les systèmes constructifs en béton sont déjà bien positionnés comparativement aux autres matériaux.

L'amélioration de l'isolation des bâtiments a en effet pour conséquence que la part des matériaux de construction devient de plus en plus importante dans les bilans énergétiques et carbone. Diminuer le poids carbone des matériaux devient donc un objectif technico-économique pour les années futures.

L'objectif du projet FastCarb est donc de montrer que l'on peut stocker une quantité importante de CO₂ dans les granulats de béton recyclé, ce qui aura pour conséquence d'améliorer les qualités de ces derniers et de diminuer l'impact environnemental des bétons fabriqués avec ces granulats traités, le tout dans des conditions industrielles réalistes. Il s'agira aussi d'accroître les connaissances sur les modèles de carbonatation et la quantification de la carbonatation naturelle des bétons.

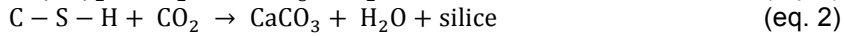
Ce projet partenarial qui comprend actuellement 22 partenaires (des laboratoires universitaires, des centres de recherche publics et privés, des industriels du ciment, des granulats, du béton, du recyclage et

de la construction) a démarré en 2018 avec le soutien du Ministère de la Transition écologique et solidaire. Il a une durée prévue de 3 ans.

3. ÉTAT DE L'ART

3.1 La carbonatation comme voie d'amélioration des granulats de béton recyclé

La carbonatation est la réaction du CO_2 avec les hydrates de la pâte de ciment hydratée (portlandite et C-S-H) selon les réactions (simplifiées) suivantes :



A noter que selon les conditions des réactions, le CaCO_3 peut se présenter sous la forme de différents polymorphes que sont la calcite, la vaterite et l'aragonite. Ceci pose des problèmes lorsque l'on s'intéresse à la représentativité d'un essai de carbonatation accélérée, par exemple dans le cadre d'une approche performantielle de la durabilité d'un béton (Auroy et al., 2018). Dans notre cas, l'objectif n'est pas d'être représentatif mais de stocker un maximum de CO_2 .

Les conséquences de ces réactions sont les suivantes :

- La consommation des ions OH^- qui entraîne un abaissement du pH de la solution interstitielle, de 13 à 9 environ. Ce phénomène peut entraîner la corrosion des armatures et c'est pour cela que dans les structures en béton armé on essaye de le minimiser. Dans notre cas, comme les GBR traités seront mélangés de nouveau à du ciment qui va apporter sa basicité, la carbonatation n'est pas vue comme un problème mais comme un puits de carbone
- Une prise de masse et une diminution de la porosité totale. Pour des pâtes de ciment fabriqué à base de CEMI avec des e/c de 0,45 et 0,6, Morandeau et al. ont par exemple mesuré des variations de porosité de 6 à 8% pour la pâte de $e/c=0,45$ et 10% environ pour la pâte de $e/c=0,6$ (Morandeau et al., 2014). Ils ont montré que cette variation venait de la formation de la calcite, la décalcification de la portlandite et des C-S-H entraînant au contraire une augmentation de la porosité. Ces résultats sont confirmés par de nombreux auteurs comme par exemple Auroy et al. qui ont montré l'impact de la carbonatation sur la microstructure avec des conséquences sur les isothermes de désorption et sur les propriétés de transport (Auroy et al., 2014). L'absorption d'eau des GBR carbonatés est également réduite (Zhao et al., 2015), (Zhang et al., 2015). Les propriétés mécaniques de GBR carbonatés sont également améliorées (Parmentier et al., 2013), (Zhang et al., 2015), (Xuan et al., 2016).
- Cette prise de masse correspond à un piégeage de CO_2 . Les estimations de cette prise de masse dépendent bien sûr de la technique expérimentale utilisée pour carbonater le béton et de la durée du traitement (cf. 3.2). Les auteurs s'accordent toutefois sur le fait que, par carbonatation naturelle, 25 à 30% du CO_2 émis lors de la fabrication du ciment des bétons considérés peut être récupéré (Thiery et al., 2009). Les auteurs de l'étude de l'impact de la carbonatation naturelle arrivent même à 40% (Xi et al., 2016).

3.2 Principaux facteurs affectant la carbonatation accélérée des GBR

La lenteur de la carbonatation naturelle (qui est un avantage pour les structures) est que son évolution est très lente. Pour optimiser la durée d'un traitement industriel, il convient donc d'accélérer ce phénomène, ce qui est possible par différentes techniques qui font en général intervenir une pression partielle de CO_2 largement plus élevée que dans la nature, une éventuelle surpression, un éventuel chauffage. Le fait d'appliquer le traitement à des GBR est aussi un avantage grâce à la grande surface d'échange. A partir des données de la littérature il est possible d'ores et déjà de mettre en avant les paramètres suivants :

- La teneur en eau. Comme pour la carbonatation naturelle, il existe un optimum de teneur en eau de la pâte de ciment pour maximiser cette carbonatation. Ce maximum se situe autour de 50 à 70% d'humidité relative (Galan et al., 2013) (Zhan et al., 2014) (Cazacliu et al., 2016) (Fang et al., 2017). Ce paramètre est absolument crucial car une teneur en eau trop basse ou trop haute peut faire chuter très fortement le taux de carbonatation.
- La teneur en CO_2 du gaz au contact des GBR : cette teneur influe sur la capacité de fixation du CO_2 au sein des GBR. Fang et al. montrent qu'à partir de 20%, la concentration en CO_2 a peu d'influence sur la quantité stockée dans les GBR, car l'augmentation de la teneur affecte la

formation de plus de matériaux carbonatés mais pas la dissolution des hydrates qui limite le taux maximum de carbonatation (Fang et al., 2017).

- La température : elle joue aussi un rôle prépondérant dans le phénomène de carbonatation, notamment sur les propriétés de transport et sur la solubilité des hydrates du ciment qui réagissent avec le CO₂. Drouet a ainsi montré que pour une pâte de ciment CEMI le taux de carbonatation augmentait avec la température (Drouet, 2010).
- La taille des GBR : plus les granulats sont petits et plus ils peuvent stocker du CO₂ (Zhan et al., 2014), (Fang et al., 2017). Ceci s'explique par deux effets : la fraction fine contient plus de pâte de ciment (et c'est pour cela qu'elle n'est pas utilisée actuellement pour refaire des bétons) et elle présente une surface d'échange plus grande. Du point de vue du projet FastCarb la fraction fine est donc particulièrement intéressante à la fois du point de vue de l'impact environnemental et pour une problématique de recyclage.
- Le procédé industriel : le procédé de carbonatation peut jouer un rôle, en modifiant certains paramètres de l'expérience (Fang et al., 2017) :
 - o carbonatation sous pression : une pression croissante peut augmenter le taux de carbonatation et de stockage du CO₂, en accélérant la pénétration du gaz
 - o Carbonatation sous flux de gaz : de la même manière que la pression, un débit plus important accroît le stockage du CO₂

Et, la comparaison entre essai sous pression et sous débit de gaz (flux) montre que le protocole sous pression permet de stocker plus de CO₂. Ces essais sont toutefois des essais « en batch ». Il reste encore à tester des essais en tambour tournant. Enfin, l'utilisation de CO₂ supercritique donne des résultats spectaculaires mais ne paraît pas envisageable d'un point de vue économique (Cazacliu et al., 2016).

4. PROGRAMME DE RECHERCHE

4.1 Méthodologie de la recherche

Pour atteindre l'objectif de diminution de l'empreinte carbone des bétons au moyen de la carbonatation accélérée, le projet FastCarb comprendra deux versants, l'un amont et l'autre orienté vers l'aval :

- l'objectif de la partie amont est de valider, sur les plans théorique et expérimental, la preuve de concept technique déjà apportée en laboratoire de carbonatation accélérée des granulats de bétons recyclés. Cette partie permettra aussi de bien maîtriser les paramètres affectant le process : teneur en eau des granulats, température du traitement, pression de gaz... et de modéliser les phénomènes mis en jeu.
- et celui de la partie aval sera de concevoir et mettre en œuvre un procédé de carbonatation accélérée à échelle pré-industrielle, de vérifier que les bétons fabriqués à l'aide des granulats traités ont les propriétés requises et de caractériser la viabilité environnementale et économique du procédé industriel de recyclage envisagé. Ce dernier point donnera aussi des indications fonction des conditions économiques (comme le coût de la tonne de CO₂) sur l'optimum entre stockage de CO₂, coût du traitement et amélioration des propriétés des granulats.

4.2 Organisation de la recherche

La recherche est organisée en groupes de travail cohérents avec les points décrits précédemment. Le GT1 traite de la partie amont (approche « laboratoire ») et le GT2 de la partie aval (approche industrielle). Un GT3 est également créé pour la partie spécifique consacrée à la valorisation des résultats du projet.

Le GT1 comprend 3 sous GT :

- Le GT1.1 est consacré à l'approche expérimentale en laboratoire. Il apportera les données expérimentales nécessaires à l'analyse des phénomènes mis en jeu lors de la carbonatation accélérée des granulats de béton recyclé, et à la connaissance de l'influence des facteurs majeurs (teneur en eau par exemple) afin de pouvoir modéliser le phénomène, dans un but d'optimisation.
- Le GT1.2 traitera de la modélisation du phénomène de carbonatation accélérée. Une comparaison de différents modèles de carbonatation adaptés à la carbonatation accélérée sera faite. Nous profiterons également du fait que plusieurs équipes de recherche spécialistes de la carbonatation sont réunies dans le projet pour apporter des éléments concernant la prise en compte de la carbonatation naturelle dans la partie bilan environnemental de la norme « Product Category Rules for concrete », la

carbonatation naturelle pouvant avoir un impact non négligeable sur le bilan en gaz à effet de serre (Xi et al., 2016).

- Le GT1.3 portera sur un traitement spécifique – la bio-carbonatation – beaucoup plus prospectif et qui ne sera pas abordé dans le GT2.

Le GT2 comprend également 3 sous GT :

- Le GT2.1 a pour objectif d'appliquer le procédé de carbonatation accélérée à une échelle industrielle. En coordination avec les expérimentations du GT1.1, des fabrications en conditions industrielles seront réalisées afin de tester la faisabilité des méthodes. Ces fabrications pourront combiner l'objectif du projet avec les matériaux disponibles (par exemple air contenant un pourcentage donné de CO₂ et récupéré en sortie d'un four de cimenterie) et les techniques pouvant être mises en œuvre (pression totale ou pression partielle). Les granulats ainsi traités seront caractérisés et les résultats seront comparés à ceux obtenus en laboratoire notamment afin de vérifier l'applicabilité des modèles développés par le GT1.2. Enfin, les conséquences sur la normalisation des granulats seront tirées de ces expérimentations.

- Le GT2.2 est consacré au passage au béton et à l'application aux pièces préfabriquées et aux ouvrages coulés en place. Avec les granulats fabriqués dans le cadre du projet, des bétons seront réalisés, y compris pour couler des éléments préfabriqués ou des parties d'ouvrages coulées in-situ. Cela permettra de mesurer l'impact du traitement sur la compacité des grains et leurs performances mécaniques dans les bétons dans lesquels ils sont recyclés pour, le cas échéant, préciser les conséquences en termes d'optimisation des formulations. L'objectif est aussi de caractériser les bétons incorporant les granulats recyclés traités d'un point de vue mécanique mais aussi leurs propriétés de durabilité. Du point de vue durabilité, il sera vérifié notamment que le traitement des granulats n'impacte pas le risque de corrosion des armatures de béton armé.

- Le GT2.3 travaille sur les évaluations économiques et environnementales du procédé. Une évaluation économique du procédé, y compris les éventuels conflits d'usage pouvant être générés, sera menée. Cette étude sera prospective car elle devra prendre en compte les évolutions possibles du coût de la tonne de CO₂. En liaison avec la partie économique, c'est-à-dire avec les mêmes hypothèses, une évaluation environnementale du procédé (ACV) sera menée.

5. CONCLUSION

Les résultats disponibles actuellement dans la bibliographie ainsi que les essais préliminaires du projet FastCarb montrent qu'il est possible de stocker dans les granulats de béton recyclé une partie significative des émissions de CO₂ liées à la production du ciment. Le projet FastCarb qui a démarré en 2018 et va durer 3 ans va investiguer en laboratoire les paramètres essentiels d'un procédé de carbonatation accélérée qui sera modélisée. Cette phase « amont » du projet doit permettre de guider les procédés industriels qui seront développés afin de fabriquer une quantité importante de GBR carbonatés. Ceux-ci seront ensuite utilisés pour caractériser les bétons dans lesquels ils seront inclus pour des applications en préfabrication et en béton coulé en place. Une étude économique et environnementale de ces procédés sera également menée. Les résultats du projet seront publiés au fur et à mesure de son avancée.

Remerciements

La recherche présentée est réalisée dans le cadre du projet FastCarb soutenu par le Ministère de la Transition écologique et solidaire.

RÉFÉRENCES

Auroy M., Poyet S., Le Bescop P., Torrenti J.M., Charpentier T., Moskura M., Bourbon X., Impact of carbonation on unsaturated water transport properties of cement based materials, *Cement and Concrete Research* 74 (2015) 44–58

Auroy M., Poyet S., Le Bescop P., Torrenti J.M., Charpentier T., Moskura M., Bourbon X., Comparison between natural and accelerated carbonation (3% CO₂): impact on mineralogy, microstructure, water retention and cracking, *Cement and Concrete Research*, Volume 109, July 2018, Pages 64–80

Cazacliu B., Gobert J.B., Condoret J.S., Huchet F., Camy S., Torrenti J.M., Feasibility study of fast carbonation of recycled concrete aggregates, *fib symposium*, Cape Town, 2016

Drouet E., Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires - prise en compte des transferts hydriques, *thèse de l'ENS de Cachan*, 2010.

Fang X., Xuan D., Poon C.S., Empirical modelling of CO₂ uptake by recycled concrete aggregates under accelerated carbonation conditions, *Materials and Structures* (2017) 50:200

Galan I., Andrade C., Castellote M., Natural and accelerated CO₂ binding kinetics in cement paste at different relative humidities, *Cement and Concrete Research*, 49 (2013)

Jang J.G., Kim G.M., Kim H.J., Lee H.K., Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials, *Construction and Building Materials* 127 (2016) 762–773

Mongear L., Dross A., *La ressource en matériaux inertes recyclables dans le béton en France*, rapport du PN RECYBETON, 2016

Morandeau A., Thiery M., Dangla P., Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, *Cement and Concrete Research*, Volume 56, February 2014, Pages 153-170

Parmentier V., Michel F., Courard L., Fixation du CO₂ dans des blocs de béton à base de granulats recyclés, *Quatorzième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)2B*, Sherbrooke, 2013

Thiery M., Roussel N., Habert G., Belin P., Dangla P., Comment intégrer quantitativement la carbonatation naturelle dans le bilan carbone des matériaux cimentaires, *colloque GC'09*, 2009.

Xi F., Davis S.J., Ciais P., Crawford-Brown D., D. Guan, C. Pade, T. Shi, M. Syddall, J. Lv, L. Ji, L. Bing, J. Wang, W. Wei, K.-H. Yang, B. Lagerblad, I. Galan, C. Andrade, Y. Zhang & Z. Liu, Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nature Geosciences*, 9, pages 880–883 (2016)

Xuan, D., Zhan, B., Poon, C.S., Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 65 : 67-74, 2016

Zhan, B., Poon, C.S., Liu, Q., Kou, S.C., Shi, C., Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties, *Construction and Building Materials*, 67 : 3-7, 2014.

Zhang, J., Shi, C.J., Li, Y, Pan, X., Poon, C.S., Xie, Z., Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates through Carbonation, *J. Mater. Civ. Eng.* 27-11 : 1-7, 2015.

Zhao Z., Courard L., Rémond S., Damidot D., Fiandaca T., Tentatives de prétraitement des granulats recyclés pour l'amélioration des bétons préfabriqués, *16^e édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)2B*, Lausanne, 2015.