

Stockage de CO₂ dans les GBR – Recommandations du PN FastCarb

Jean Michel Torrenti¹, Xavier Guillot² pour l'ensemble des partenaires du projet

¹ Université Gustave Eiffel

² Lafarge France

RESUME Les granulats de béton recyclé (GBR) contiennent une part de pâte cimentaire qui peut être carbonatée. Le projet national FastCarb visait à minéraliser le CO₂ au sein des GBR, améliorant ainsi la qualité de ces granulats par le colmatage de la porosité et enfin diminuer l'impact CO₂ du béton dans les ouvrages. Il avait deux objectifs principaux : optimiser en laboratoire le processus de carbonatation accélérée et démontrer que ce dernier pouvait être transposé à l'échelle industrielle. Ce document présente les recommandations du projet, en termes de paramètres optimisant le process, de modélisation du phénomène, de réalisation de deux démonstrateurs industriels, de résultats sur les bétons fabriqués avec des GBR carbonatés et, enfin, de bilan environnemental et économique. Les résultats montrent clairement l'intérêt du procédé pour la fraction fine (sable recyclé) qui est peu recyclée actuellement dans les bétons et qui pourrait présenter grâce à la carbonatation un bilan environnemental favorable et permettre de diminuer significativement celui des bétons.

Mots-clefs Béton, recyclage, carbonatation, CO₂

I. INTRODUCTION

Le Projet National FastCarb est un projet de recherche collaboratif soutenu par l'Etat dans le cadre du réseau « recherche appliquée en génie civil ». Il s'inscrit dans la continuité du PN Recybéton dont une des conclusions a été de montrer que la porosité des Granulats de Béton Recyclé (GBR) était un frein à leur utilisation en plus grandes proportions dans certaines classes d'exposition (de Larrard & Colina, 2019). Parallèlement, la carbonatation naturelle des bétons qui provoque la formation de carbonate de calcium est bien connue. Appliqué de manière accélérée, ce phénomène est susceptible de combler les pores des GBR et donc d'améliorer les performances de ces derniers.

La carbonatation accélérée des GBR suscite un intérêt grandissant au niveau international comme en témoigne les publications les plus récentes (voir par exemple (Pu *et al.*, 2021), (Li *et al.*, 2022), (Xiao *et al.*, 2022) ou (Winnefeld *et al.*, 2022)). L'objectif de FastCarb est d'identifier les mécanismes et les conditions permettant d'accélérer ce phénomène naturel en vue d'augmenter la quantité de CO₂ stockée dans les GBR et ainsi augmenter leur utilisation dans de nouveaux bétons. Le projet a été financé par le Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires et par 23 partenaires académiques et industriels pour un budget total de 3M€. L'IREX a

apporté son soutien à l'organisation et au contrôle financier. L'Université Gustave Eiffel a assuré la direction du projet qui a démarré fin 2017 et se termine en 2023.

Le PN FastCarb s'inscrit dans le contexte de la Loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte de 2015 qui vise deux points importants pour le secteur de la construction : la promotion de l'économie circulaire en intégrant le recyclage des matériaux de construction avec un objectif pour le secteur du BTP de valoriser 70% de ses déchets à l'horizon 2030 et la réduction des émissions de gaz à effet de serre en favorisant les constructions à faible empreinte carbone sur l'ensemble de leur cycle de vie.

Depuis, cette loi a été complétée par le Règlementation Environnementale 2020 dont les décrets imposent des seuils contraignants sur l'ensemble des émissions de CO₂ d'un bâtiment sur son cycle de vie. Cette réglementation pousse les acteurs de la construction à réduire l'empreinte carbone des bétons et l'utilisation de GBR comme puits de carbone est un des leviers possibles.. Enfin le décret relatif à la responsabilité élargie des producteurs de produits et de matériaux de construction vise à organiser et à financer les filières de collecte et de recyclage des matériaux de construction et va favoriser la réutilisation des GBR dans des applications nobles.

Ces évolutions législatives et réglementaires montrent bien la pertinence du PN FastCarb et l'importance de la connaissance et de l'optimisation des mécanismes de carbonatation des GBR tant pour ce qui est de la captation de gaz à effet de serre que pour le développement de l'utilisation des GBR dans de nouveaux bétons et le développement de l'économie circulaire dans le secteur de la construction. Les travaux du projet ont comporté 3 phases principales : une phase de recherche en laboratoire et de modélisation, une phase de carbonatation de GBR dans des démonstrateurs industriels et une phase de formulation et de fabrication de bétons incorporant des GBR recarbonatés pour la réalisation d'éléments en béton. Les analyses du bilan environnemental et de l'économie de la chaîne de production des GBR Carbonatés (GBRC) ont également été effectuées. Le présent document présente une synthèse des résultats obtenus au cours de ces différentes phases et les recommandations qui en découlent.

II. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS DU PROJET

A. Caractérisation des GBRC : Méthode de détermination du CO₂ piégé

Dans l'objectif d'une valorisation du procédé de carbonatation accélérée il est extrêmement important de pouvoir mesurer la quantité de CO₂ qui est stockée dans les GBR. L'objectif est donc de proposer des méthodes quantitatives, représentatives et reproductibles pour évaluer précisément le CO₂ piégé. Au cours du projet, cinq méthodes ont été évaluées.

L'analyse thermogravimétrique ou ATG est une mesure de référence pratiquée le plus souvent en laboratoire et dont la mise en œuvre est complexe. La précision de cette méthode (données de répétabilité et de reproductibilité) est inférieure à celle des autres méthodes évaluées, sans doute à cause de la petite quantité de matériaux testés.

La mesure de la Perte au Feu, adaptée de la norme ciment EN 196-2 :2013, nécessite un four pouvant monter à des températures supérieures à 950°C mais sa mise en œuvre est simple. La répétabilité et la reproductibilité de cette méthode sont satisfaisantes. La durée de l'essai étant de

12h, cette méthode permet de déterminer les teneurs en carbonates, avant et après carbonatation, de lots de GBR bien échantillonnés.

Le Calcimètre de Bernard et la Bombe à Carbonate mesurent la quantité de CO₂ libéré par l'échantillon lors de sa réaction avec de l'acide chlorhydrique. Les équipements nécessaires pour pratiquer ces mesures sont simples d'utilisation et la durée d'essai est courte. Si l'essai à la bombe à carbonate est simple à réaliser, celui avec le calcimètre de Bernard est un peu plus complexe. La répétabilité de ces deux méthodes est moyenne. La reproductibilité est bonne pour le calcimètre de Bernard et encore meilleure pour la bombe à carbonate. Ces méthodes sont bien adaptées à un contrôle de production pour corriger d'éventuelles dérives des réglages du procédé de carbonatation par exemple.

La mesure de la Teneur en Carbone Total s'appuie sur l'analyse d'un signal infrarouge lors de la combustion à 1400°C sous balayage d'oxygène. Si la mesure est simple et très rapide, elle nécessite l'investissement d'un équipement très spécifique. Sa répétabilité est bonne mais sa reproductibilité n'a pas pu être validée car seulement deux laboratoires l'ont pratiquée dans le cadre du projet. L'évaluation de cette méthode doit donc être poursuivie.

Selon le contexte dans lequel il est nécessaire de déterminer le CO₂ piégé, l'utilisation de certaines méthodes est à privilégier. Par exemple, si l'ATG peut être pratiquée lors d'un changement de gisement, la perte au feu est bien adaptée à la qualification de lots moyens avant et après carbonatation. Quant à la calcimétrie (Bernard ou bombe à carbonate), elle peut être utilisée en contrôle qualité entre 2 mesures de perte au feu

B. Paramètres favorisant la carbonatation accélérée des GBRC

L'optimisation de la minéralisation du CO₂ dans les granulats de béton recyclé dépend de nombreux paramètres énumérés ci-dessous et repris des résultats convergents des études en laboratoire (dont une partie publiée dans (Sereng et al., 2021) et de la modélisation :

- le type de ciment du béton d'origine a une influence sur le potentiel de stockage de CO₂. Les granulats recyclés contenant du CEM III ont un stockage pouvant être jusqu'à 3 fois inférieur à ceux contenant du CEM I

- l'état de carbonatation naturelle initiale des granulats affecte le potentiel de stockage du CO₂. Une pulvérisation par un indicateur coloré comme la phénolphthaléine permet de vérifier qualitativement si une carbonatation potentielle est encore possible

- la teneur en eau est le facteur prédominant. Une teneur en eau optimale des granulats recyclés permettant une carbonatation maximale se trouve dans une plage de 65 à 85% de la valeur de l'absorption en eau à 24h des GBR.

- la taille des granulats impacte notablement le taux de stockage du CO₂. Le taux de stockage de la fraction sable peut être le double de celui des gravillons 12-20 mm.

- une température plus élevée (40°C et au-delà) a un effet favorable sur la carbonatation. Le gain d'une pression partielle supérieure à 15% de CO₂ dans le gaz est peu important. Pour ces deux raisons, des gaz en sortie de four de cimenterie (qui ont une teneur en CO₂ voisine de 15% et une température entre 70 et 90°C) conviennent pour une carbonatation accélérée.

- la présence d'autres produits de combustion dans le gaz (SO_2 , NO_2) peut toutefois perturber significativement la cinétique de minéralisation du CO_2 .

- l'agitation granulaire est plus efficace qu'une carbonatation dans un lit granulaire fixe. Néanmoins, l'agitation granulaire produit également de l'attrition avec des effets souhaitables ou non sur le granulat (création des fines carbonatés, favorables au stockage de CO_2 , diminution de l'angularité des granulats).

- l'effet d'un écoulement forcé du gaz dans le lit de granulats améliore la cinétique de carbonatation. La pression de gaz joue aussi un rôle non négligeable sur l'augmentation du taux de stockage. Cependant, à gradient de pression trop élevé ($> 1,5$ bar), une phase de condensation est observée, limitant ainsi la pénétration du CO_2 .

- une durée du traitement plus longue augmente logiquement la quantité de CO_2 stockée. Mais cet effet est limité par le comblement de la porosité et l'augmentation de la saturation du milieu qui ralentissent la cinétique de carbonatation.

C. Procédés industriels de carbonatation accélérée

Plusieurs démonstrateurs industriels (sécheur rotatif et lit fluidisé en cimenteries, conteneur) ainsi qu'une installation pilote (filtre à gravier en laboratoire) ont été développés. Ces expérimentations ont confirmé qu'il était tout à fait possible de mettre en œuvre, dans des sites émetteurs de CO_2 , des procédés industriels de carbonatation accélérée des granulats de béton recyclé – cf. (Torrenti et al., 2022) et (Izoret et al., 2023).

Les principaux enseignements tirés de ces essais industriels sont les suivants :

- L'utilisation des gaz de cimenterie à environ 15% (vol) de CO_2 donne entière satisfaction pour l'accélération de la carbonatation artificielle, l'humidité relative optimale étant comprise entre 50 et 70%, et la température comprise entre 70 et 90°C.

- Le traitement des fractions fines de granulats de béton recyclé doit se faire dans un délai relativement court (si possible au cours des 3 mois) après leur production et leur mise à disposition pour limiter la carbonatation atmosphérique naturelle qui restreint le potentiel de carbonatation accélérée.

- Pour les granulats de béton recyclé carbonatés industriellement, des taux de captation compris entre 31 et 39 kg CO_2 /t pour le sable et entre 5 et 12 kg CO_2 /t pour le gravillon ont été mesurés en moyenne pour typiquement 1 heure de traitement (mise en contact avec le gaz) en cimenterie.

- Dans les démonstrateurs, réalisés par détournement d'installation existantes, la maîtrise du triptyque « concentration en CO_2 , humidité et température des gaz » est cruciale pour maximiser le taux de captation du CO_2 .

- Dans le cas du filtre à gravier, les taux de captation de CO_2 dépendent des mêmes paramètres que pour les installations industrielles, à savoir le triptyque évoqué ci-dessus. Les effets de la combinaison du gaz porteur principal (N_2) et des gaz secondaires (SO_2 et NO_x) ne mènent pas à la précipitation de composés spécifiques mais peuvent toutefois affecter négativement le taux de carbonatation effectif.

Dans une optique d'industrialisation des procédés, il conviendra d'optimiser la maîtrise de paramètres clés tels que l'humidité relative, la température et la durée de traitement pour ce qui concerne l'équipement ainsi que la teneur en eau des granulats recyclés. Le site devra également disposer d'une méthode fiable de détermination des taux de captation de CO₂ afin d'être en mesure de considérer ces valeurs dans les calculs des EPD des granulats mais aussi de valoriser économiquement le CO₂ non émis.

D. Production des bétons contenant des GBRC – Spécifications

Les propriétés à l'état frais ou durci des bétons fabriqués avec les granulats recyclés carbonatés issus des démonstrateurs du projet national FastCarb sont comparables à celles des bétons avec granulats recyclés non carbonatés (Pernin et *al.*, 2022). L'impact de leur emploi n'est donc pas de nature à modifier les tendances observées sur les propriétés du béton (état frais, résistance mécanique, durabilité).

Ces résultats sont à nuancer car liés aux propriétés intrinsèques des GBR (taille des grains, absorption d'eau) et à la quantité de CO₂ stocké dans leur matrice cimentaire. Les possibilités d'optimisation des processus industriels pourraient ainsi conduire à retrouver un effet certain des granulats carbonatés sur ces propriétés tel que décrit dans la littérature.

Les résultats acquis par le projet FastCarb sur les propriétés des bétons fabriqués avec des GBRC permettent de respecter les seuils adoptés en France pour les granulats recyclés. Les exigences de la norme NF EN 206+A2/CN sont donc applicables aux bétons fabriqués avec des granulats recyclés carbonatés.

E. Conditions du développement de l'utilisation des GBRC

Les GBR peuvent devenir des puits de carbone. Aussi, de futures installations de carbonatation des GBR ne pourront se développer que s'il est environnementalement et économiquement intéressant pour des opérateurs de créer une activité permettant de rapprocher les GBR des sources de CO₂ et de livrer les GBRC produits sur des chantiers de construction avec l'empreinte carbone la plus faible possible (Guyard et *al.*, 2022).

Les résultats obtenus sur les démonstrateurs industriels montrent que la carbonatation d'une tonne de fraction fine de GBR permet de capter de 31 à 39kg de CO₂, celle de la fraction plus grossière de 5 à 12 kg de CO₂. D'autre part les données du projet indiquent que les émissions de CO₂ pour une tonne de GBRC transportée sur 30km entre le site de recyclage et le site de carbonatation puis sur 20 km entre ce site et l'unité de production de BPE sont de 11 kg. Le bilan moyen des émissions de CO₂ dans ces conditions est de - 1 kg de CO₂ par tonne de gravillons et de - 28 kg de CO₂ par tonne de sable.

Les recommandations suivantes pour la production de GBRC peuvent être émises :

- Optimiser l'implantation des plateformes de recyclage des bétons de déconstruction pour réduire la part des transports dans le bilan environnemental, en favorisant un report modal (fluvial, ferré) lorsque c'est possible ; cette action est en cohérence avec un des objectifs de la REP produits de construction qui est d'accroître le nombre des plateformes d'accueils de déchets de la déconstruction.

- Poursuivre les travaux opérationnels sur les types de concasseurs à employer dans le recyclage des bétons afin de concentrer la fraction cimentaire qui se recarbonate par rapport à la fraction granulaire dont le noyau est un granulats sans potentiel de recarbonation.

Aux vues des premiers résultats obtenus, il apparaît plus rentable que l'unité de carbonatation accélérée soit uniquement alimentée avec la fraction sable des GBR puisqu'elle capte plus de CO₂.

En appliquant les résultats obtenus avec les GBRC étudiés au cas d'un béton de mur extérieur (XC4/XF1), avec 500 kg de gravillons recyclés carbonatés, 180 kg de sable recyclé carbonaté l'économie est de 7,3 Kg de CO₂ par m³ de béton par rapport à l'utilisation d'un granulats naturel. En utilisant l'approche performantielle pour valider une formule contenant, par exemple, 100% de gravillons recyclés et 50% de sable recyclé, 17,4 Kg de CO₂ par m³ de béton pourraient être économisés soit environ 10 % de l'impact changement climatique du béton.

En ce qui concerne la ressource en GBR, l'étude de l'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG) conclut que le tonnage disponible de granulats de béton recyclé à carbonater est de l'ordre de 20 Mt en France, avec une concentration des gisements dans les grandes métropoles. Le renforcement du tri des déchets à toutes les étapes de la déconstruction (chantiers, plateformes, ...) devrait favoriser l'identification, le repérage et fléchage des bétons pour qu'ils soient dirigés vers les filières de recyclage en augmentant les tonnages de GBR et à terme ceux des GBRC.

Pour ce qui est des sources ponctuelles d'émissions de CO₂, l'étude réalisée dans le cadre du projet en dénombre plus de 2300 sur le territoire français entre celles qui sont soumises à la Directive ETS et celles contrôlées au titre des ICPE auxquelles s'ajoutent les installations de méthanisation injectant du méthane dans les réseaux gaz.

Pour les entreprises sous ETS, une tonne de CO₂ captée dans des GBR, fait économiser un quota d'une valeur comprise entre 80 et 90€/t. Pour les autres cette réduction d'émissions peut permettre d'obtenir des Crédits de Compensation Carbone qui comme les quotas de CO₂ non utilisés contribueront à la rentabilité de futurs projets de captation de CO₂.

Quand cela est possible, l'utilisation de CO₂ comprimé pour carbonater les GBR sur le site de déconstruction ou sur une plateforme de recyclage permettra de limiter les émissions de CO₂ liées au transport.

III. CONCLUSIONS

Le projet national FastCarb permet déjà de tirer des enseignements concernant la carbonatation accélérée des granulats de béton recyclé. Après des recherches en laboratoire qui ont mis en évidence les facteurs importants du phénomène et conduit aux recommandations sur les essais de quantification du CO₂ capté, deux démonstrateurs ont été installés dans des cimenteries où il a été possible d'utiliser directement les gaz du four à l'échelle industrielle. La quantité de CO₂ stockée a atteint 40 kg/t de GBR pour la fraction sableuse.

L'ACV sur ces démonstrateurs confirme que la fraction sable de GBR est le matériau le plus intéressant pour l'absorption du CO₂ et l'impact sur le changement climatique. En effet,

l'indicateur CO₂ eq./t du sable recyclé carbonaté est négatif. L'utilisation de GBR carbonatés peut permettre de réduire significativement le poids carbone d'un m³ de béton. Ceci est également intéressant pour un objectif d'économie circulaire car le sable recyclé est plus difficilement utilisable dans les bétons incluant des GBR.

Le projet FastCarb montre que la carbonatation accélérée est réalisable à l'échelle industrielle avec une phase d'optimisation réduite, que les résultats sont cohérents avec les expériences en laboratoire et que les impacts environnementaux sont positifs lorsque le transport de GBR est limité. La quantité de CO₂ qui pourrait être minéralisée par ces procédés ne résoudra pas à elle seule le problème des émissions de CO₂ de l'industrie du béton, mais constitue une contribution possible et intéressante qui complète l'intérêt de l'usage des GBR dans les bétons vis-à-vis de l'économie circulaire.

REFERENCES

Guyard, P., Saade, M., & Feraille, A. (2022). Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclés quels bénéfices environnementaux?. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(3), 117-131

Izoret, L., Pernin, T., Potier, J. M., & Torrenti, J. M. (2023). Impact of Industrial Application of Fast Carbonation of Recycled Concrete Aggregates. *Applied Sciences*, 13(2), 849.

de Larrard, F., & Colina, H. (Eds.). (2019). *Concrete Recycling: Research and Practice*. CRC Press.

Li, Liang, and Min Wu. (2022) "An overview of utilizing CO₂ for accelerated carbonation treatment in the concrete industry." *Journal of CO₂ Utilization* 60.

Pernin, T., Robbiano, L., Ranaivomanana, H., Ben-Fraj, A., Geffray, F., Pham, G., ... & Amiri, O. (2022). Projet National FastCarb–Production de bétons contenant des granulats de béton recyclés carbonatés. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(3), 93-104.

Pu, Y.; Li, L.; Wang, Q.; Shi, X.; Luan, C.; Zhang, G.; Fu, L.; El-Fatah Abomohra, A. (2021) Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: A state-of-the-art review. *Constr. Build. Mat.* 2021, 282, 122671

Sereng, M., et al. "Improvement of recycled aggregates properties by means of CO₂ uptake." *Applied Sciences* 11.14 (2021): 6571.

Torrenti, J. M., et al. "The FastCarb project: Taking advantage of the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates." *Case Studies in Construction Materials* 17 (2022)

Xiao, J., Zhang, H., Tang, Y., Deng, Q., Wang, D., & Poon, C. S. (2022). Fully utilizing carbonated recycled aggregates in concrete: Strength, drying shrinkage and carbon emissions analysis. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134520.

Winnefeld, F., Leemann, A., German, A., & Lothenbach, B. (2022). CO₂ storage in cement and concrete by mineral carbonation. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 100672