

Étude de la carbonatation des granulats de béton recyclé en réacteur pour la valorisation du CO₂ d'un gaz de combustion

Gaël CORVEC

LaSIE, UMR CNRS 7356, La Rochelle Université, 17000 La Rochelle, France

Université Gustave Eiffel, MAST-GPEM, F-44344 Bouguenais, France

RESUME La valorisation des granulats de béton recyclé (GBR) par carbonatation accélérée constitue une approche prometteuse pour améliorer leurs performances et pour minéraliser du CO₂ issu des gaz industriels. Utiliser sans prétraitement les GBR et les gaz en sortie de cheminée, permettrait de limiter les surcoûts. L'efficacité du procédé pourrait dépendre de paramètres tels que la teneur en eau initiale des GBR, variable selon les conditions de stockage et la température dans le réacteur, influencée par celle du gaz, son débit ou d'autres caractéristiques. Une régulation simple de la température pourrait ainsi optimiser le processus. Cette étude, menée dans le cadre du projet ANR CO₂NCRETE, explore l'effet combiné de la température (50 – 110 °C) et de la teneur en eau initiale (4 - 10 %) sur la carbonatation de GBR (mortier concassé 0/4 mm) en lit fixe. Pour cela, des essais de carbonatation ont été réalisés dans un réacteur traversé par un gaz modèle riche en CO₂, simulant les gaz de combustion industriels. L'évolution de la carbonatation a été suivie indirectement par l'analyse du gaz et par caractérisation thermogravimétrique. Les résultats montrent que la teneur en eau est un facteur clé : à faible teneur en eau initiale (4 %), la température de 50 °C limite le dessèchement, favorisant la réaction, tandis qu'à forte teneur en eau (10 %), une température élevée (110 °C) accélère le séchage et la diffusion du CO₂. Un degré de carbonatation supérieur à 40 % a été atteint en 2 heures, avec un maximum de CO₂ piégé (70 g par kg de GBR) observé à 80 °C et 7 % de teneur en eau initiale. Les granulats de petite taille présentent une carbonatation plus rapide. Ces résultats suggèrent l'importance de l'ajustement des conditions expérimentales pour maximiser l'efficacité du procédé.

Mots-clés : Carbonatation, Capture et valorisation du CO₂, granulats de béton recyclé, température, teneur en eau

I. INTRODUCTION

La gestion des déchets du BTP s'oriente vers des approches d'économie circulaire, notamment par la valorisation des granulats de béton recyclé (GBR). Cependant, leur réutilisation dans la formulation des bétons est limitée par des performances inférieures à celles des granulats naturels (GN), en raison d'une porosité souvent plus élevée (de Brito and Saikia, 2013). La carbonatation accélérée des GBR, utilisant des gaz industriels riches en CO₂, apparaît comme une solution prometteuse pour améliorer leurs propriétés (Torrenti et al., 2022). De plus, cette réaction permet la minéralisation du CO₂ sous forme de carbonate de calcium (CaCO₃) et pourrait être utilisée comme stratégie de capture et de valorisation du carbone (CCU) (Cazacliu et al., 2024).

La carbonatation des GBR repose sur une série de mécanismes physico-chimiques. Tout d'abord, le CO₂ diffuse à travers les pores du matériau et se dissout dans l'eau présente à la surface des phases réactives, notamment la portlandite (Ca(OH)₂) et les silicates de calcium hydratés (C-S-

H). Cette dissolution entraîne la formation d'ions carbonates (CO_3^{2-}), qui précipitent ensuite sous forme de CaCO_3 en réagissant avec le calcium dissous. Ce phénomène modifie la microstructure des GBR en réduisant leur porosité et en améliorant ainsi leur compacité et leurs propriétés mécaniques (Sereng et al., 2021; Zhan et al., 2014).

La carbonatation des matériaux cimentaires peut être réalisée selon différentes approches. Certaines méthodes impliquent une extraction préalable des phases réactives à l'aide de solvants ou une purification du gaz utilisé pour la réaction. Cependant, ces procédés ajoutent des étapes complexes à un processus dont la valorisation économique et écologique reste modérée (Miller et al., 2021; Torrenti et al., 2022). Il est donc pertinent de privilégier l'utilisation directe de matériaux bruts — comme les GBR après concassage — et de gaz industriels non traités, afin de limiter les coûts et la consommation énergétique associés à la carbonatation.

Divers types de réacteurs ont été étudiés pour la carbonatation des GBR. Les réacteurs en continu, tels que les tambours rotatifs (Dos Reis et al., 2021; dos Reis et al., 2020; Torrenti et al., 2022; Wang et al., 2024), ou en lit statique (Cazacliu et al., 2024). Ces derniers permettent un meilleur contrôle des paramètres expérimentaux (température, humidité, débit de gaz) et sont adaptés à l'étude de l'effet de différents paramètres sur la réaction. Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser un réacteur en lit fixe.

Les gaz carbonatés rejetés par des sites industriels comme les cimenteries sont à des températures variant entre 80 °C et 200 °C (Wang et al., 2024), leur utilisation dans des réacteurs de carbonatation pourrait entraîner une élévation de la température. Cela soulève des questions importantes concernant l'impact de ce paramètre sur le processus de carbonatation.

Dans le cadre du projet ANR CO₂NCRETE, cette étude vise à comprendre l'influence de la température et la teneur en eau des GBR pour pouvoir optimiser un procédé de carbonatation par des gaz de combustion. Pour cela, un dispositif de carbonatation en lit fixe traversé par un gaz modèle semblable aux gaz de combustion a été développé en laboratoire. L'étude s'intéresse à l'impact de la température et de la teneur en eau initiale des GBR sur le procédé développé.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Un mortier standard a été fabriqué pour assurer une composition homogène des GBR, permettant une bonne reproductibilité du matériau de départ. En effet, les GBR issus de chantiers présentent une composition variable et ont généralement déjà subi un vieillissement, notamment par carbonatation, ce qui complique l'analyse des mécanismes de carbonatation dans des conditions contrôlées. Le mortier est formulé avec un rapport Eau/Ciment de 0,5 et Sable/Ciment de 2,16, utilisant un ciment CEM I 52,5 R et un sable siliceux (0/2 mm) pour éviter toute interférence avec la quantification du carbonate de calcium provenant de la carbonatation.

Le mortier est coulé sous forme de dalle (1,6 m², 3,5 cm d'épaisseur). La dalle a été fragmentée à l'aide d'un marteau de démolition afin d'obtenir des morceaux de taille appropriée pour les étapes ultérieures de broyage. Les fragments obtenus ont ensuite été immergés dans une cuve d'eau entre 2 et 5 mois afin de permettre l'hydratation complète du matériau et le protéger de la carbonatation

pendant le stockage avant l'essai. Les morceaux de mortier ont ensuite été concassés et criblés en granulats (0/4 mm). Certains GBR sont caractérisés sans carbonatation accélérée pour faire office de référence (GBR-NC).

B. Protocole de carbonatation

Un gaz « modèle » proche des gaz émis par les industries émettrices de CO₂ a été préparé en enrichissant de l'air en CO₂ et en eau. À titre d'exemple, les valeurs caractéristiques pour un gaz émis par une cimenterie sont les suivantes : une pression de vapeur d'eau du gaz autour de 7 kPa, une concentration en CO₂ de 14-33 % (v/v) (Bosoaga et al., 2009). Le gaz préparé est ainsi composé de 15 % de CO₂, une pression de vapeur en eau de 7 kPa à une température de 50 °C. Le débit total du gaz alimentant le réacteur a été choisi à 20 L/min (conditions normales : à 0 °C et 1 atm).

Avant la carbonatation, les GBR, après leur préparation (concassage puis mise à une teneur en eau visée), ainsi que le réacteur, sont mis à la température de l'essai pendant 4 h. La ligne de préparation du gaz est mise en route 1 h avant le début de l'essai afin que sa composition se stabilise.

Le lot de 2,5 kg de GBR est inséré dans le réacteur (Figure 1 (a)), qui est fermé par un couvercle. Le réacteur est de forme cylindrique de diamètre 20 cm et de hauteur 15,5 cm. Les entrées et sorties de gaz sont aménagées par des perçages réalisés respectivement dessous et au-dessus du réacteur. Le lit de GBR d'environ 7 cm de hauteur est déposé sur une grille disposée au fond du réacteur. Cette grille, découpée à partir d'un tamis de granulométrie de 80 µm, est ajustée à la forme du fond du réacteur. Elle permet le passage du gaz tout en retenant les GBR afin d'éviter qu'ils obstruent l'alimentation en gaz.

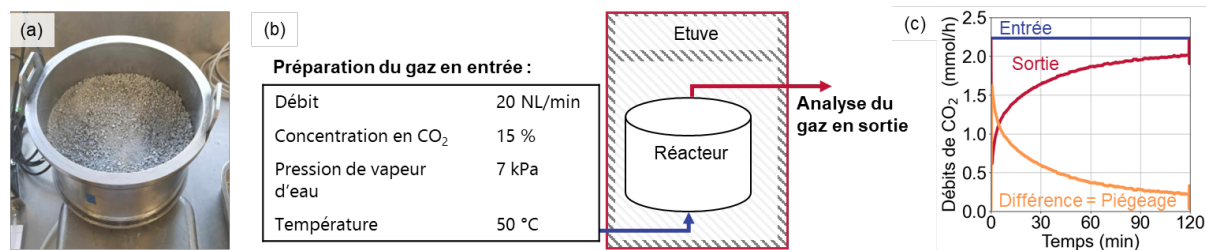


FIGURE 1. (a) Photo du réacteur à lit fixe rempli d'un échantillon de GBR, (b) schéma du dispositif et (c) exemple des débits de CO₂ mesurés et vitesse de piégeage du CO₂ pour le test à 50 °C et $w_i = 4\%$

Les essais débutent lorsque le réacteur est relié à la ligne de gaz entre le système de préparation du gaz et celui d'analyse. Le gaz est alimenté par le bas du réacteur et ressort par le haut (Figure 1 (b)). Les essais de carbonatation sont arrêtés après une durée de 2 h. À la fin de l'essai, le réacteur est déconnecté de la ligne de gaz, et la ligne de préparation du gaz est reliée au système d'analyse pour vérifier que la composition du gaz préparé reste inchangée entre le début et la fin de l'essai. Les GBR sont pesés avant d'être placés dans une étuve à 60 °C. Après stabilisation de leur masse après plusieurs jours (<0,05 %/24h), nous mesurons la masse de l'échantillon sec ($m_{fin-sec}$) pour avoir la teneur en eau à la fin de l'essai. Cette teneur en eau est déterminée en prenant comme référence

la masse à 60 °C des GBR avant la carbonatation. Le matériau est ensuite quarté et 500 g de matériau sont analysés par Macro-ATG dont le protocole est décrit ci-après.

C. Suivi de la carbonatation

Deux méthodes innovantes de suivi de la carbonatation sont utilisées. La première est une méthode indirecte par la mesure de la baisse de débit molaire en CO₂ entre l'entrée et la sortie du réacteur. Le système de mesure des caractéristiques du gaz est composé, entre-autres, d'un capteur infra-rouge de mesure de concentration en CO₂, de plusieurs baromètres et d'une sonde de température et humidité.

Le gaz en entrée, considéré stable, est contrôlé avant et après l'essai et celui en sortie est analysé en continu pendant l'essai. Les débits de CO₂ en entrée et en sortie sont notés $F_{CO_2}^{entrée}$ [mol/h] et $F_{CO_2}^{sortie}$ [mol/h]. Le calcul du bilan des flux des différents constituants permet d'obtenir l'évolution de la consommation en CO₂ des GBR ($G_{CO_2}^{indir}$ [g/kg_{950°C}]) :

$$G_{CO_2}^{indir} = \int_0^t \frac{(F_{CO_2}^{entrée} - F_{CO_2}^{sortie})M_{CO_2}}{m_{950°C}} dt \quad (1)$$

De la même manière avec les débits d'eau en entrée et en sortie on calcule les échanges hydriques entre les GBR et le gaz ($Q_{H_2O}^{échange,f}$ [kg]).

Notons que la quantité de CO₂ fixée par le matériau est exprimée en g par kg de matériau chauffé à 950 °C. La masse du matériau à 950 °C est une valeur de référence car ne changeant pas au cours de la carbonatation et des échanges hydriques avec l'ambiance.

La deuxième méthode est une caractérisation thermogravimétrique avec des quantités de matériaux macroscopiques (Macro-ATG). Après la carbonatation et quartage de 500 g, les granulats sont tamisés à 2 mm, 1 mm, 0,5 mm et 0,2 mm. Chaque fraction obtenue est placée dans un four afin de mesurer leur masse à 3 températures (415 °C, 475 °C et 950 °C). Pour chaque mesure de la masse à une température, les échantillons sont maintenus à la température souhaitée pendant au moins 3 h puis une redescente en température à 105 °C est effectuée pour pouvoir peser les échantillons en dehors du four.

Suite à une étude préliminaire, nous avons montré que, dans ces conditions de chauffe, entre 415 °C et 475 °C, la portlandite (Ca(OH)₂) se décompose en CaO et libère une molécule d'eau et entre 475 °C et 950 °C, le carbonate de calcium (CaCO₃) libère une molécule de CO₂ pour former du CaO. À partir des masses mesurées, on calcule la teneur en portlandite (T_{CH} [mol/kg_{950°C}]), en carbonate de calcium (T_{CC} [mol/kg_{950°C}]) et en CO₂ (T_{CO_2} [mol/kg_{950°C}]) :

$$T_{CH} = \frac{(m_{415°C} - m_{475°C})}{m_{950°C} \times M_{H_2O}}, T_{CC} = \frac{(m_{475°C} - m_{950°C})}{m_{950°C} \times M_{CO_2}}, T_{CO_2} = \frac{(m_{475°C} - m_{950°C})}{m_{950°C}} \quad (2)$$

La comparaison des quantités de CO₂ piégées déterminées avec la méthode indirecte et la Macro-ATG est présentée sur la Figure 2. Les deux méthodes semblent diverger un peu quand la carbonatation est supérieure à 40 g/kg_{950°C}. Chacune des méthodes est innovante et possède ses limitations. La Macro-ATG par paliers possède une incertitude de mesure assez grande en particulier avec la difficulté de choisir la température qui sépare la déshydratation de la décarbonatation des GBR. La méthode indirecte quant à elle dépend de la précision des sondes qui servent au calcul des bilans de masse. La sonde de mesure de la concentration en CO₂, entre autres,

possède une incertitude de mesure de 1,3 % de CO₂. Pour 15 % de CO₂, cela représente une incertitude de 8,6 % de la valeur lue. Cette incertitude est directement reliée à l'incertitude de la quantité de CO₂ fixée par la méthode indirecte et est représentée sur la Figure 2.

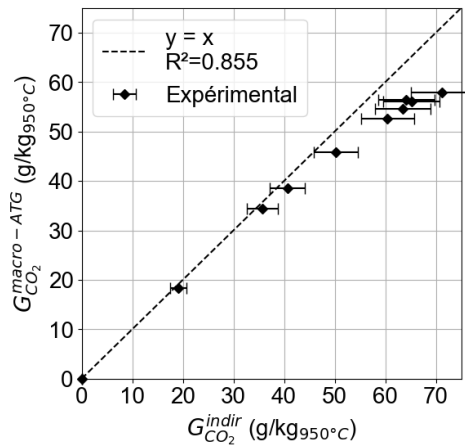


FIGURE 2. Corrélation entre la quantification de la teneur en CO₂ par la Macro-ATG ($G_{CO_2}^{macro-ATG}$) et la détermination du CO₂ fixé par méthode indirecte ($G_{CO_2}^{indir}$)

Les teneurs en portlandite et en carbonates de calcium dans les cinq fractions granulométriques du matériau avant carbonation (GBR-NC) sont données sur la Figure 3 (a). Les fractions granulaires n'ont pas la même composition. Les fractions 0/0,2 et 0,2/0,5 mm ont une plus grande concentration des deux phases car ils contiennent a priori plus de pâte de ciment (Zhao et al., 2013). En effet, celle-ci se casse plus facilement que les grains de sable pendant le concassage.

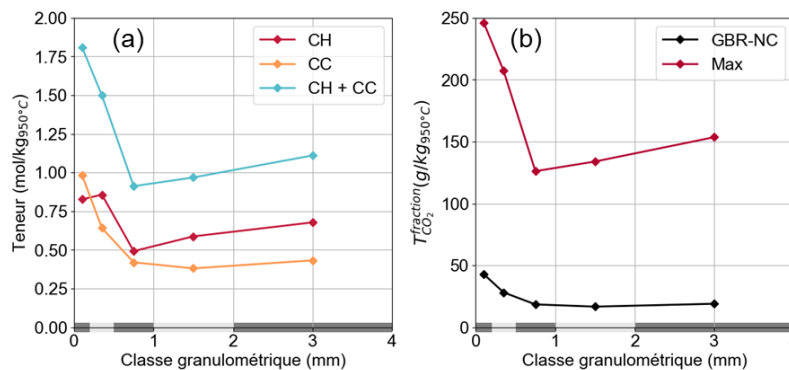


FIGURE 3. (a) Concentration en portlandite (CH) et carbonate de calcium (CC) et somme des deux en fonction des cinq fractions granulométriques du GBR étudié. Les points sont fixés à la moyenne arithmétique de la fraction représentée par les rectangles en nuance de gris sur l'axe des abscisses. (b) Teneur en CO₂ dans le GBR-NC et le maximum théorique en fonction du diamètre des grains.

Afin de calculer le degré de carbonatation, la teneur maximale théorique en CO₂ que peut fixer le matériau $T_{CO_2,max}^{tot}$ [mol/kg_{950°C}] a été déterminée avec la composition du ciment et du mortier. Il a été considéré que tous les oxydes du ciment CaO, MgO, Na₂O et K₂O peuvent réagir avec du CO₂ sauf la partie du CaO qui a déjà réagi avec SO₃ pour former du gypse (CaSO₄.H₂O) (Zhan et al., 2014). Cette teneur maximale pour chaque fraction ($T_{CO_2,max}^{fraction}$ [mol/kg_{950°C}]) est ensuite considérée proportionnelle à sa teneur initiale en portlandite et carbonate de calcium. Les répartitions de la quantité de CO₂ initiale sur les GBR-NC déterminée par Macro-ATG et du maximum de CO₂ pouvant être fixé suivant les fractions granulométriques sont représentés sur la Figure 3 (b).

Le degré de carbonatation (DC^{fraction} [%]) est déterminé pour chaque fraction avec la teneur en CO₂ de la fraction $T_{CO_2}^{fraction}$ et celle de la fraction non carbonatée $T_{CO_2,NC}^{fraction}$:

$$DC^{fraction} = \frac{T_{CO_2}^{fraction} - T_{CO_2,NC}^{fraction}}{T_{CO_2,max}^{fraction} - T_{CO_2,NC}^{fraction}} \times 100 \quad (3)$$

D. Programme expérimental

La teneur en eau initiale des GBR a été choisie à 4 %, 7 % et 10%, tandis que la température de l'étuve dans lequel le réacteur est placé a été réglée à 50 °C, 80 °C et 110 °C. La carbonatation a été effectuée pour les 9 combinaisons possibles de ces paramètres.

La teneur en eau souhaitée est obtenue après la cure et le broyage GBR. Ils sont considérés alors comme totalement saturés en eau (10 %). Certains essais ont été réalisés sur ces granulats saturés en eau qui ont été conservés au maximum 12 jours dans un sac fermé avant leur utilisation. Les GBR préparés à des teneurs en eau plus faibles ont été obtenus en deux étapes. Le séchage s'est d'abord effectué en étuve à 60 °C jusqu'à stabilisation de la masse. L'humidification des granulats s'est ensuite effectuée en remplissant un sac de granulats secs et de la masse d'eau correspondante à la teneur en eau visée. Le mélange a été homogénéisé en secouant le sac, qui reste ensuite fermé plusieurs jours.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Influence de la teneur en eau initiale et de la température sur la carbonatation

La mesure en continu de la concentration en sortie du réacteur de carbonatation a permis d'obtenir l'évolution de la quantité de CO₂ fixé par le matériau (Figure 4).

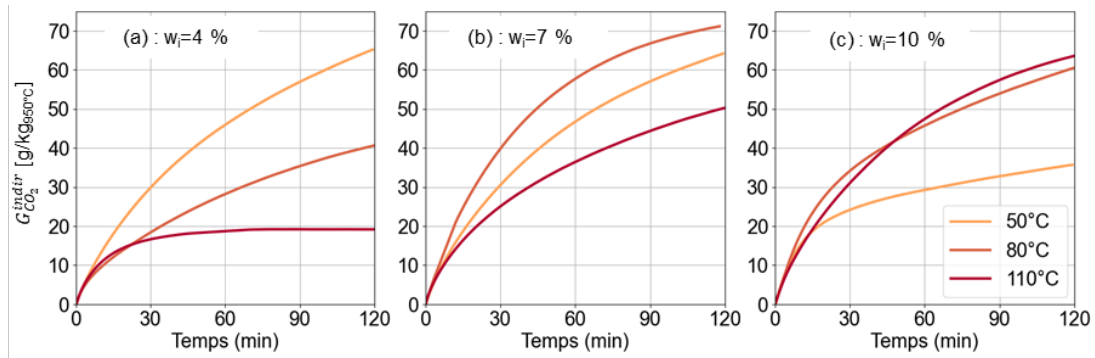


FIGURE 4. Évolution du cumul de CO₂ fixé pour les 3 températures de l'étude à la teneur en eau initiale (a) de 4 %, (b) de 7 % et (c) de 10 %

On observe que toutes les courbes ont une forme assez similaire avec la vitesse de carbonatation qui baisse avec le temps. Sur 120 min, la carbonatation la plus efficace se produit à 80 °C pour une teneur eau initiale de 7 %. Dans ces conditions, les GBR ont piégé 71,1 g/kg_{950°C} de CO₂ ce qui correspond à un degré de carbonatation (DC) de 36 %.

L'effet de la température n'est pas le même suivant la teneur en eau initiale des GBR. En effet, quand la teneur en eau initiale est de 4 %, la carbonatation est moins efficace plus la température est grande. A l'inverse, quand la teneur en eau initiale (w_i) est autour de 10 %, la carbonatation est la moins efficace à 50 °C et est la plus efficace à 80 °C les 45 premières minutes puis à 110 °C jusqu'à la fin. Pour une teneur initiale de 7 %, la carbonatation est optimale à 80 °C. L'essai le moins performant, à 110 °C et $w_i=4$ %, est aussi le seul essai qui a une vitesse de carbonatation nulle après 90 minutes. L'échantillon ne contient probablement plus assez d'eau, nécessaire pour que les réactifs puissent se dissoudre et que la carbonatation puisse continuer.

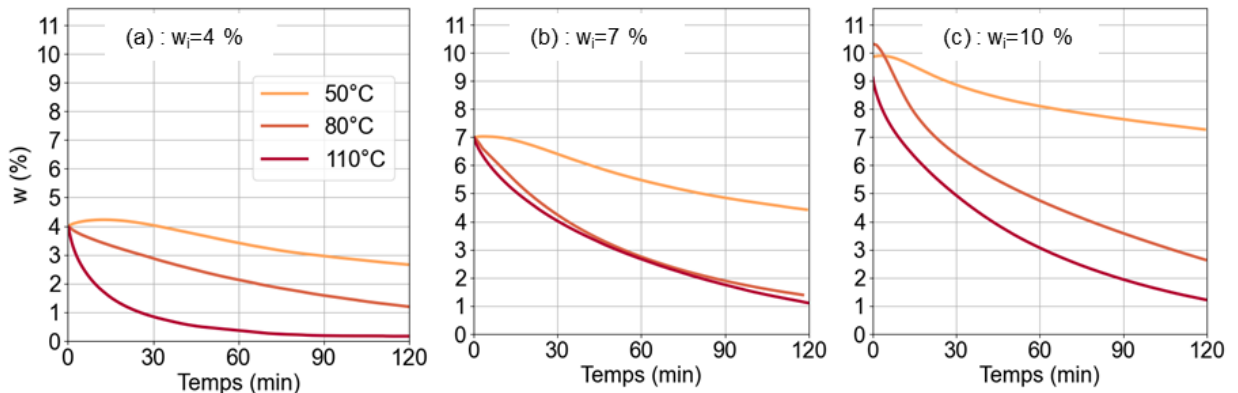


FIGURE 5. Évolution de la teneur en eau moyenne de l'échantillon pendant la carbonatation aux différentes températures et teneurs en eau initiales : (a) 4 %, (b) 7 % et (c) 10 %

Pour étudier l'effet de la température, il faut prendre en compte l'état hydrique des matériaux cimentaires qui peut évoluer et a un fort impact sur la carbonatation. À partir du suivi des débits de CO₂ et d'H₂O du gaz en sorti, nous avons pu estimer la teneur en eau moyenne de l'échantillon. La Figure 5 montre que la teneur en eau moyenne des échantillons baisse au cours de tous les

essais. Le séchage pendant les essais est donc plus rapide que la production d'eau par la réaction de carbonatation.

La teneur en eau des échantillons diminue plus rapidement plus la température est élevée. La vapeur d'eau du gaz en entrée du réacteur est entre 6 kPa et 8 kPa ce qui correspond à une humidité relative (HR) de 60 % à 50 °C et de 15 % à 80 °C. On ne peut pas parler d'HR au-dessus de 100 °C car il n'y a pas de pression de vapeur saturante à pression atmosphérique. L'augmentation de la température a donc un double effet sur la saturation en eau : elle augmente l'écart avec l'équilibre hydrique et accélère les vitesses d'échange hydriques.

Nous pouvons maintenant étudier l'effet de la température sur la quantité de CO₂ fixé par les GBR (Figure 4) couplé à l'évolution de la teneur en eau (Figure 5). Pour observer plus facilement les effets couplés, nous traçons sur la Figure 6 le cumul de CO₂ à plusieurs échéances en fonction de la teneur en eau moyenne des échantillons estimée aux trois températures.

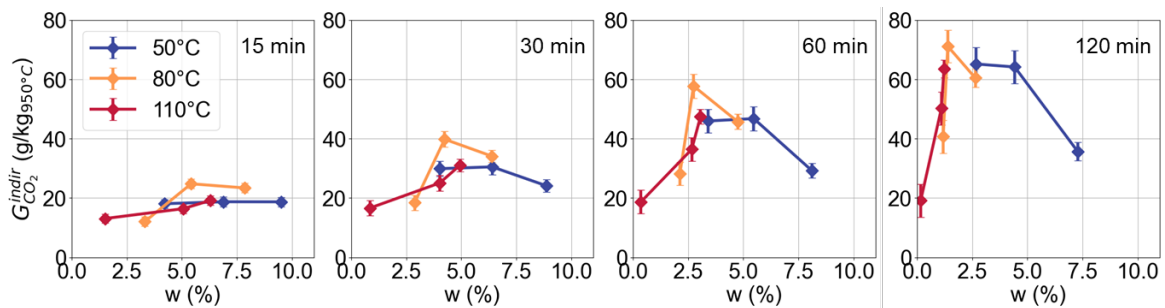


FIGURE 6. Évolution du cumul de CO₂ fixé en fonction de la teneur en eau moyenne des GBR à 15, 30, 60 et 120 min. Les segments sont tracés pour aider à la lecture mais ne représentent pas des données.

Au bout de 15 min, la carbonatation semble être légèrement plus efficace plus la teneur en eau est élevée. Les deux essais les plus saturés à 80 °C ont permis de piéger un peu plus de CO₂ que les autres conditions. Il est probable qu'au début des essais, ce soit principalement la surface des échantillons qui réagisse. En effet, la diffusion du CO₂ dans la porosité est un facteur limitant dès les premières phases de la carbonatation (Morandea et al., 2014) et l'amélioration de la carbonatation par l'augmentation de la surface d'exposition (Kikuchi and Kuroda, 2011) suggère que la réaction s'effectue préférentiellement en surface. L'augmentation de la teneur en eau favorise alors la dissolution des réactifs à la surface des GBR, sans que le CO₂ ait besoin de diffuser profondément dans le matériau.

À mesure que le temps de carbonatation augmente, la forme d'une cloche se dessine. De plus, avec le temps, l'impact de la teneur en eau augmente et le maximum de carbonatation est obtenue pour des valeurs de teneur en eau plus faible. À mesure que l'essai avance plus la réaction s'effectue près du cœur des GBR et plus la carbonatation est influencée par la diffusion du CO₂ dans la structure. Or, plus la teneur en eau est grande, plus elle ralentit la diffusion dans les GBR.

D'autres études ont également mis en évidence l'existence d'une teneur en eau optimale pour maximiser la carbonatation (Drouet et al., 2019; Sereng et al., 2021). Sereng et al. ont observé un degré de carbonatation maximal pour des GBR de taille 12/20 mm exposés pendant 24 h à une

atmosphère contenant 15 % de CO_2 , à 20 °C et 40 °C. Cette carbonatation optimale a été obtenue lorsque la teneur en eau des GBR correspondait à 80 % de leur capacité d'absorption en eau. Lors de nos essais, l'optimum de teneur en eau semble être plus proche de 15 % de l'absorption en eau des GBR. Cependant, plusieurs paramètres varient entre les deux études comme la taille des granulats et le temps de carbonatation.

L'optimum de carbonatation n'est peut-être pas exactement à la même teneur en eau suivant la température, cependant la teneur en eau est un paramètre plus important pour optimiser la carbonatation que la température. En effet, la température a plus d'effet sur la vitesse de carbonatation par son impact sur l'état hydrique que sur les cinétiques chimiques.

B. Impact de la taille des granulats

Les résultats précédents concernent le lit dans sa globalité avec l'ensemble de la fraction 0/4 mm. Afin d'avoir plus de détails sur l'état de carbonatation du matériau, nous avons réalisés la Macro-ATG sur les différentes fractions granulométriques après les deux heures de carbonatation.

La représentation des résultats sur l'influence des paramètres d'entrée sur le degré de carbonatation est faite pour chaque fraction séparément (Figure 7). Dans l'ensemble, les degrés de carbonatation les plus élevés suivent la diagonale allant du « plus froid et sec » au « plus chaud et saturé ». L'optimum est obtenu dans les conditions où les deux paramètres, w_i et température, permettent d'avoir une teneur en eau assurant une bonne dissolution des réactifs tout en ne limitant pas trop la diffusion.

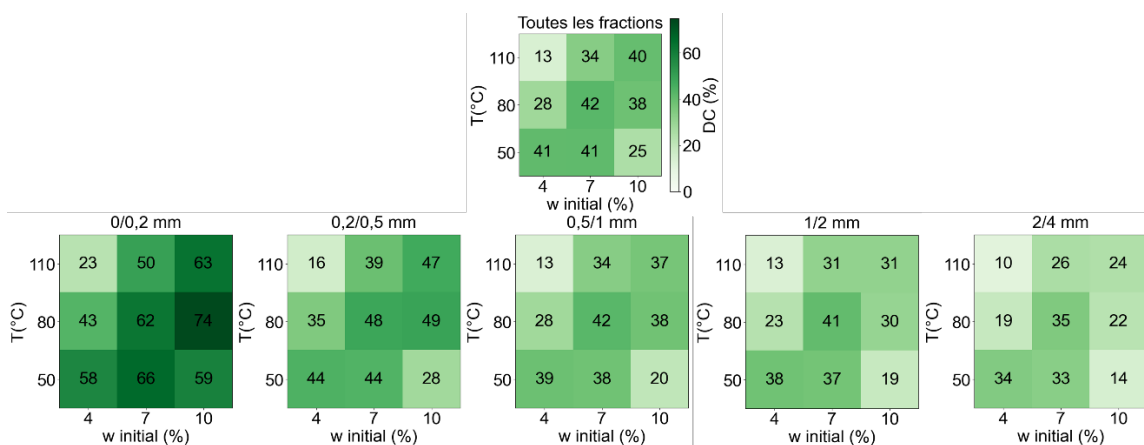


FIGURE 7. Degré de carbonatation (DC) déterminé avec la Macro-ATG suivant la température et la teneur en eau initiale des GBR après 2 h de carbonatation dans le lit fixe pour chaque fraction granulométrique

Dans le cas des fractions plus fines, la carbonatation est plus importante dans les échantillons les plus saturés en eau initialement. Alors que la diffusion gazeuse est limitante dans ces conditions, la diminution de la taille permet à ce que la diffusion ait moins d'effet sur la vitesse de carbonatation. Pour les fractions plus grossières, la carbonatation est plus faible sur la colonne $w_i=10$ % car l'impact de la diffusion augmente avec la taille des granulats.

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'effet combiné de la température (50 °C - 110 °C) et de la teneur en eau initiale des GBR (4 % - 10 %) sur leur carbonatation dans un lit fixe traversé par un gaz riche en CO₂ a été étudié. Les résultats montrent que la teneur en eau joue un rôle déterminant pour assurer la diffusion efficace du CO₂ et la disponibilité des hydrates nécessaires à la réaction. Pour les GBR initialement peu saturés (4 %), la température de 50 °C favorise la carbonatation en limitant le séchage excessif. En revanche, pour les GBR initialement saturés (10 %), une température élevée de 110 °C, accélère le séchage, améliorant ainsi la diffusion du CO₂ et la carbonatation. À la température optimale, un degré de carbonatation de plus de 40 % a été atteint en seulement 2 heures à toutes les teneurs en eau initiales. Le maximum de CO₂ piégé, soit 70 g/kg_{950°C}, a été atteint pour une teneur en eau initiale de 7 % à 80 °C. Les GBR de petite taille présentent une carbonatation plus importante, avec un optimum de teneur en eau initiale plus élevé que pour des GBR de plus grande taille.

Une continuité de ce travail serait de caractériser l'homogénéité de la teneur en eau dans le lit. L'évaluation de la teneur en eau a été réalisée pour la globalité du lit. On ne sait pas non plus si l'eau se trouve dans la porosité intragranulaire ou intergranulaire. De plus, une étude performancielle des GBR permettrait de mesurer le gain de ses caractéristiques avec le procédé de carbonatation étudié.

V. Remerciements

L'auteur remercie l'ANR pour le financement du projet CO₂NCRETE.

REFERENCES

- Bosoaga, A., Masek, O., Oakey, J.E., 2009. CO₂ Capture Technologies for Cement Industry. *Energy Procedia* 1, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.020>
- Cazacliu, B., Djerbi, A., Braymand, S., Bertola, J., Huet, B., Jeong, J., Colin, J., Kaddah, F., Amiri, O., Roziere, E., Turcry, P., 2024. Recommandations du Projet National FastCarb-Characterisation des GBRC : Méthode de détermination du CO₂ piégé (No. 1), Recommandations du Projet National FastCarb.
- de Brito, J., Saikia, N., 2013. Use of Construction and Demolition Waste as Aggregate: Properties of Concrete, in: *Recycled Aggregate in Concrete, Green Energy and Technology*. Springer London, London, pp. 229–337. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4540-0_5
- Dos Reis, G.S., Cazacliu, B., Artoni, R., Torrenti, J.-M., Hoffmann, C.S., Lima, E.C., 2021. Coupling of attrition and accelerated carbonation for CO₂ sequestration in recycled concrete aggregates. *Cleaner Engineering and Technology* 3, 100106. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100106>
- dos Reis, G.S., Cazacliu, B.G., Artoni, R., Torrenti, J., 2020. Effect of the accelerated carbonation treatment on the recycled sand physicochemical characteristics through the rolling carbonation process. *Journal of CO₂ Utilization* 39, 101181. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101181>
- Drouet, E., Poyet, S., Le Bescop, P., Torrenti, J.-M., Bourbon, X., 2019. Carbonation of hardened cement pastes: Influence of temperature. *Cement and Concrete Research* 115, 445–459. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.019>
- Kikuchi, T., Kuroda, Y., 2011. Carbon Dioxide Uptake in Demolished and Crushed Concrete. *ACT* 9, 115–124. <https://doi.org/10.3151/jact.9.115>
- Miller, S.A., Habert, G., Myers, R.J., Harvey, J.T., 2021. Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. *One Earth* 4, 1398–1411. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.09.011>

- Morandeau, A., Thiéry, M., Dangla, P., 2014. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. *Cement and Concrete Research* 56, 153–170. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.015>
- Sereng, M., Djerbi, A., Metalssi, O.O., Dangla, P., Torrenti, J.-M., 2021. Improvement of Recycled Aggregates Properties by Means of CO₂ Uptake. *Applied Sciences* 11, 6571. <https://doi.org/10.3390/app11146571>
- Torrenti, J.M., Amiri, O., Barnes-Davin, L., Bougrain, F., Braymand, S., Cazacliu, B., Colin, J., Cudeville, A., Dangla, P., Djerbi, A., Doutreleau, M., Feraille, A., Gueguen, M., Guillot, X., Hou, Y., Izoret, L., Jacob, Y.-P., Jeong, J., Hiu Hoong, J.D.L., Mahieux, P.-Y., Mai-Nhu, J., Martinez, H., Meyer, V., Morin, V., Pernin, T., Potier, J.-M., Poulizac, L., Rougeau, P., Saadé, M., Schmitt, L., Sedran, T., Sereng, M., Soive, A., Dos Reys, G.S., Turcry, P., 2022. The FastCarb project: Taking advantage of the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates. *Case Studies in Construction Materials* 17, e01349. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01349>
- Wang, D., Noguchi, T., Nanao, M., Nozaki, T., Hayakawa, T., 2024. Parametric investigation and scale testing on accelerated CO₂ sequestration of cement-based materials by utilizing industrial waste heat. *Journal of Cleaner Production* 475, 143716. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143716>
- Zhan, B., Poon, C.S., Liu, Q., Kou, S., Shi, C., 2014. Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties. *Construction and Building Materials* 67, 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.008>
- Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., Xu, W., 2013. Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* 2, 186–203. <https://doi.org/10.1080/21650373.2013.812942>