
Effet de la carbonatation sur les granulats recyclés et le coefficient d'absorption d'eau

Sereng Marie¹, Djerbi Assia¹, Omikrine Metalssi Othman¹, Dangla Patrick², Torrenti Jean-Michel¹

¹ Université Paris-Est, MAST, FM2D, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France, marie.sereng@ifsttar.fr

² Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR, F-77455 Marne-la-Vallée, France, dangla@ifsttar.fr

RÉSUMÉ. La carbonatation peut être utilisée comme traitement des granulats de béton recyclés (GBR) en améliorant leur absorption d'eau. Ce type de granulat peut jouer un rôle important dans le stockage du CO₂ suite à leur carbonatation.

Le but de cet article est de développer un procédé de traitement par carbonatation des GBR de deux fractions 1-4 mm et 10-20 mm. L'objectif est de déduire l'effet de la carbonatation naturelle et accélérée sur les GBR et sur l'amélioration du coefficient d'absorption d'eau.

Les résultats démontrent qu'il existe un effet de la carbonatation accélérée sur la teneur en eau mais également un effet de la fraction granulaire sur la teneur en eau pour un maximum de carbonatation (3,8% de teneur en eau optimale pour les GBR CN (10-20) et 5,2% pour les GBR CN (1-4)). La carbonatation naturelle a également un effet sur la carbonatation accélérée, et va influencer sur l'absorption d'eau, en abaissant le coefficient à hauteur de 53% sur des GBR carbonatés naturellement et jusqu'à 67% des GBR issus de GBR carbonatés naturellement uniquement en surface.

ABSTRACT. Carbonation can be used as a treatment of recycled concrete aggregates (RCA), to improve water absorption. This type of aggregates can uptake CO₂ during its carbonation.

The aim of this article is to develop a process of carbonation treatment of RCA of two different fractions 1-4 mm and 10-20 mm. The objective is to study the effect of natural and accelerated carbonation on RCA and on the improvement of water absorption coefficient.

An effect of accelerated carbonation on water content and an effect of granular fraction on water content are highlighted (3.8% of water content for RCA CN (10-20) and 5.2% for RCA CN (1-4)). Natural carbonation has an effect on accelerated carbonation and impacts water absorption by reducing the water absorption coefficient to 53% for naturally carbonated RCA, and to 67% for RCA from naturally carbonated RCA at the surface.

MOTS-CLÉS : Carbonatation, granulats de béton recyclés, coefficient d'absorption d'eau, fraction granulaire, teneur en eau

KEY WORDS: Carbonation, recycled concrete aggregates, water absorption coefficient, granular fraction, water content

1. Introduction

La carbonatation du béton, qui est la réaction entre les hydrates du ciment (portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et le gel de C-S-H) et le dioxyde de carbone CO_2 , et qui conduit à la formation de carbonates de calcium CaCO_3 , est un traitement efficace des granulats de béton recyclés (GBR) car il diminue leur forte porosité et leur forte capacité d'absorption d'eau pour leur réemploi [XUA 16]. Ce procédé permet également aux GBR de stocker du CO_2 , dans le but de réduire l'impact écologique du béton [ZHA 14] [FAN 17]. Le traitement par carbonatation accélérée des GBR est influencé par de nombreux paramètres, dont la teneur en eau [ZHA 14]. Cette étude présente un procédé de carbonatation accélérée des GBR 1-4 mm et 10-20 mm issus de bétons de déconstruction. L'objectif principal est de caractériser l'effet de la carbonatation (naturelle et accélérée) des GBR sur leur capacité de stockage du CO_2 , et d'absorption d'eau.

2. Programme expérimental

2.1. Matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude sont des GBR issus de plateformes de recyclage de deux fractions 1-4 mm et 10-20 mm. Ils ont été utilisés dans le projet national RecyBéton [DEL 18]. Le tableau 1 présente les propriétés physiques de ces GBR (l'absorption d'eau est déterminée en utilisant la norme EN 1097-6).

Tableau 1. Propriétés des GBR utilisés

Propriétés physiques	GR 1-4 mm	GR 10-20 mm
Absorption d'eau (%)	8,9	5,8
Densité (kg/m^3)	2540	2240

Pour l'échantillonnage, les GBR utilisés ont des caractéristiques de carbonatation telles que :

- Pour les GBR 1-4 mm (CN6 (1-4)), ils sont issus des GBR 1-4 mm du tableau 1 et ils sont carbonatés naturellement après 6 ans de stockage.
- Pour les GBR 10-20 mm (CN (10-20)), ils sont carbonatés naturellement à la surface, car ils ont été récupérés au cœur du Big Bag des GR 10-20 mm du tableau 1. Ces GBR CN (10-20) ont également été concassés en GBR 1-4 mm (CN (1-4)) qui sont de la même manière peu carbonatés naturellement.
- Pour les GBR carbonatés des GBR cités ci-dessus, la mention (CA pic) dans le texte correspondra à la carbonatation accélérée de l'échantillon à l'optimum de teneur en eau.

2.2. Procédé de carbonatation accélérée

2.2.1. Teneur en eau des GBR

La teneur en eau est un prétraitement des GBR. Ces derniers sont préalablement séchés à 80°C jusqu'à masse constante. Ils sont ensuite immergés totalement dans l'eau pendant 24h, pour avoir une homogénéité de la teneur en eau. Après, ils sont récupérés et séchés à 80°C pour obtenir la teneur en eau désirée [SER 18]. La teneur en eau en pourcentage est déterminée par la différence entre la masse humide après l'immersion de 24h et le séchage à 80°C et la masse sèche initiale.

Avant la carbonatation, un vide est appliqué à moins de 100 mbar pendant 4h permettant de retirer l'air présent au sein des pores des GBR, pour favoriser la pénétration du CO_2 . Ce traitement provoque un séchage additionnel que nous mesurons par pesée afin de corriger la teneur en eau initialement mesurée [SER 18].

2.2.2. Essai de carbonatation accélérée et détermination de la fixation du CO_2

Les GBR avec les teneurs en eau désirées sont disposés dans un dessiccateur pour la carbonatation accélérée. Comme décrit précédemment, un vide est appliqué aux GBR en amont de la carbonatation. Par la suite, le CO_2 est injecté à une concentration de 100%, à pression atmosphérique pendant 24 heures. Le débit de gaz est observé par des bulles d'air dans une fiole à vide d'éthylène glycol [SER 18].

À la fin de la carbonatation, chaque échantillon est séché à 80°C , jusqu'à masse constante, afin de réaliser un suivi de masse pour étudier la prise de masse des échantillons au bout des 24h de carbonatation accélérée. Le stockage du CO_2 (en g/kg) est déterminé par la différence de masse entre la masse après carbonatation et séchage et la masse sèche initiale [SER 18].

2.3. Méthode de détermination du coefficient d'absorption d'eau des GBR

On se propose d'étudier l'effet de la carbonatation accélérée sur le coefficient d'absorption d'eau.

Dans un premier temps, l'échantillon sec est saturé en eau pendant 24h (4h de vide + 20h d'eau). Pour les GBR CN (10-20), après la saturation, l'échantillon est récupéré et pré-séché à l'aide d'un chiffon pour établir l'état SSD (saturated surface dry), qui correspond à l'état où le granulat est sec en surface, mais saturé au cœur par l'eau absorbée [YAC 18]. Les GBR sont ensuite séchés à 80°C avec un suivi de masse, jusqu'à masse constante. Pour les GBR CN6 (1-4) et CN (1-4), l'échantillon est aussi récupéré après saturation, mais l'état SSD est obtenu par un procédé d'évaporimétrie avec un suivi de masse continu, car le pré-séchage à l'aide d'un chiffon comme le spécifie la norme NF EN 1097-6, peut retirer une partie de la pâte de ciment, responsable de la forte absorption d'eau des granulats. La courbe obtenue à la fin de l'essai permet de déterminer l'état SSD des GBR, qui correspond au point de transition entre la phase constante de perte d'eau évaporable et la phase décroissante de perte d'eau adsorbée [YAC 18]. De la même manière que pour les GBR CN (10-20), à l'issue de l'évaporation, les GBR sont séchés à 80°C jusqu'à masse constante. L'absorption d'eau se détermine par la différence entre la masse des GBR à l'état SSD et la masse des GBR après le séchage à 80°C [YAC 18].

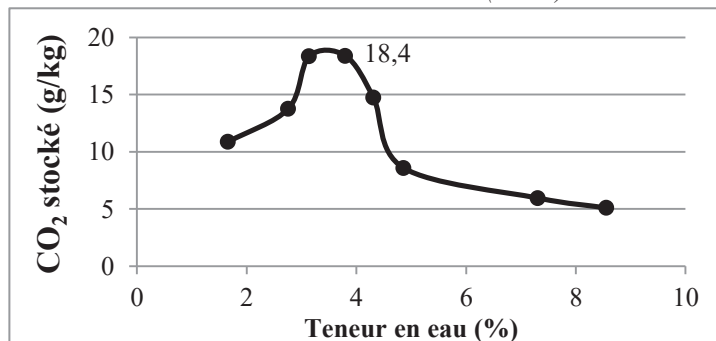
3. Résultats et discussions

3.1. Stockage du CO₂

3.1.1. Carbonatation accélérée des GBR CN (10-20)

La figure 1 démontre l'effet de la teneur en eau sur le taux de CO₂ stocké pour les GBR CN (10-20). Le maximum de CO₂ stocké d'environ 18,4 g/kg est obtenu pour une teneur en eau de 3,8%. La courbe obtenue du taux de carbonatation a une forme de « cloche ». A haute teneur en eau, la diffusion du CO₂ est bloquée par la présence de l'eau dans les pores et à faible teneur en eau, l'eau n'est pas présente en quantité suffisante pour permettre la dissolution du CO₂ et la réaction de carbonatation. De chaque côté du maximum de carbonatation, les valeurs minimales de CO₂ stocké d'environ 10,9 g/kg et 5,1 g/kg sont atteintes pour des teneurs en eau inférieure et supérieure à l'optimum (1,7% et 8,6%).

Figure 1. Résultats de la carbonatation accélérée des GBR CN (10-20)

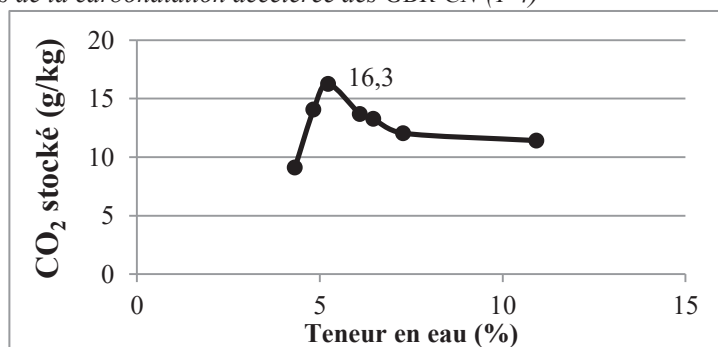


Ce résultat est en accord avec l'étude de Zhan *et al.*, qui obtiennent un maximum de pourcentage de carbonatation pour une teneur en eau égale à 3,37%, avec des GBR 10-14 mm fabriqués au laboratoire [ZHA 14]. Dans la bibliographie, les valeurs du maximum de fixation de CO₂ sont variées. Pour des GBR 5-10 mm issus de plateformes de recyclage, après 24h d'essai, Fang *et al.* trouvent un maximum de fixation de CO₂ à hauteur d'environ 22 g/kg de GBR. Nos résultats sont donc dans le même ordre de grandeur [FAN 17]. D'autres études montrent que sur des GBR peu carbonatés naturellement de fraction 5-20 mm, la capacité de stockage de CO₂ est également à 7,9 g/kg en moyenne [XUA 16].

De plus, l'état de carbonatation naturelle initiale des GBR affecte la carbonatation accélérée. En effet, les GBR CN (10-20) sont carbonatés naturellement en surface. Cet effet est démontré dans la bibliographie, les GBR fabriqués en laboratoire et donc peu carbonatés naturellement stockent plus de CO₂ tandis que pour les GBR issus de plateformes de recyclage de même fraction, le taux de stockage du CO₂ est plus faible, dû à l'effet du concassage et du stockage des GBR avant la carbonatation accélérée [XUA 16].

3.1.2. Carbonatation accélérée des GBR CN (1-4)

La figure 2 démontre également l'effet de la teneur en eau sur le stockage du CO₂, sur des GBR CN (1-4). L'optimum de CO₂ stocké d'environ 16,3 g/kg est obtenu pour une teneur en eau de 5,2%. De la même manière que pour les GBR CN (10-20), la courbe obtenue de carbonatation a une tendance sous forme de « cloche ».

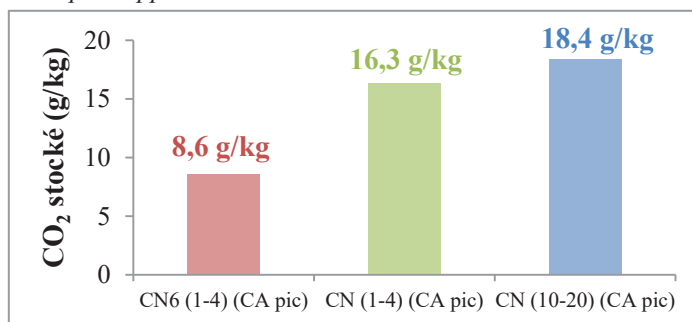
Figure 2. Résultats de la carbonatation accélérée des GBR CN (1-4)

L'optimum de teneur en eau est dans l'ordre de grandeur des valeurs de la bibliographie. Pour le maximum de fixation de CO₂, il est aussi dans la gamme de fixation du CO₂ de la littérature [FAN 17] [XUA 16]. Dans la bibliographie, il est démontré que les GBR de fractions fines ont une capacité plus importante de stockage de CO₂ lors de la carbonatation accélérée que les GBR de fraction plus grande [FAN 17] [ZHA 14] [XUA 16]. Lors de notre étude, il est montré que la capacité de fixation des deux fractions différentes est du même ordre de grandeur, mais il y a une légère baisse de stockage de CO₂ à hauteur de 2,1 g/kg pour les GBR CN (1-4). En effet, lors du concassage et du tamisage des GBR CN (10-20), une partie de l'ancienne pâte de ciment qui contient les hydrates nécessaires à la recarbonatation est éliminée.

De plus, on constate que le type de fraction utilisée a un effet sur l'optimum de teneur en eau. En effet, il y a un décalage de la teneur en eau optimale entre les GBR CN (10-20) et les GBR CN (1-4), respectivement de 3,8 à 5,2%. Ce décalage peut être interprété par la fraction de pâte de ciment présente dans les deux types de fraction de GBR. Les GBR CN (1-4) sont une fraction qui contient une pâte de ciment avec un fort coefficient d'absorption d'eau, ils sont donc plus demandeurs en eau pour une carbonatation accélérée efficace. Afin de confirmer cet effet, il sera nécessaire d'étudier le pourcentage de pâte de ciment des GBR par rapport à la teneur en eau.

3.1.3. Effet de la carbonatation naturelle sur la carbonatation accélérée

Comme démontré dans la bibliographie et dans le paragraphe 3.1.1., la carbonatation naturelle a un effet sur la carbonatation accélérée (figure 3). Pour les GBR CN6 (1-4) (CA pic), le taux de stockage du CO₂ atteint une valeur de 8,6 g/kg. Les GBR CN (1-4) (CA pic) stockent jusqu'à 16,3 g/kg de CO₂ soit pratiquement le double. Pour finir, les GBR CN (10-20) (CA pic) captent 18,4 g/kg de CO₂.

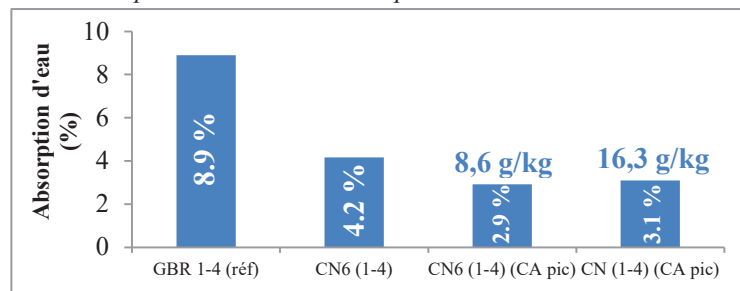
Figure 3. Taux de CO₂ stocké par rapport à l'état de carbonatation des GBR

L'étude démontre que le taux de stockage du CO₂ est bien relié à l'état de carbonatation naturelle des GBR. En effet, pour les GBR CN6 (1-4) par leur carbonatation naturelle pendant 6 ans, le taux de stockage est le moins élevé des 3 GBR. Les GBR CN (1-4) à cause de la perte de pâte de ciment due au concassage et au tamisage, leur taux de stockage est inférieur à celui des GBR CN (10-20), mais est plus élevé par la carbonatation naturelle de surface des GBR CN (10-20) dont ils sont issus. Pour finir, les GBR CN (10-20) ont le taux de stockage le plus grand à hauteur de 18,4 g/kg car les GBR sont carbonatés naturellement en surface et possèdent donc un taux d'hydrates suffisants pour se recarbonater. La carbonatation naturelle influe sur la recarbonatation par l'effet du concassage et du stockage des GBR issus de plateformes de recyclage, les GBR viennent à être carbonatés naturellement, surtout sur des GBR de petites fractions [XUA 16]. Les GBR CN6 (1-4) se carbonatent naturellement plus facilement et plus rapidement que les GBR de plus grosse fraction CN (10-20). La carbonatation naturelle influe donc sur la fixation du CO₂.

3.2. Effet de la carbonatation sur le coefficient d'absorption d'eau

La figure 4 présente l'effet de la carbonatation sur le coefficient d'absorption d'eau (figure 4).

Figure 4. Résultats de l'absorption d'eau des 3 GBR après carbonatation



La première valeur d'absorption de 8,9% correspond aux GBR 1-4 mm de référence (tableau 1). Pour les GBR CN6 (1-4), la diminution du coefficient d'absorption d'eau est de 53%. Après carbonatation accélérée, les GBR CN6 (1-4) (CA pic) ont une perte d'absorption de 67% par rapport à la référence. Pour finir, pour les GBR CN (1-4) (CA pic), l'effet de la carbonatation permet une baisse d'absorption d'eau de 65%. La carbonatation naturelle a un premier effet sur le coefficient d'absorption d'eau, on constate que la carbonatation naturelle avec un stockage pendant 6 ans réduit le coefficient d'absorption de 50% environ. Dans un second temps, la carbonatation naturelle a un effet sur la carbonatation accélérée et sur le coefficient d'absorption d'eau. En effet, le stockage de 8,6 g/kg, correspondant à la carbonatation accélérée des GBR CN6 (1-4) carbonatés naturellement, influe sur une baisse d'absorption uniquement de 31%. On constate que les GBR CN (1-4) (CA pic) peu carbonatés naturellement ont une baisse d'absorption d'eau sensiblement égal après carbonatation accélérée aux GBR CN6 (1-4) (CA pic) carbonatés naturellement, avec un taux de fixation doublé. Il est possible de conclure que la carbonatation accélérée impacte le coefficient d'absorption d'eau de la même manière qu'un échantillon recarbonaté après carbonatation naturelle. La carbonatation naturelle et accélérée ont un effet important sur l'absorption d'eau et la carbonatation accélérée a une capacité de diminution similaire à la carbonatation naturelle.

4. Conclusions

- L'effet de la fraction sur l'optimum de teneur en eau : la fraction granulaire a un effet sur l'optimum de teneur en eau, pour les GBR CN (10-20), l'optimum est à 3,8% et sur des GBR CN (1-4), il se situe à 5,2%. C'est la quantité de pâte de ciment variable, qui est responsable du décalage de la teneur en eau.
- L'effet de la carbonatation naturelle sur la carbonatation accélérée : les GBR stockés pendant 6 ans après concassage et subissant une carbonatation naturelle, se carbonatent moins facilement de manière accélérée et impactent le taux de fixation du CO₂.
- L'effet de la carbonatation sur la baisse du coefficient d'absorption d'eau : la carbonatation naturelle et accélérée ont un effet sur la baisse du coefficient d'absorption d'eau, la carbonatation naturelle opérant en premier lieu après concassage et stockage des GBR

5. Bibliographie

[DEL 18] DE LARRARD F., COLINA H. (DIR.), *Le béton recyclé*, Marne la Vallée : IFSTTAR, 2018, Ouvrages scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.

[FAN 17] FANG X., XUAN D., POON C.S., « Empirical modelling of CO₂ uptake by recycled concrete aggregates under accelerated carbonation conditions », *Materials and Structures*, vol. 50, n°4, 2017, p. 1-13.

[SER 18] SERENG M., DJERBI A., OMIKINE METALSSI O., DANGLA P., TORRENTI J.-M., « Effect of water contents of recycled concrete aggregates on carbonation kinetic », *Fib Symposium – Performance- based approaches for concrete structures*, Cape Town, Afrique du Sud, 2016, p. 1-10.

[XUA 16] XUAN D., ZHAN B., POON C.S., « Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates », *Cement and Concrete Composites*, vol. 65, 2016, p. 67-74.

[YAC 18] YACOB A., DJERBI A., FEN-CHONG T., « Water absorption in recycled sand : new experimental methods to estimate the water saturation degree and kinetic filling during mortar mixing », *Construction and Building Materials*, vol. 158, 2018, p. 464-471.

[ZHA 14] ZHAN B., POON C.S., LIU Q., KOU S.C., SHI C., « Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycle aggregate properties », *Construction and Building Materials*, vol. 67, 2014, p. 3-7.