

Plateforme de recyclage de déchets inertes du BTP : un puits de carbone « gris » ?

Yunlu Hou¹, Pierre-Yves Mahieux¹, Philippe Turcry¹, Jérôme Lux¹, Abdelkarim Aït-Mokhtar¹, Aurélia Nicolai²

¹ LaSIE, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement, UMR 7356 CNRS, La Rochelle Université, La Rochelle

² Spie batignolles malet, Pôle développement, Portet-sur-Garonne

RESUMÉ Dans un environnement urbain, les pièges à carbone naturels et artificiels peuvent être des leviers intéressants pour tendre vers la neutralité carbone d'un territoire. Cette étude s'intéresse au potentiel de piégeage de CO₂ d'un stock de granulats recyclés, fabriqués sur une plateforme de recyclage à partir de déchets inertes du BTP, entre deux campagnes de concassage. Grâce au développement d'une cellule de carbonatation naturelle et d'une cellule de diffusion de O₂ en laboratoire, la quantité de CO₂ piégé par un stock de 2000 m³ pendant 4 mois est estimée à plus de 630 kg, soit 0,2 kg de CO₂/t de GR en stock. Cette faible valeur montre que même si le potentiel de piégeage de CO₂ à l'échelle du grain est estimé à 23 kgCO₂/t de GR, la capacité réelle d'un stock de GR à en piéger en condition atmosphérique est très dépendante du processus de fabrication, du stockage sur plateforme et des conditions météorologiques.

Mots-clés : Neutralité carbone, piégeage du CO₂, carbonatation naturelle, granulats recyclés

I. INTRODUCTION

Lauréate de l'appel à projets « territoires d'innovation » en 2019, la Communauté d'Agglomération (CDA) de La Rochelle s'est lancée le défi de devenir le 1^{er} territoire urbain du littoral neutre en carbone d'ici 2040. Pour y parvenir, les objectifs ne se focalisent pas uniquement sur la réduction des émissions de carbone mais aussi sur son piégeage. Si la CDA de La Rochelle peut compter sur ses capacités naturelles de séquestration en carbone grâce à l'océan Atlantique et les marais littoraux, il est aussi nécessaire de développer des pièges artificiels voire d'en identifier sur le territoire. C'est dans ce cas précis que le projet Nouvelle Aquitaine intitulé « Carbone Gris », piloté par le LaSIE et Spie batignolles malet, s'inscrit puisqu'il s'agit d'évaluer le puits de carbone potentiel que constituent les déchets inertes du BTP, et notamment le béton de déconstruction, réceptionnés et concassés sous la forme de granulats recyclés sur une plateforme de recyclage rochelaise « Valosphère » (FIGURE 1).



FIGURE 1. Fabrication (a) et stockage (b) des GR sur la plateforme de recyclage Valosphère

Si le béton est un matériau de construction consommateur de ressources naturelles et fortement émetteur de CO_2 , c'est aussi un matériau capable d'en piéger par carbonatation atmosphérique pendant la durée de vie des ouvrages pour lesquels il a été fabriqué ainsi qu'après déconstruction et transformation sous la forme de granulats recyclés (GR). L'objectif de cette étude de cas est d'estimer la quantité de CO_2 (m_{CO_2} en kg ; FIGURE 2) que peut piéger un stock de 2000 m^3 de GR entre deux campagnes de concassage à 4 mois d'intervalle. La démarche repose sur deux investigations en laboratoire, d'une part, la détermination du potentiel de piégeage de CO_2 (Q_{CO_2} en kg/m^3) à l'échelle du grain de GR, d'autre part, la détermination de la diffusivité du CO_2 (D_{CO_2} en m^2/s) dans le milieu granulaire que constitue le stock de matériaux étudié (Hou et al., 2021).

$$m_{CO_2} = S \times X_c \times Q_{CO_2} \quad (1)$$

Surface de stockage (m^2) Potentiel de piégeage de CO_2 (kg/m^3)

Profondeur de carbonatation (m) = $\sqrt{\frac{2D_{CO_2}[CO_2]}{Q_{CO_2}} \times t}$ D_{CO_2} : Coefficient de diffusion effectif du CO_2 (m^2/s)
 $[CO_2]$: concentration en CO_2 dans air ambiant (kg/m^3)

FIGURE 2. Quantité de CO_2 piégé (m_{CO_2}) d'un stock de 2000 m^3 de GR sur une période de 4 mois

II. MATERIAUX ET MÉTHODES

A. Potentiel de piégeage de CO_2

Le potentiel de piégeage de CO_2 (Q_{CO_2}) est estimé selon la méthode développée par (Boumaaza et al., 2020). Un échantillon de GR est placé en fine couche d'épaisseur égale au D_{max} du granulat étudié sur une coupelle de 20 cm de diamètre (Fig. 3a). L'échantillon est placé en carbonatation naturelle en extérieur mais néanmoins à l'abri de la pluie, à température et HR variables selon les conditions météorologiques. Ponctuellement, la coupelle est placée dans une cellule équipée d'une sonde mesurant la baisse de concentration en CO_2 , significative de la carbonatation, pendant moins de 20 min (Fig. 3b).

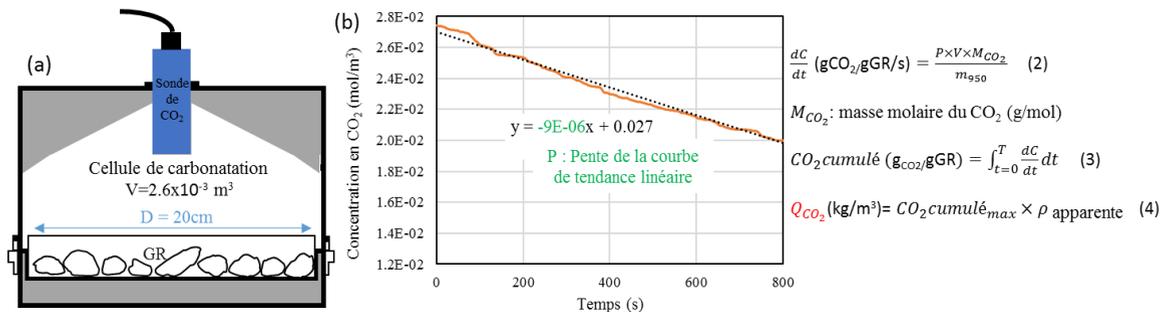


FIGURE 3. (a) Schéma de la cellule de carbonatation naturelle ; (b) Exemple de variation de la concentration en CO_2 (mol/m^3) en fonction du temps (s).

La vitesse de carbonatation est définie comme étant la quantité massique de CO_2 piégé (g_{CO_2}) rapportée à la masse m_{950} (g_{GR}) de GR déshydraté et décarbonaté, mesuré par analyse thermogravimétrique à $950^\circ C$, en un temps donné (s) (équation 2). À partir de l'évolution dans le temps de la vitesse, il est possible de calculer la quantité de CO_2 piégé cumulé (g_{CO_2}/kg_{GR}) par intégration de la vitesse de carbonatation entre $t=0$ et chaque échéance T de mesure (équation 3). Enfin, le potentiel de piégeage de CO_2 est défini comme étant la quantité maximale de CO_2 piégé sur les 4 mois d'analyse rapporté en kg/m^3 apparent de GR sur stock.

B. Diffusivité effective du CO₂

Le coefficient de diffusion effectif du CO₂ (m²/s) des GR est déterminé, à l'échelle d'un milieu granulaire, avec le dispositif présenté par la Fig. 4a. Pour éviter toute carbonatation pendant l'essai, le dioxygène est préféré au CO₂ pour la mesure de diffusivité. La diffusivité du CO₂ est donc déduite de celle mesurée sous O₂.

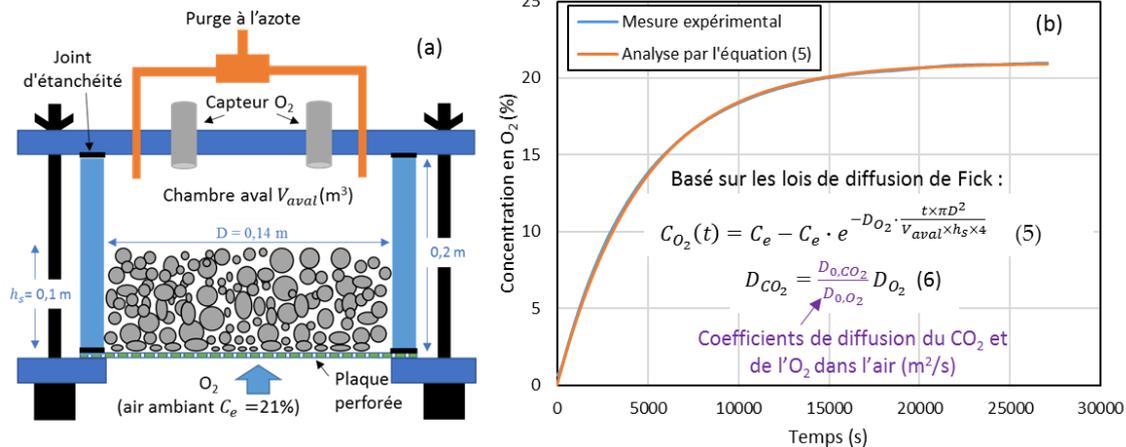


FIGURE 4. (a) Cellule de diffusion gazeuse pour matériaux granulaires ; (b) Comparaison entre les évolutions des concentrations dans la chambre aval, mesurées et calculées

L'échantillon repose sur une plaque perforée en bas de la cellule. Une fois installé, il est donc en contact avec l'air ambiant ou la concentration moyenne C_e en O₂ est de 21%. La chambre aval est préalablement purgée à l'azote jusqu'à ce que la concentration en O₂, mesurée par deux capteurs, soit proche de 0%. La chambre aval est alors fermée. Le dioxygène de l'air diffuse à travers l'échantillon grâce au gradient de concentration entre l'air ambiant et la chambre aval. Les capteurs mesurent l'évolution de la concentration en O₂ jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Le coefficient de diffusion effectif de O₂ est déterminé par minimisation des écarts entre les mesures dans la chambre aval et la 1^{ère} loi de Fick (Fig. 4b, équation 5). Enfin, le coefficient de diffusion effectif du CO₂ (m²/s) est déduit du coefficient effectif de l'O₂ et des coefficients de diffusion du CO₂ et de l'O₂ dans l'air (équation 6).

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pour cette étude, un GR 0/40 a été prélevé sur la plateforme, échantillonné puis criblé en laboratoire pour ne retenir que la fraction 0/20. Ce GR a été conservé avant analyse dans une chambre humide pour empêcher toute pré-carbonatation. Pour le milieu granulaire, la compacité est fixée à 65% à partir d'un essai œdométrique préalable et la teneur en eau retenue est de 10%. Cette teneur en eau est une moyenne mesurée sur le GR 0/40 prélevé sur 30 cm de profondeur dans le stock. La figure 5 présente l'évolution de la vitesse de carbonatation en fonction du temps (moyennes pondérées des analyses effectuées sur les fractions 0/6, 6/10 et 10/20) et de la quantité cumulée de CO₂ piégé. Le tableau 1 présente la démarche calculatoire pour déterminer la quantité de CO₂ piégé par le stock de 2000 m³ en 4 mois.

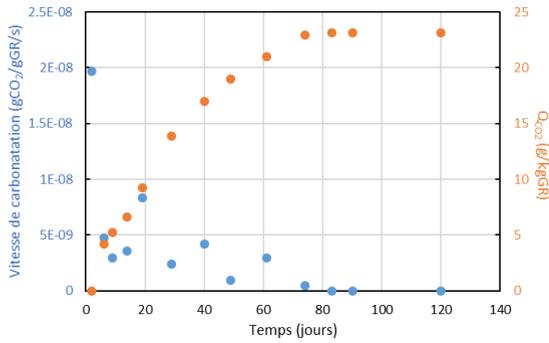


FIGURE 5. Vitesse de carbonatation et quantité cumulée de CO₂ piégé par les grains de GR exprimées en fonction du temps

Surface (m ²)	600
Quantité de CO ₂ cumulé maximale (g/kg)	22,5
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1530
Potentiel de piégeage de CO ₂ Q_{CO_2} (kg/m ³)	34,4
Coefficient de diffusion du CO ₂ D_{CO_2} (m ² /s)	1,88x10 ⁻⁶
Concentration en CO ₂ (450ppm) $[CO_2]$ (kg/m ³)	8,22x10 ⁻⁴
Front de carbonatation sur 4 mois X_c (m)	0,03
Quantité de CO ₂ piégé sur 4 mois m_{CO_2} (kg)	630

TABLEAU 1. Estimation de la quantité de CO₂ piégé par un stock de 2000 m³ de GR sur 4 mois

La vitesse de carbonatation initiale est de $3,3 \cdot 10^{-8}$ gCO₂/gGR/s, elle chute très rapidement dès les 1ers jours d'exposition et tend à s'annuler au-delà de 80 jours. Les GR sèchent rapidement au contact de l'air libre puisque la teneur en eau passe de 13% initialement à environ 2% réduisant ainsi la quantité d'eau disponible pour la carbonatation. De ces vitesses sont calculées les quantités massiques de CO₂ piégé en cumulé et l'on observe que la quantité maximale atteinte est de 22,5 gCO₂/kgGR soit 34,4 kgCO₂/m³ de GR considérant une masse volumique apparente du stock de 1530 kg/m³. Ce résultat est du même ordre de grandeur que celui déterminé par (Hou et al., 2021) sur des échantillons de sables recyclés compactés totalement carbonatés. On peut donc aussi considérer que malgré la réduction de la teneur en eau, les produits carbonatables disponibles dans les GR se sont totalement carbonatés. Il est donc intéressant de noter que les réactions de carbonatation naturelle à l'échelle du grain se font en moins de 3 mois, ce qui est très positif vis-à-vis des contraintes d'exploitation sur plateforme. Dans un milieu granulaire que constitue le stock, le coefficient de diffusion moyen est de $1,88 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Cette diffusivité est faible mais non nulle et reste très dépendante des conditions de compacité et de teneur en eau. A partir de ces deux résultats (vitesse et diffusivité) et considérant que la concentration atmosphérique en CO₂ est de $8,22 \cdot 10^{-4}$ kg/m³ (soit 450 ppm), le front de carbonatation dans le stock de GR (équation 1) est estimé à 3 cm au terme des 4 mois. Le volume de GR carbonaté est donc de 18,3 m³ soit 0,92% du stock. Cette valeur est très faible par rapport au potentiel de piégeage des grains de GR. Si l'on considère que la compacité et la teneur en eau du stock est constante sur son intégralité, il faudrait alors un temps infini pour carbonater l'intégralité du matériau en place. Au final, la quantité estimée de CO₂ piégé par le stock est de 630 kg à 4 mois soit environ 15% du CO₂ émis pour sa fabrication si l'on considère que 1,5kg eq.CO₂ est émis par tonne de GR fabriqué (UNPG). Si les GR constituent un puits de carbone certain, il reste important d'optimiser le process industriel pour le rendre significatif et participer ainsi à l'objectif de neutralité carbone visée par le territoire.

REFERENCES

- Boumaaza, M., Huet, B., Turcry, P., Aït-Mokhtar, A., 2020. The CO₂-binding capacity of synthetic anhydrous and hydrates: Validation of a test method based on the instantaneous reaction rate. *Cem. Concr. Res.* 135, 106113.
- Hou, Y., Mahieux, P.-Y., Lux, J., Turcry, P., Aït-Mokhtar, A., 2021. Carbonation rate of compacted recycled aggregates for sub-base layers of pavement. *Constr. Build. Mater.* 312, 125420.