

Impact de la biocarbonatation multicouche sur l'absorption d'eau d'un mortier

Marielle Guéguen Minerbe ¹, Heriberto Martinez Hernandez ¹, Issam Nour¹, Yoan Pechaud², Thierry Sedran³

¹ Univ Gustave Eiffel, MAST-CPDM, F-77454 Marne - la- Vallée, France

² Univ Gustave Eiffel, LGE, F-77454 Marne - la- Vallée, France

³ Univ Gustave Eiffel, MAST-MIT, F-44344 Bouguenais, France

RESUME

L'application de la biocarbonatation aux granulats de béton a pour but de réduire leur porosité à l'eau, qui représente un frein à leur recyclage dans les bétons, notamment pour les sables. Plus précisément, il s'agit de réduire la porosité de leur mortier résiduel en précipitant des CaCO_3 dans les pores et les microfissures en formant une gangue de CaCO_3 tout autour du granulat.

Cette étude s'attache dans un premier temps à définir un traitement multicouche pour produire des CaCO_3 sur gélose. Une fois ce traitement établi, il est appliqué sur des disques de mortiers afin de faciliter la mise en œuvre du traitement. Une fois les deux couches de CaCO_3 formées, le taux d'absorption en eau a diminué de 3,7%.

Mots-clefs Biocarbonatation, bactéries, mortiers, GBR.

I. INTRODUCTION

Les granulats de béton recyclé (GBR) contiennent, de par leur origine, de la pâte de ciment résiduelle qui leur confère une forte porosité à l'eau et des résistances mécaniques faibles (Ghorbel et al., 2018 ; Sedran, 2018). Cette porosité conduit à une absorption d'eau forte généralement au-delà de 5% contre 1 à 2% pour les granulats naturels. C'est une difficulté importante sur le plan industriel car elle conditionne l'ajustement de l'eau dans les bétons qui permet de maîtriser leur ouvrabilité en production. Le processus de fabrication des GBR conduit à avoir plus de pâte dans les particules les plus fines et donc une absorption plus élevée dans les sables. En conséquence, si aujourd'hui le recyclage des gravillons de GBR ne pose pas de problème technique majeur et est facilitée par les recommandations du PN Recybéton (et dans la future annexe française de l'EN 206), l'industrie peine plus à recycler les sables de GBR, du fait de leur plus grande porosité. En conséquence, la porosité des sables de GBR est un frein au développement d'une économie circulaire du béton.

Dans ce contexte, différentes techniques chimiques, mécaniques et biotechnologiques ont été étudiées ou sont en cours d'expérimentation pour diminuer la porosité.

Parmi elles, la carbonatation naturelle, qui consiste en une fixation du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique par les ions calcium (Ca^{2+}) de la pâte des GBR, est l'une des plus attractives car elle permet d'améliorer les propriétés des GBR et de stocker du CO_2 . Cette réaction chimique permet la formation de carbonate de calcium (CaCO_3), minéral qui peut boucher les pores des granulats et ainsi diminuer leurs porosités. Malheureusement, ce processus est lent (de quelques mois à plusieurs années) et présente des problèmes logistiques pour le transport et le stockage de gravillons, générant ainsi des problèmes de rentabilité. C'est pourquoi des approches permettant de réaliser une carbonatation accélérée efficace et rentable sont développées.

Une façon d'accélérer la carbonatation naturelle consiste à exposer les granulats à des pressions entre 0 et 1.5 bar par rapport à la pression atmosphérique, et à des concentrations de 3% à 50% en dioxyde de carbone (CO_2) (Thiery et al., 2013 ; Li et al., 2020 ; Sereng, 2020). Cependant la mise en œuvre de cette solution est très coûteuse économiquement et présente des effets néfastes pour l'environnement. Afin d'explorer de nouvelles solutions pour améliorer la qualité des gravillons de façon rentable, efficace et efficiente, la présente étude propose d'étudier la « biocarbonatation » comme alternative. Ce procédé utilise des microorganismes pour précipiter du CaCO_3 . L'objectif est donc de traiter la surface des GBR pour former une gangue homogène de CaCO_3 autour des GBR afin de diminuer leur absorption en eau. Cette technologie est déjà utilisée pour la fabrication de bétons auto cicatrisants (Pappupreethi et al., 2017) et pour la restauration des monuments (Dhami et al., 2014). Elle pourrait offrir une alternative écologique aux traitements chimiques, thermiques et mécaniques, polluants et consommateurs d'énergie, déjà existants sur le marché.

Cette étude va dans un premier temps s'attacher à proposer une méthodologie pour produire des CaCO_3 à l'aide de bactéries sur une gélose. Dans un deuxième temps, la méthodologie développée sera appliquée sur des disques de mortier afin de déterminer si ce traitement permet bien de diminuer le taux d'absorption en eau d'un mortier. La méthodologie est développée sur mortier car il est plus aisé de traiter une surface plane et d'observer une formation de CaCO_3 que sur un granulats de béton recyclé. Nous nous focalisons sur le taux d'absorption car nous souhaitons améliorer cette propriété.

II. MATERIELS ET METHODES

A. Culture bactérienne

La souche bactérienne étudiée a été isolée d'un granulats de béton recyclé (et nommée par la suite A2-3). Pour cela, un granulats de béton recyclé a été placé dans 10 mL d'eau distillée puis vortexé afin de décrocher les cellules bactériennes présentes sur le GBR. 100 μL de la solution de rinçage ont étéensemencés sur une gélose nutritive (8 g.L⁻¹ et 15g. L⁻¹ d'agar) à pH 7. La gélose est incubée pendant 3 jours à 30°C.

Les colonies formées ont ensuite été cultivées séparément dans 7 ml de bouillon nutritif à pH 7 pendant 4 jours à 30°C. A l'issue de cette étape, 1 mL de suspension microbienne a été transféré dans 7 mL de bouillon nutritif à pH 8 et ainsi de suite jusqu'à atteindre un pH de 11. Une seule souche (A2-3) a été capable de se développer à ce pH fortement alcalin.

Cette souche s'est bien développée en milieu nutritif (Merck 1.05443.0500 constitué de 10g de Peptones, 1g d'extrait de bœuf, 2g d'extrait de levure et 5g de chlorure de sodium dans 1 Litre) et croît à 30°C. La culture de la souche A2-3 a été effectuée dans du bouillon nutritif (8 g. L⁻¹). Le pH du bouillon nutritif a été, dans un premier temps, ajusté à pH 11 avec du NaOH (5 M) puis le milieu a été autoclavé à 121 °C pendant 15 min. La souche a été ensuite repiquée au centième (0,5 mL d'une suspension bactérienne est ajoutée à 50 mL de bouillon nutritif) puis incubée à 30°C, sous agitation à 120 rpm, pendant 72 h.

La culture a également été réalisée sur milieu gélosé. Dans ce cas après ajustement du pH du bouillon nutritif, 15 g.L⁻¹ d'agar ont été ajoutés puis autoclavée à 121°C pendant 15 minutes. Le milieu de culture gélosé a ensuite été coulé dans des boîtes de Pétri de 13,5 cm de diamètre dans le cas des expériences menées pour tester la quantité de CaCO₃ formée par la souche A2-3. A noter que les géloses ont été utilisées plutôt que les suspensions car elles sont plus représentatives de la production surfacique que l'on veut étudier *in fine* sur des granulats.

B. Production des CaCO₃ sur gélose

Six géloses nutritives (Φ 13,5 cm) ont été inoculées avec 275 µL d'une suspension mère de A2-3 (2 x 10⁷ UFC·mL⁻¹). Ces géloses ont été incubées à 30°C pendant 24 h jusqu'au développement d'un biofilm. 12,5 mL d'acétate de calcium à 175 g L⁻¹ ont été répandus en surface du biofilm puis évaporés. Les géloses ont été ré-incubées pour 6 jours à 30°C. A la fin de ce premier cycle, 3 boîtes de Pétri ont été prélevées pour analyses. 275µL de suspension mère (2 x 10⁷ UFC·mL⁻¹) âgée de 3 jours ont été répartis sur la formation précédente. Au bout de 1 jour, 12,5 mL d'acétate de calcium à 175 g. L⁻¹ ont été de nouveau répandus à la surface. Les 3 boîtes sont ensuite de nouveau incubées 6 jours (Figure 1).

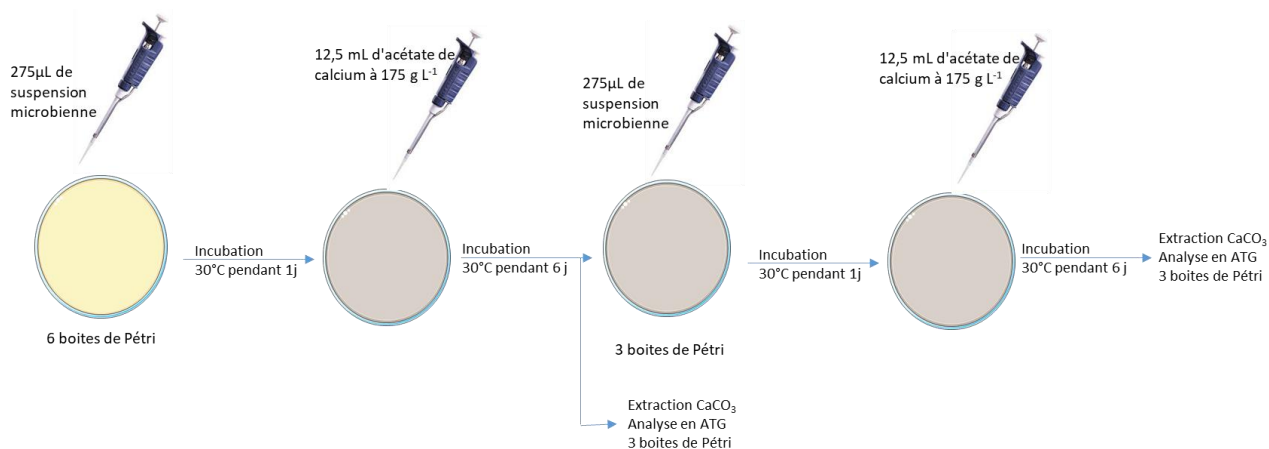


FIGURE 1. Protocole de production de CaCO₃ sur gélose

C. Extraction des CaCO₃ sur gélose

Après avoir subi 1 ou 2 cycles de production de CaCO₃, les géloses ont été grattées dans un premier temps à l'aide d'un scalpel afin de récupérer des cristaux bioprécipités ainsi qu'une partie de la biomasse et des résidus de gélose. La matière récupérée a été séchée à 40°C pendant 3 jours. Dans un second temps, la gélose grattée a été coupée en petits morceaux puis placée dans une

bouteille en pyrex contenant 100 mL d'eau distillée. L'ensemble a été autoclavé puis la suspension a été laissée à sédimenter pendant 1 jour à 85°C. Le fond de la bouteille a été centrifugé à 3000 g pendant 20 minutes. Après avoir enlevé le surnageant, le culot a été séché à 40°C pendant 3 jours.

Les matières séchées de la première et deuxième étapes ont été réunies pour déterminer par analyse thermogravimétrique la quantité de CaCO_3 néoformée (Figure 2).

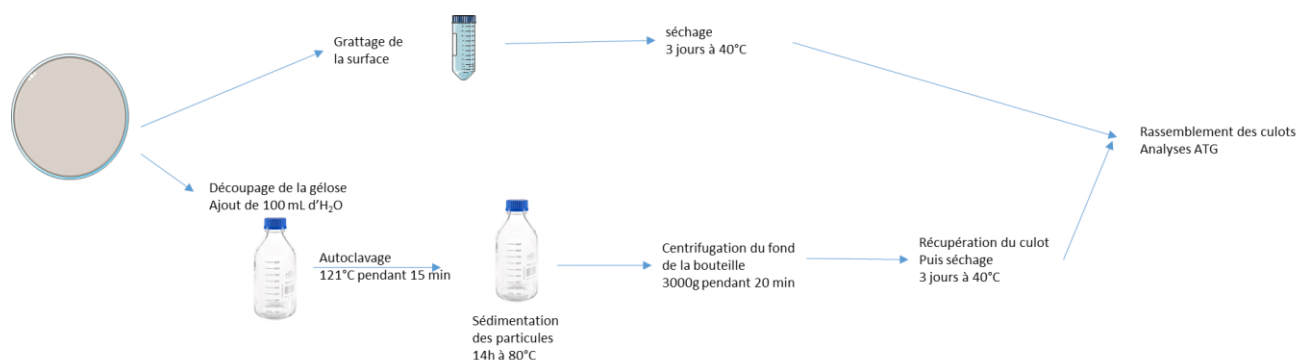


FIGURE 2. Protocole d'extraction des CaCO_3 sur gélose

D. Analyses thermogravimétrique

L'appareil utilisé pour l'essai est l'analyseur thermique Netzsh Sta 409^E s'étendant de 20°C à 1250°C (10°C. min⁻¹). L'analyse a été menée dans une chambre close dont l'atmosphère a été purgée avec de l'azote (flux de 80 mL.min⁻¹). Pour quantifier les CaCO_3 formés, il faut mesurer la perte de de masse entre 700°C et 990°C. Les analyses ont été réalisées sur une masse d'environ 30 mg.

E. Disques de mortier et taux d'absorption

Comme expliqué en introduction, des essais d'absorption ont été faits sur des granulats modèles représentés par des disques de mortier, pour faciliter les observations optiques. Des cylindres de mortiers de 6 cm de diamètre et de 14 cm de hauteur ont ainsi été fabriqués avec du ciment ordinaire Portland (CEM I) et du sable siliceux normalisé (EN 196-1). Le rapport massique eau sur ciment était de 0,5 et sable sur ciment de 3. Après 48h, les éprouvettes ont été démoulées puis immergées dans l'eau pendant 28 jours pour durcissement.

Les cylindres ont été séchés pendant 1 semaine à 60°C, puis ils ont été complètement résinés. Deux couches fines de résine epoxy (Epofix, Struers) ont été appliquées à 3 h d'intervalle à l'aide d'un pinceau. Les cylindres ainsi résinés ont été laissés à sécher pendant 2 jours, puis ont été sciés à l'eau pour former des disques. Les disques ont été ensuite mis dans une enceinte à 60°C pendant 1 jour et jusqu'à masse constante. La masse obtenue à ce stade est notée M1 (masse des mortiers

secs avec juste la tranche résinée). Ensuite, deux couches de résine ont été appliquées au pinceau sur l'une des surfaces du disque, de cette façon, les disques n'ont ainsi qu'une seule surface exposée sans résine. La résine sur les mortiers a été laissée à durcir à température ambiante pendant 2 jours. Les disques ont été alors séchés à 60°C pendant 3 jours, jusqu'à masse constante. Afin de s'assurer de la constance de la masse, les disques ont été pesés 5 fois à un intervalle de 1h. Selon la norme NF EN 1097-6, les valeurs ne doivent pas varier de plus de 0,1 g. La dernière valeur est notée M2 (masse des mortiers avec une face et la tranche résinées).

Après la période de cure, les éprouvettes ont été sciées (de 3 à 7mm de hauteur) puis résinées afin de ne traiter par bioprécipitation qu'une seule face. On déduit α la masse moyenne de résine ajoutée par unité de surface à l'aide de l'équation (Eq. 1). On obtient ainsi $\alpha=1,46 \cdot 10^{-4} \text{ g}\cdot\text{mm}^{-2}$.

$$\alpha = \text{moyenne}((M_2-M_1)/(\pi D^2/4)) \quad (\text{Eq.1})$$

Où ;

M₁ est la masse du mortier résiné sur la tranche (g)

M₂ est la masse du mortier résiné sur la tranche et sur une face (g)

H est la hauteur du disque

D est le diamètre du disque (60 mm)

α est la masse moyenne de résine ajoutée par unité de surface $\text{g}\cdot\text{mm}^{-2}$. Cette valeur a été

La masse sèche de chaque disque de mortier hors résine M_m en grammes est finalement calculée avec l'équation 2 obtenus avec la masse du mortier résiné sur la tranche précédemment mesurée (Ce calcul a été fait car pour des raisons pratiques il était difficile de résiner la tranche des disques après sciage et donc de mesurer directement la résine totale déposée sur la face et la tranche)

$$M_m = M_1 - \alpha \pi h D \quad (\text{Eq. 2})$$

Après avoir calculé la masse M_m des disques secs, ceux-ci ont été immergés dans l'eau. On vérifie que la surface de l'eau soit toujours environ à 1 cm de la surface des disques, car on veut une pression constante pour ne pas introduire de biais dans la mesure d'absorption d'eau. En effet, plus la pression est élevée, plus l'eau pénètre le matériau.

Après 2 jours, les mortiers ont été retirés de l'eau, puis à l'aide d'un chiffon, l'eau de la surface a été essuyée jusqu'à avoir une surface d'aspect mat. À ce moment-là on était en condition saturée surface sèche comme définie par analogie avec la norme NF EN 1097-6. Comme on le voit plus loin les disques utilisés sont considérés représentatifs de gravillons de diamètre de 8 à 12 mm. La norme prévoit un temps d'immersion de 24h. Par sécurité et pour assurer la saturation nous avons doublé ce temps, comme confirmé sur la figure 4. Les mortiers ont été immédiatement pesés, ce qui permet d'obtenir la masse M₃ du mortier en condition saturée surface sèche (g). L'absorption de l'eau est alors calculée avec l'équation (3).

$$\% \text{ Absorption d'eau} = (M_3-M_2)/M_n \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

La couche de résine a permis la formation d'une couche d'environ 100 μm sur l'ensemble de l'éprouvette.

E. Production des CaCO₃ sur disque de mortier

Avant l'ensemencement des bactéries, le taux d'absorption des disques de mortier a été déterminé. Ensuite les mortiers ont été immergés pendant 4h dans du bouillon nutritif puis 12 mL de suspension mère (9.1×10^6 UFC \cdot cm $^{-2}$) ont été inoculés. Les mortiers ont été incubés 7 jours dans un contenant à 100% d'humidité relative et à température ambiante. 2,1 mL de solution d'acétate de calcium à 175 g.L $^{-1}$ ont été ajoutés aux mortiers. Les mortiers ont été incubés 10 jours toujours à 100% d'humidité relative et à température ambiante. A la fin de ce premier cycle, 5 mortiers sont retirés pour analyser leur taux d'absorption. Les 5 autres mortiers sont ensuite de nouveau ensemencés avec 12 mL de suspension mère d'A2-3 (7.6×10^6 UFC \cdot cm $^{-2}$), après 7 jours, 2,1 mL de solution d'acétate de calcium à 175g.L $^{-1}$ sont de nouveau ajoutés. Les mortiers sont incubés dans les mêmes conditions que lors du premier cycle.

Afin de pouvoir mesurer le taux d'absorption une fois traité des échantillons, ces derniers ont été dans un premier temps brossés afin de retirer la matière non cohésive. Ils sont ensuite directement immergés pendant 2 jours dans l'eau puis la masse en condition saturée surface sèche (M3) est évaluée. A noter que M_n (la masse sèche) et M_2 (la masse sèche avec résine) sont évaluées avant le traitement lors de la détermination du taux d'absorption initial.

III. RESULTATS

A. Production de CaCO₃ sur gélose

La quantité d'acétate de calcium ajoutée sur chaque boîte de Pétri est de 12,5 mL à une concentration de 175 g.L $^{-1}$. En considérant qu'une mole de Ca $^{2+}$ provenant de l'acétate de calcium va pouvoir former 1 mole de CaCO₃, on peut donc en déduire que si les bactéries utilisent l'ensemble du calcium disponible, on peut retrouver une masse de 1,4 g de CaCO₃ après le cycle 1 de traitement et 2,8 g de CaCO₃ après le cycle 2. Si on s'intéresse aux résultats obtenus à l'issue du premier et du deuxième cycle (Figure 3), on peut noter que lors du premier cycle, les bactéries précipitent un peu plus de la moitié du CaCO₃ disponible dans le milieu. L'ajout d'un deuxième traitement permet d'augmenter la production de CaCO₃ de $0,8 \pm 0,05$ g par boîte (soit 57% du Ca $^{2+}$) à $1,40 \pm 0,07$ g (soit 50% du Ca $^{2+}$ disponible) soit une augmentation de 0,60 g en moyenne.

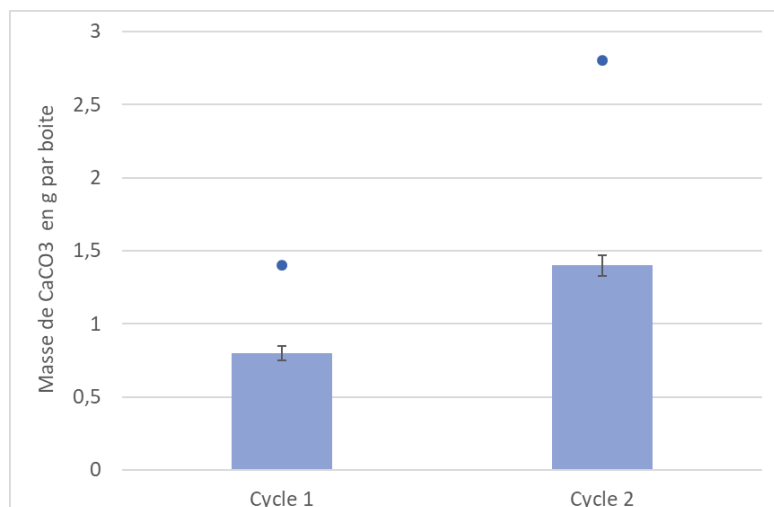


FIGURE 3. Masse de CaCO₃ (en g) formée par boîte au bout d'un et de deux cycles, les points représentent la valeur maximale formable. (écart-type calculé sur 3 échantillons)

La production de CaCO₃ est légèrement plus faible (0,8g contre 0,6g) lors de la seconde couche cependant le résultat obtenu permet de mettre en évidence qu'il est possible de réaliser un traitement en deux couches. La deuxième couche bien qu'ayant un accès limité à la gélose et donc aux nutriments permet une production non négligeable de CaCO₃. Ce double traitement va donc être appliqué sur les disques de mortiers.

B. Evolution du taux d'absorption par bioprécipitation

La quantité d'eau absorbée par les mortiers avant tout traitement est indiquée dans la figure 4. On peut noter que la quantité d'eau absorbée est proportionnelle à la hauteur des disques. Ainsi, le taux d'absorption en eau est de $6,3 \pm 0,3$ % quelle que soient la hauteur des disques de mortiers, confirmant qu'ils sont bien saturés en eau de façon homogène.

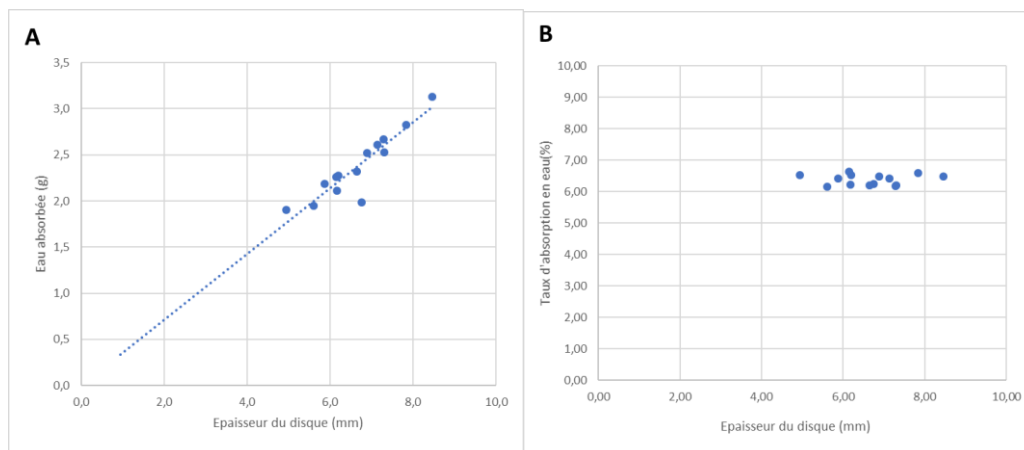


FIGURE 4. (A) Quantité d'eau absorbée en (g) en fonction de l'épaisseur du disque mm. (B) taux d'absorption en eau (%) en fonction de l'épaisseur du disque (mm), la valeur moyenne du taux d'absorption est de $6,3 \pm 0,3$ % .

Lors des manipulations réalisées pour tester l'efficacité de la bioprécipitation des CaCO_3 , des disques témoins ont été évalués, à savoir : un témoin avec uniquement ajout d'acétate de calcium (sans bactéries ; AC), un témoin avec le même ajout de bactéries mais sans acétate de calcium (BH), un témoin plongé dans du bouillon nutritif (BN) et un témoin sans aucun traitement (SR). Des témoins ont subi un cycle ou deux cycles de traitement. On peut noter (Figure 5) que le taux d'absorption en eau par les échantillons témoin avant et après traitement ne varient pas au-delà de la variabilité de la mesure quel que soit le protocole appliqué, permettant de mettre en évidence qu'en cas de diminution du taux d'absorption lors du traitement bouillon nutritif + bactéries + acétate de calcium, la diminution peut être attribuée uniquement à la bio précipitation des CaCO_3 par les bactéries.

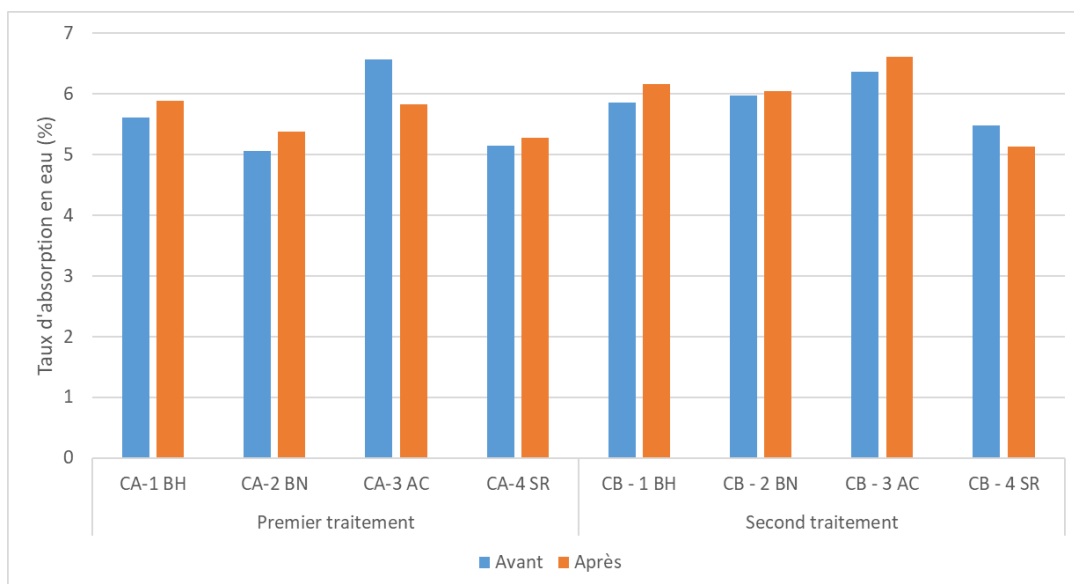


FIGURE 5. Taux d'absorption en % avant et après 1 cycle de traitement ou 2 cycles de traitement pour les échantillons témoin. BH : uniquement la souche bactérienne A2-3 ; BN : uniquement du Bouillon nutritif ; AC : acétate de calcium et SR : sans traitement.

Au bout du premier traitement bouillon nutritif + bactéries + acétate de calcium, le taux d'absorption en eau est resté inchangé passant de $5.9 \pm 0.3\%$ à $6.1 \pm 0.3\%$ (Figure 6). Ce résultat indique que la mise en place d'un simple traitement n'est pas suffisant pour diminuer l'absorption en eau. Au bout de deux traitements (bouillon nutritif + bactéries + acétate de calcium), la quantité en eau absorbée diminue de 1,2g passant d'un taux d'absorption de $5,4 \pm 0.3\%$ à $1,7 \pm 0.5\%$ (Figure 6).



FIGURE 6. Taux d'absorption (%) avant et après 1 cycle de traitement ou 2 cycles de traitement (Bacillus A2-3 puis acétate de calcium). La valeur pour les témoins est la moyenne des valeurs de la figure 3

IV. DISCUSSION

L'étude présente a permis de mettre en évidence la production de CaCO_3 par la souche A2-3 sans ajout d'urée. La voie métabolique à l'origine de la bio précipitation dans notre cas n'est pas clairement identifiée. Il ne s'agit pas de la voie de l'hydrolyse de l'urée qui est la voie la plus décrite dans la littérature, car notre souche est non uréolytique et nous n'avons fait aucun ajout d'urée. Par contre les étapes clés décrites à propos de la voie par hydrolyse restent sans doute valables, à savoir : (i) la fixation des cations divalents (Ca^{2+}) à la paroi bactérienne servant de site de nucléation ; (ii) une source de carbone et (iii) l'environnement ou le micro-environnement alcalin ($\text{pH} > 8$) permettant la prédominance de ions HCO_3^{2-} ou CO_3^{2-} par apport au ions H_2CO_3 . L'origine du carbone dans le cadre de nos essais peut provenir de la dégradation du milieu de culture riche en carbone, de la dégradation de l'acétate et également du CO_2 atmosphérique dissous. Des études complémentaires sont nécessaires pour déterminer l'origine de la source de carbone.

Les essais réalisés sur mortier ont permis au bout de 2 traitements de diminuer le taux d'absorption en eau de plus de 3,5% passant à d'un taux d'absorption en eau de $5,4 \pm 0,3 \%$ à $1,7 \pm 0,5 \%$.

Xu et al., (2014) ont traité des mortiers à base de CEM I et de sable local (e/c : 0,5 et s/c : 3) avec une couche de bactéries fortement concentrée (10^9 cellules. mL^{-1}) pendant 24h puis par immersion dans 100mL de milieu contenant une source de calcium (lactate ou glutamate de Calcium à $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$) pendant 14 jours. A l'issue de ce traitement, le taux d'absorption par capillarité a diminué de 50% passant d'environ $0,55 \text{ g cm}^{-2}$ à $0,3-0,2 \text{ g cm}^{-2}$ en fonction du contre ions (lactate ou glutamate) associé au calcium. Cette diminution est du même ordre de grandeur que celle que nous observons.

Ce résultat doit maintenant être appliqué sur des granulats de béton recyclés. En considérant que lors d'essais d'absorption, le granulat et le disque de mortier sont saturés jusqu'au coeur, un disque d'épaisseur h exposé sur une seule de ces faces, serait représentatif d'un granulat de diamètre $2h$. Avec les moyens à notre disposition au laboratoire, il était difficile de scier des disques avec une épaisseur inférieure à 4 mm. Une telle épaisseur est d'après ce qui précède représentative d'un granulat de 8 mm. Ceci est raisonnable pour une première évaluation du traitement que l'on souhaite *in fine* appliquer plutôt à des sables de béton recyclé. La principale difficulté au passage sur granulat sera l'homogénéité du traitement. Cependant dans la littérature différents auteurs ont pu mettre en évidence un impact du biotraitement sur les granulats de béton recyclés.

Wang et al., (2017) et Garcia-Gonzales et al., (2017) rapportent des baisses de l'absorption de l'ordre de 0,2% (en valeur absolue) pour des granulats de béton recyclé de granulométrie comprise entre 6,3 mm et 20 mm issus de chantier. Le taux d'absorption initial était de l'ordre de 5- 6 %. Le traitement effectué consistait à immerger les granulats dans une solution contenant des bactéries uréolytiques (*Bacillus sphaericus*) pendant 5 jours.

Grabiec et al., (2012) ont traité deux mortiers de laboratoire, concassés en deux fractions 6mm/8mm et 12mm/16mm avec un rapport E/C de 0,45 pour le premier et 0.70 pour le second. Le traitement se fait par immersion pendant 6 jours, avec un autre type de bactéries uréolitiques (*Sporosarcina pasteurii*). Ils constatent également une baisse du taux d'absorption. Pour les

granulats fabriqués avec un mortier avec un E/C de 0,45, le taux d'absorption baisse de 0,8% et 0,5% (pour un taux d'absorption initial de 5,5% et 3,6%), et avec un E/C de 0,70 le taux d'absorption diminue de 1,1% et 0,5% pour la fraction la plus fine et la plus grossière respectivement (pour un taux d'absorption initial de 5,2% et 3,2%).

Avec un traitement par immersion avec des bactéries non uréolytiques (*Bacillus pseudofirmus*) pendant 21 jours, Wu et al. (2018) obtiennent sur des granulats de béton recyclé (GBR) séparés en 3 fractions (0mm-5mm, 5mm-10mm et 10mm-20mm) des réductions d'absorption d'eau de 1,4%, 1,2% et 0,7% respectivement en valeur absolue pour des valeurs initiales en taux d'absorption compris entre 9 et 5%. Dans une étude plus récente (2020), les mêmes auteurs obtiennent sur un sable (<5mm) issu de concassage de mortier, des réductions de 2,9% et 3,6% en valeur absolue pour un traitement par immersion et par aspersion respectivement. Dans le cas de cette deuxième étude, les bactéries utilisées sont non uréolytiques (Bacille H4). Le traitement s'effectue également pendant 21 jours. Ce résultat est le plus important relevé dans la littérature mais il faut noter que l'absorption initiale des GBR non traités était particulièrement élevée (12,7%). Il est probablement plus facile d'améliorer un granulats à forte absorption qu'un granulats présentant déjà une absorption modérée.

Ces résultats semblent confirmer qu'en général, les bactéries non uréolytiques capables de précipiter le CaCO_3 (principalement de la calcite) ont de meilleurs rendements de production que les bactéries uréolytiques, même si dans les exemples cités le temps de traitement semble être un paramètre opératoire important.

V. CONCLUSION

En conclusion, nos résultats semblent très encourageants car nous avons observé une chute maximale de 3,7% de l'absorption (pour une absorption initiale de 5,4%) sur des disques de mortier de hauteur comprise entre 4 et 6 mm, qui sont supposés avoir une absorption d'eau représentative de granulats de 8 à 12 mm de diamètre. La performance semble d'autant plus intéressante que l'on est parti d'une valeur d'absorption d'eau initiale modérée de 5.5 % et que d'après la littérature on pourrait s'attendre à une efficacité supérieure sur sable.

REMERCIEMENTS

Les recherches et les résultats présentés dans ce document sont soutenus par le ministère de la Transition Ecologique et Solidaire dans le cadre du programme de recherche FastCarb.

REFERENCES

- M. Ali M., M.S. Abdullah, and S.A. Saad., "Effect of Calcium Carbonate Replacement on Workability and Mechanical Strength of Portland Cement Concrete," *Adv. Mater. Res.*, vol. 1115, pp. 137–141, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1115.137
- N. K. Dhama, M. Sudhakara Reddy, and A. Mukherjee, "Application of calcifying bacteria for remediation of stones and cultural heritages," *Front. Microbiol.*, vol. 5, no. JUN, 2014, doi: 10.3389/fmicb.2014.00304.

J. García-González et al., "Quality improvement of mixed and ceramic recycled aggregates by biodeposition of calcium carbonate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 1015–1023, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.039

E. Ghorbel, T. Sedran, G. Wardeh, Chapitre 10 :Propriétés mécaniques instantanées. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), *Le béton recyclé*. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4, pp 211-240.

A. M. Grabiec, J. Klama, D. Zawal, and D. Krupa, "Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition," *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, pp. 145–150, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.027.

J. Hartsock, "Bacteria-Infused Self-Healing Concrete," *Heron*, vol. 56, no. 1, pp. 1–12, 2011.

Y. li, T. Fu, R. Wang, R. Li, « An assessment of microcracks in the interfacial transition zone of recycled concrete aggregates cured by CO₂ », *Construction and Building Materials*, 236, 2020, 117543, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117543>

M. Medevielle, "Utilisation de la bioprécipitation de carbonates de calcium pour améliorer la qualité de granulats de béton recyclé" , Ph.D. dissertation, MAST, École centrale de Nantes, 2017.

H. Martinez-Hernandez, "Amélioration de granulats de béton recyclé par bioprécipitation", thèse de doctorat de l'École centrale de Nantes, 2022.

K. Pappureethi, R. Ammakunnoth, and P. Magudeaswaran, "Bacterial concrete: A review," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 588–594, 2017, doi: IJCIET_08_02_061.

C. Rodriguez Navarro, M. Rodriguez Gallego, K. Chekroun, and M.T. Gonzalez Muñoz, "Conservation of ornamental stone by *Myxococcus xanthus*-induced carbonate Appl Environ Microbiol 2003 Apr;69(4):2182-93 doi: 10.1128/AEM.69.4.2182-2193.2003.

T. Sedran, Chapitre 15 :Adaptation des méthodes de formulation au béton de granulats recycles. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), *Le béton recyclé*. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4, pp 359-378.

M. Sereng, "Amélioration des propriétés des granulats recyclés par stockage de CO₂ : étude de la faisabilité pré-industrielle, Ph.D. dissertation, MAST," Université Paris-Est, 2020

M. Thiery, P. Dangla, P. Belin, G. Habert, N. Roussel, 2013, Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: A laboratory study on model materials. *Cement and Concrete Research*, 46, p50-65, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.01.005>

J. Wang, J., Y.C. Ersan, N. Boon, and N. De Belie, "Application of microorganisms in concrete: a promising sustainable strategy to improve concrete durability," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 100, no. 7, pp. 2993–3007, 2016, doi: 10.1007/s00253-016-7370-6.

J. Wang, B. Vandevyvere, S. Vanhessche, J. Schoon, N. Boon, and N. De Belie, "Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates," *J. Clean. Prod.*, vol. 156, pp. 355–366, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.051

C. R. Wu, Y. G. Zhu, X. T. Zhang, and S. C. Kou, "Improving the properties of recycled concrete aggregate with bio-deposition approach," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 94, pp. 248–254, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.09.012

C. R. Wu, Z. Q. Hong, J. L. Zhang, and S. C. Kou, "Pore size distribution and ITZ performance of mortars prepared with different bio-deposition approaches for the treatment of recycled concrete aggregate," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 111, no. April, p. 103631, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103631.

J. Xu, W. Yoa and Z. Jiang, "Non-Ureolytic Bacterial carbonate precipitation as a surface treatment strategy on cementitious materials". *J. Mater. Civ. Eng* 2014.26:983-991.