

Piégeage du CO₂ par carbonatation de granulats recyclés : étude expérimentale de la répartition spatiale des carbonates formés sur granulats « modèles »

Farah KADDAH¹, Jérôme LUX², Philippe TURCRY², Ouali AMIRI¹, Emmanuel ROZIERE¹, Harifidy RANAIVOMANANA¹, Abdelkarim AIT-MOKHTAR²

¹ GeM, UMR CNRS 6183, Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes,

² LaSIE, UMR 7356 CNRS, La Rochelle Université

RESUME La carbonatation accélérée des granulats recyclés (GR) est une des voies envisagées pour réduire l'empreinte carbone de la construction. Après concassage, les GR peuvent servir à piéger le CO₂ soumis à des gaz industriels. Pour maîtriser de tels procédés, des études sont en cours pour comprendre le phénomène à l'échelle du granulat. Sont présentés ici les résultats d'une campagne expérimentale sur des GR « modèles », billes de pâte de ciment de 15 et 20 mm de diamètre, testées en cours de carbonatation avec des techniques originales, la micro-indentation et la micro-tomographie. Les grains ont été carbonatés à 20°C, 65% HR et 3% de CO₂, après un étuvage à 40°C suivi d'une conservation à 20°C et 55% HR. Les deux techniques de cartographie de l'intérieur des grains s'accordent sur le fait que la carbonatation est uniforme. Pour ce protocole expérimental, et ces tailles de grain, le transfert réactif du CO₂ est donc contrôlé principalement par les cinétiques des réactions chimiques et non la diffusion gazeuse. Les analyses thermogravimétriques montrent que le taux de carbonatation est inférieur à 50% après 20 jours à 3% de CO₂, ce qui confirme la difficulté de reminéraliser tout le CO₂ géogénique émis lors de production du clinker avec ce type de procédé de « carbonatation sèche ».

Mots-clefs Piégeage du CO₂, Carbonatation, Granulats recyclés, Micro-tomographie, Micro-indentation

I. INTRODUCTION

La carbonatation des granulats recyclés (GR) obtenus par concassage de déchets de déconstruction est une des voies envisagées pour réduire l'empreinte carbone de la construction en béton (Habert et al., 2020). A l'échelle du tas des GR stockés sur la plateforme de concassage, le piégeage du CO₂ peut se faire en conditions atmosphériques pendant quelques semaines avant utilisation. Cependant, plusieurs études montrent que la carbonatation dite naturelle d'un stock de GR est lente (Leemann et al., 2023) voire superficielle (Hou et al., 2022). Pour traiter plus efficacement les GR, des procédés accélérés ont été proposés pendant le Projet National Fastcarb (Torrenti, 2022). Placés dans des réacteurs tournants ou à lit fluidisé, les GR sont soumis pendant de 1 à 3 heures à des gaz industriels à forte concentration de CO₂, ce qui accélère le transfert gazeux et augmente significativement la fixation du CO₂ (Izoret et al., 2022). Pour un granulat de béton recyclé, la

quantité de CO₂ fixé ainsi est d’au moins 10 kg par tonne, soit au moins 10% des émissions de CO₂ liées à la production d’une tonne de béton. L’étude des impacts environnementaux de ces procédés montre néanmoins que le retour sur investissement est fortement dépendant de la distance de transport des GR jusqu’au site de traitement (Guyard et al., 2022). La viabilité d’une telle approche dépend donc de son efficacité réelle, c’est-à-dire de la quantité de CO₂ piégée par unité de matière carbonatée. Pour maximiser celle-ci, des études en laboratoire sont nécessaires afin d’identifier les paramètres-clés et comprendre le phénomène de transfert réactif à l’échelle d’un grain centimétrique.

Dans cet objectif, l’étude présentée ici s’intéresse à des granulats « modèles » soumis en laboratoire à une carbonatation accélérée. Les expérimentations ont été effectuées sur des sphères de pâte de ciment de différents diamètres, 15 et 20 mm, qui ont été caractérisées après différentes durées en réacteur à l’aide des techniques originales, la micro-indentation et la micro-tomographie, encore peu utilisées pour l’étude de la carbonatation (Cui et al., 2020 ; Kaddah, 2022). Leur intérêt est de cartographier l’intérieur des grains donnant accès à leur état de carbonatation. Les grains ont été carbonatés en enceinte à 20°C, 65% HR et 3% de CO₂, après un étuvage de 10 jours à 40°C suivi d’une conservation à 20°C et 55% HR. Les méthodes de caractérisation sont présentées dans la suite et les conséquences du préconditionnement sur la carbonatation sont discutées.

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

A. Matériau, géométrie des échantillons et protocole de carbonatation

Des échantillons de pâte de ciment sphériques ont été fabriqués avec un ciment CEMI 52.5 de Villiers-au-Bouin (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ce ciment a une densité de 3,13 et une surface spécifique de 3900 cm²/g. La préparation de la pâte de ciment a été effectuée avec un rapport E/C de 0,6.

TABLEAU 1. Composition chimique du ciment (%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂	P ₂ O ₃
63.70	19.60	4.50	3.90	2.30	2.60	0.20	0.70	0.13	0.20

Deux tailles de sphère (Ø = 15 et 20 mm) ont été préparées afin d’étudier l’influence du diamètre sur le processus de carbonatation des granulats. Les échantillons ont été retirés des moules en caoutchouc après 24 heures puis immergés dans de l’eau du robinet à 23 ± 1°C pendant 27 jours.

Après cette cure, un préconditionnement a été effectué avec pour objectif de réduire le degré de saturation en eau et faciliter la diffusion gazeuse. Les échantillons ont été séchés à 40°C pendant 10 jours, puis stockés dans une salle climatisée à 20°C et 55% HR jusqu’à ce que leur masse se stabilise (variation de masse inférieure à 0,05% sur 3 jours). A la fin du préconditionnement, nous supposons que la pâte de ciment est à l’équilibre hydrique avec l’environnement extérieur. Les sphères ont été ensuite placées dans une enceinte climatique connectée à un réservoir de CO₂, maintenue à une concentration en CO₂ de 3±0,5%, une température de 20°C et une humidité relative de 65±5%.

Notons que cette humidité est supérieure à celle du préconditionnement. Ce dernier a surtout pour rôle de faciliter la diffusion gazeuse. La Figure 1 résume les différentes étapes du protocole.

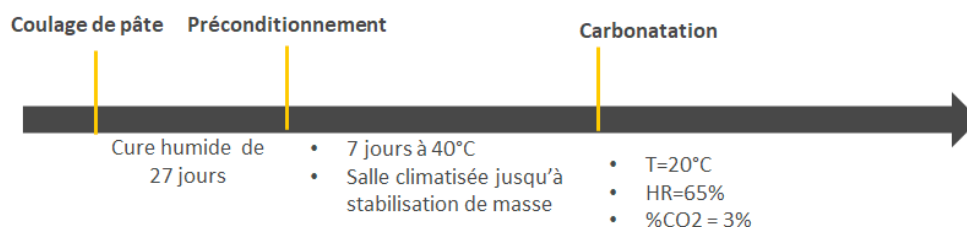


FIGURE 1. Protocole expérimental.

Dans la suite, les billes de diamètres 15 et 20 mm sont nommées respectivement PC15 et PC20. Les échéances de mesure sont nommées comme suit : C1 (avant le préconditionnement), C2 (après), C3 (2 jours de carbonatation), C4 (3 jours), C5 (4 jours), C6 (14 jours), C7 (22 jours), C8 (47 jours).

B. Méthodes de caractérisation des billes

- Analyse thermogravimétrique (ATG)

L'analyse thermique a été réalisée à l'aide d'une microbalance NETZSCH. Pour chaque échéance de caractérisation, une sphère a été écrasée puis tamisée à 80 μm . Un échantillon d'environ 100 mg prélevé dans le tamisât a été suspendue à la balance dans un creuset en alumine puis chauffé avec une vitesse de 10°C par minute sous flux d'azote entre 20 à 1000°C. La perte de masse associée à la décarbonatation a été déterminée par différences de masse entre deux températures définies par les extrémités des pics caractéristiques de la courbe DTG (entre environ 500°C et 900°C).

- Micro-indentation

Un testeur de micro-dureté numérique Fischer (FISCHERSCOPE HM2000) a été utilisé pour évaluer la dureté superficielle d'échantillons de pâte. A chaque échéance de caractérisation, une bille a été sciée en son milieu et une des demi-sphères ainsi obtenue a été soumise au test de micro-indentation. Avant le test, la demi-sphère a été soigneusement polie pour répondre aux critères expérimentaux du testeur. Initialement positionné au centre de la demi-sphère (abscisse $X = 0$ mm), le pénétrateur se déplace ensuite vers le bord de l'échantillon (abscisse $X = 7,5$ ou 10 mm). Le long de cette trajectoire linéaire, une indentation est réalisée tous les 0,1 mm. A chaque indentation, une force de 300 N est appliquée pendant 10 secondes et la mesure de la profondeur atteinte par le pénétrateur permet de caractériser la dureté de l'échantillon à cet endroit précis. Le résultat d'un essai est un profil de micro-dureté.

- Micro-tomographie

Certaines billes PC15 et C20 ont été collées sur les supports montrés sur la Figure 2 avant le préconditionnement puis ont subi tout le protocole résumé sur la Figure 1. A chaque échéance C_i , la bille et son support sont imagés par micro-tomographie à l'aide d'un appareil XRADIA Micro XCT-400. Le tube à rayons X fonctionne à 135 kV et 60 μA . Au total, 1080 projections sont acquises par le détecteur. Dans ces conditions, la résolution est d'environ 10 μm (taille d'un côté de voxel). Cette résolution a été jugée suffisante pour mettre en évidence les variations de densité dues à la

carbonatation. Les images ainsi obtenues ont une taille de 2048³ codées en 16 bits soit environ 17 Go. Le traitement des histogrammes de niveaux de gris est présenté dans la partie III.B.

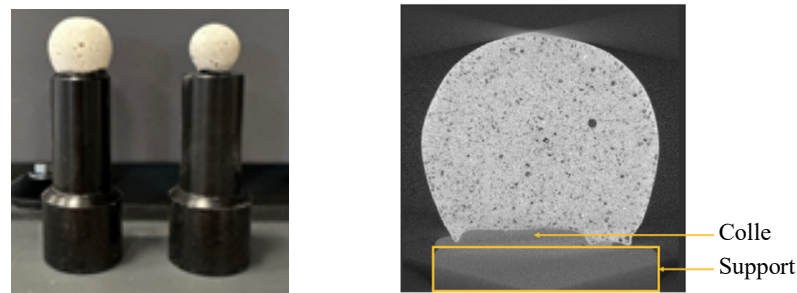


FIGURE 2. Vue des billes collées sur les supports utilisés pour la tomographie (gauche) et section d'une bille de 20 mm de diamètre obtenue par tomographie (droite).

III. RESULTATS

A. Résultats à l'échelle de la bille

L'étuvage à 40°C suivi de la conservation à 20°C pendant 20 jours au total conduit à une perte de masse d'environ 20%, ce qui correspond à un degré de saturation en eau moyen des billes de 30% (Fig. 3). Les variations de masse sont quasiment identiques pour les deux diamètres pendant le préconditionnement, ce qui est surprenant car le séchage devrait être environ deux fois plus rapide pour la bille de 15 mm (dans le cas d'un transfert purement fickien). Cette absence d'effet d'échelle peut s'expliquer en partie par la géométrie non parfaitement sphérique des billes (figure 2). Le séchage dans l'étuve ventilée est peut-être dû également à une convection en surface.

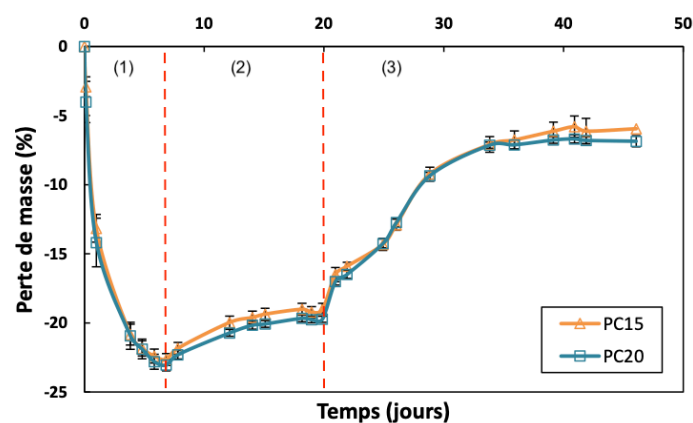


FIGURE 3. Variation de masse des billes pendant l'étuvage à 40°C (1), la conservation à 20°C (2) et la carbonatation (3).

Pendant la phase de carbonatation, de 20 à 48 jours, la prise de masse relative liée à la fixation du CO₂ ne dépend pas du diamètre. Comme nous en discuterons dans la suite, une même prise de masse relative en cours de carbonatation pour les deux diamètres semble indiquer une carbonatation uniforme.

Les résultats de l'ATG confirment que les billes PC15 et PC20 se carbonatent de la même manière, car, après 15 jours, elles ont fixé au total une quantité d'environ 250 g de CO₂ par kg de pâte étuvée à 950°C (Fig. 4). Notons que la masse à 950°C sert de référence car la matière est, après cette perte au feu, totalement déshydratée et décarbonatée, dans un état donc invariant en cours de carbonatation.

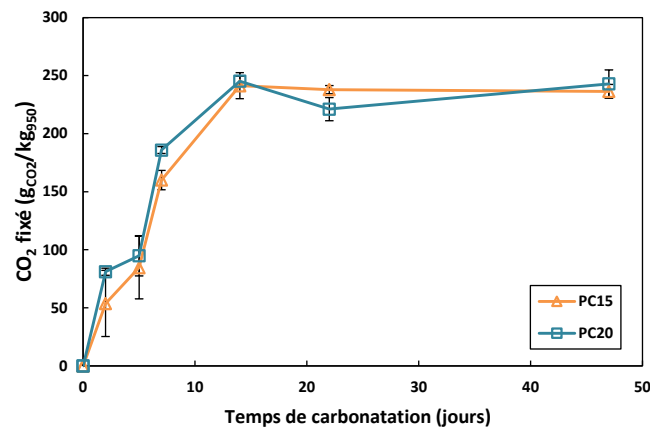


FIGURE 4. Evolution de la quantité de CO₂ fixé par les billes pendant la carbonatation déterminée par ATG.

A partir des résultats de l'ATG, il est possible de calculer le taux de carbonatation, c'est-à-dire le rapport de la masse de CO₂ fixée et la masse de CO₂ que pourrait fixer la pâte si l'ensemble des éléments carbonatables (dont Ca et Mg) était carbonaté. Après estimation de cette masse théorique à partir de la composition élémentaire du ciment (Tableau 1) et de l'équation proposée par (Zhan et al., 2016), on obtient un taux de carbonatation d'environ 45% pour les deux tailles de billes. Après 14 jours, le taux n'évolue plus (Fig. 5). Ce plafond est a priori dû à l'inaccessibilité des oxydes de calcium ou magnésium. Rappelons que les réactions de carbonatation ont lieu dans l'eau interstitielle. Pour un degré de saturation en eau de 30%, une partie de la phase solide ne peut pas être dissoute.

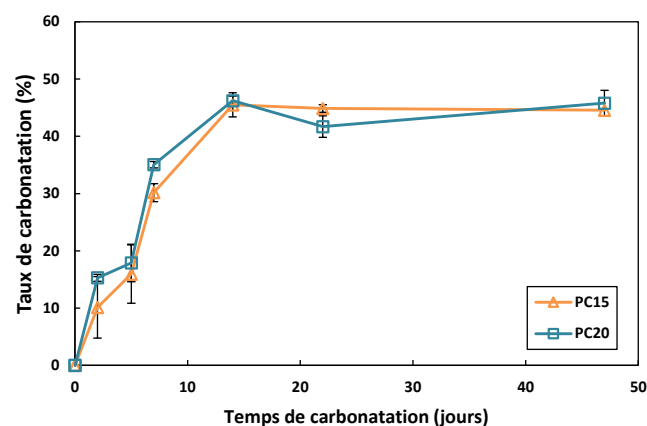


FIGURE 5. Évolution du taux de carbonatation des billes pendant la carbonatation.

B. Profils de carbonatation

• Micro-indentation

Les profils de dureté ne sont pas modifiés par le préconditionnement (Fig. 6). En revanche, la dureté augmente fortement dans les billes en cours de carbonatation, puisqu'en moyenne elle est multipliée par au moins deux après 14 jours en enceinte. Les carbonates de calcium ont de fait une dureté plus élevée que celle des hydrates comme les CSH. Sur la Figure 6 (droite), les résultats en fonction du temps mettent bien en évidence que, si la dureté est plus élevée en moyenne, la dispersion augmente aussi pendant la carbonatation. L'indenteur est appliqué sur une ligne droite tous les 0,1mm. La formation des carbonates de calcium vient créer localement une augmentation de dureté, mais les minéraux nouvellement formés ont une dimension inférieure au pas d'avancement de l'appareil. Cela va aussi dans le sens d'une carbonatation non complète de la pâte. Précisons tout de même que la dispersion de dureté initiale est due à un degré d'hydratation sans aucun doute inférieur à 1 et à une différence de dureté des différents hydrates.

Les profils de dureté mettent en évidence une carbonatation uniforme des billes après 14 jours. Il y a très peu de différence entre les duretés moyennes en peau des billes et plus au cœur. Dans le cas du diamètre 20 mm, les profils sont un peu plus pentus, notamment entre 0 et 3 mm de rayon. Les profils confirment les évolutions de masse ou les ATG puisqu'après 14 jours de carbonatation les évolutions observées sont minimales.

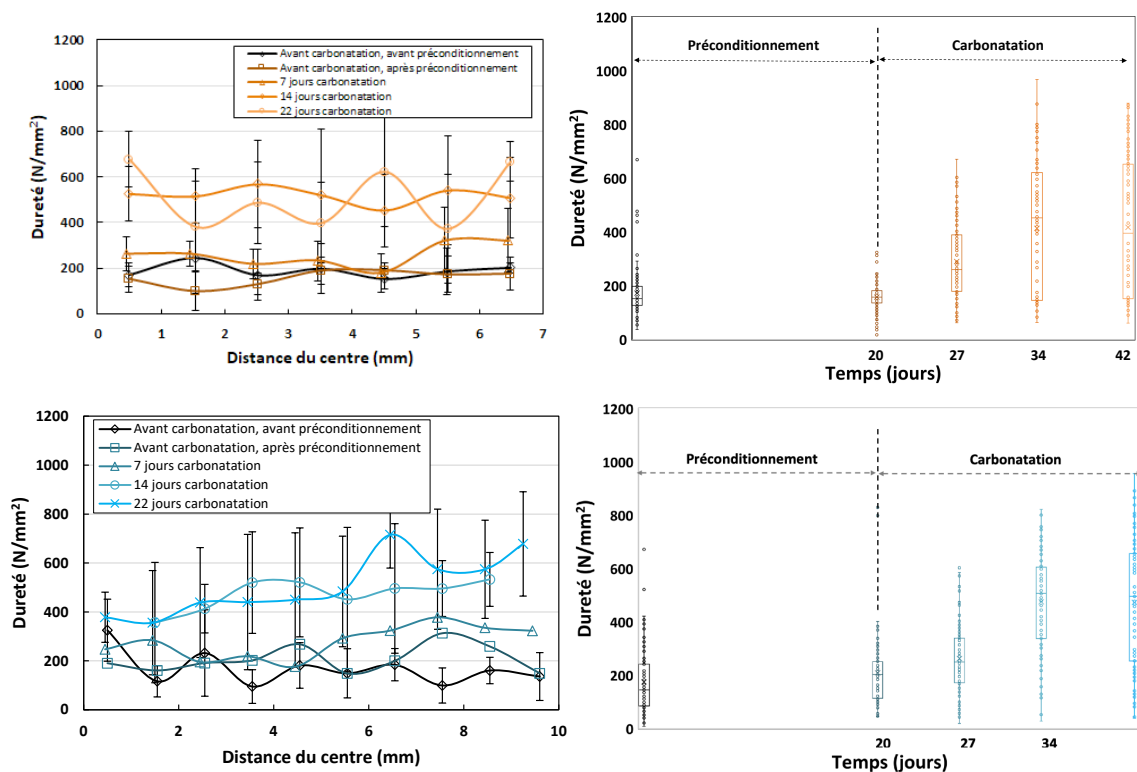


FIGURE 6. Profils de dureté (à gauche) et duretés dans les billes à différentes échéances (à droite) pour les deux tailles : $\varnothing = 15$ mm en haut et $\varnothing = 20$ mm en bas.

- Tomographie

Recalage des niveaux de gris

La tomographie aux rayons X permet de reconstruire un volume à partir des projections des coefficients d'atténuation des rayons X traversant un milieu. Lors de la reconstruction, les valeurs d'atténuation sont converties en niveau de gris (généralement codés en entiers non signés sur 16 bits) à l'aide d'une transformation linéaire qui peut être différente pour chaque image. Il est donc nécessaire de transformer les niveaux de gris avant de pouvoir réaliser des comparaisons quantitatives entre différentes images. Par exemple, (Kim et al., 2020) proposent une méthode pour estimer les coefficients d'atténuations à partir des niveaux de gris et des coefficients d'atténuation de constituants connus présents sur les images. Nous proposons ici une approche plus simple qui consiste à déterminer la transformation linéaire permettant de superposer les pics de niveaux de gris qui sont a priori constants entre les différentes échéances.

Pour illustrer notre propos, la Figure 7 présente les histogrammes bruts calculés sur la série d'images de l'échantillon PC15. Les trois pics visibles correspondent au niveau de gris hors-champ (fond constant) (1), au pic de porosité/air extérieur (2) et au pic de la pâte (3), comme illustré sur la Figure 7 (a). A noter que l'on ne distingue pas le pic du support et de la glue du fait du faible nombre de voxels de ces phases par rapport aux autres. Il est néanmoins possible de détecter le pic du support plastique si l'on se restreint à un petit sous volume. A priori, seul le pic de l'échantillon va évoluer au cours du temps à cause du séchage et de la carbonatation, l'écart relatif entre les autres pics devrait ainsi rester constant d'une échéance à l'autre. La méthode de recalage consiste alors à calculer l'écart entre deux pics de référence sur une image et à transformer les niveaux de gris des autres images de manière à ce que cet écart reste bien constant. Une translation est ensuite appliquée afin de caler un des pics choisis sur une valeur fixe afin de pouvoir réaliser une comparaison entre les images.

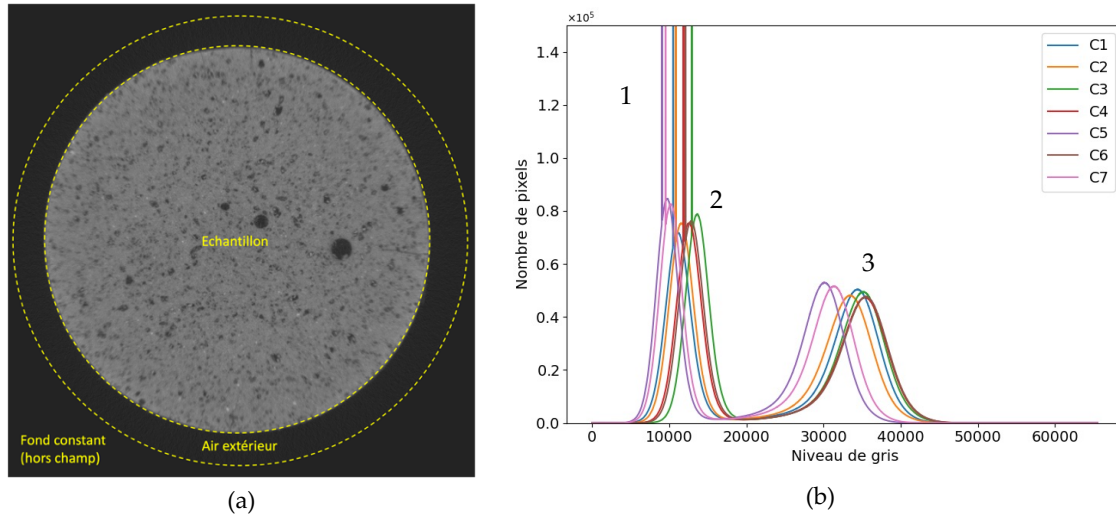


FIGURE 7. Coupe (xy) de la bille PC15 à l'échance C1 (a) et Histogrammes bruts des images de la bille PC15 pour l'ensemble des échances (b)

Connaissant deux pics de références P_0^{ref} et P_1^{ref} , déterminés par exemple sur la première image de la série, et deux pics P_0 et P_1 sur l'image en cours $I(\mathbf{x})$, la valeur $I'(\mathbf{x})$ du niveau de gris après transformation au point $\mathbf{x}$ sera alors

$$I'(\mathbf{x}) = a I(\mathbf{x}) + b$$

Avec $a = \frac{P_1^{ref} - P_0^{ref}}{P_1 - P_0}$ et $b = C - aP_p$

Nous choisissons ici de recaler tous les pics de porosité P_p sur la même valeur $C = 17500$. Les deux pics de références sont choisis de manière à minimiser le coefficient de variation (rapport écart-type sur moyenne) de la localisation des pics constants (i.e. fond constant, porosité et support) sur la série d'image. Dans notre cas, le minimum de variation est obtenu en utilisant comme références le pic de porosité et celui du support plastique mesuré dans un sous-volume identique pour toutes les images (Figure 8 (a)). La détermination précise des pics est réalisée par un algorithme de détection de maxima locaux après un filtrage gaussien de l'histogramme d'écart type $\sigma = 4$.

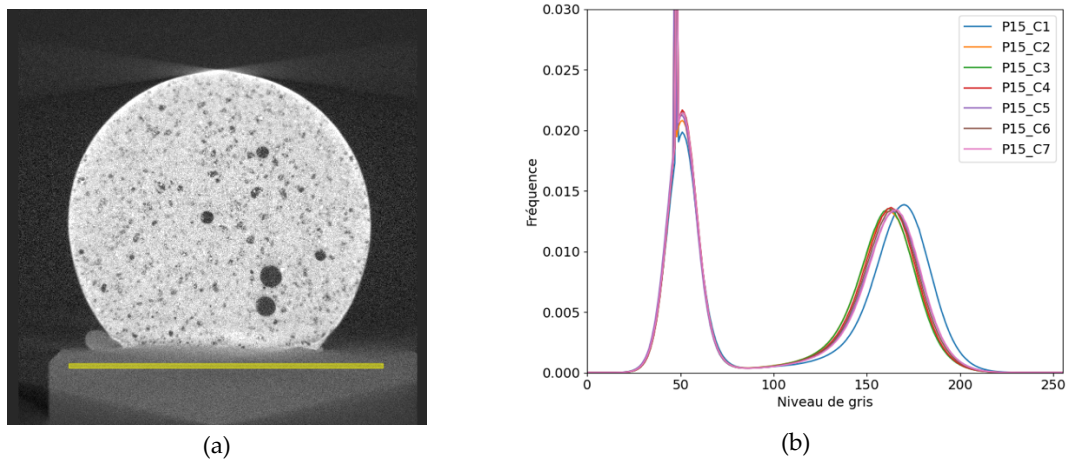


FIGURE 8. Sous-volume (en jaune) utilisé pour déterminer le pic de niveau de gris du support plastique (coupe xz) (a) et Histogrammes de l'échantillon PC15 après recalage (b)

Les images transformées sont ensuite converties en entiers sur 8 bits. La Figure 8 (b) présente les histogrammes obtenus. On constate un très bon recouvrement des pics de porosité.

Résultats

Afin de pouvoir réaliser des mesures sur les séries d'images, il est nécessaire de différencier les voxels qui sont à l'intérieur (aussi appelé masque binaire) de ceux qui sont à l'extérieur de l'échantillon. Pour se faire, un seuillage suivi d'un filtrage puis d'un remplissage des pores est réalisé. Ce masque binaire permet en outre de calculer la carte des distances qui est une image dont la valeur des voxels représente la plus courte distance au fond.

Grâce à ces deux images, il est possible de déterminer les évolutions de la dynamique de niveaux de gris en fonction de la distance au bord pour les différentes échéances. Dans la Figure 9 sont présentées les évolutions du niveau gris moyen en fonction de la distance à la surface de l'échantillon. Au cours de la phase de préconditionnement, de l'échéance C1 à C2, les niveaux de gris moyens diminuent avec la baisse globale de teneur en eau. On remarque que, pour les deux billes de 15 et 20 mm de diamètre, la forme du profil reste inchangée, ce qui témoigne d'une évolution uniforme du matériau. En cours de carbonatation, les niveaux de gris moyens ré-augmentent progressivement vers l'état avant préconditionnement (voire au-delà dans le cas de l'échéance C8, après 47 jours de carbonatation, pour la bille PC20), ce qui traduit une augmentation de la densité moyenne dans l'échantillon. Là encore, la forme des profils ne change pas au cours du temps. Nous en déduisons que la carbonatation des billes est uniforme. Les profils de la bille PC15 présentent des niveaux de gris plus élevés en peau (sur le premier mm) dès le début de préconditionnement (C1). Cette forme de profil est plus difficile à interpréter. La peau des billes est peut-être plus dense à cause d'effets d'interface entre le moule et le matériau pendant la première journée après la fabrication. On peut aussi suspecter une meilleure hydratation du ciment en peau due à l'immersion dans l'eau pendant les 27 jours de cure.

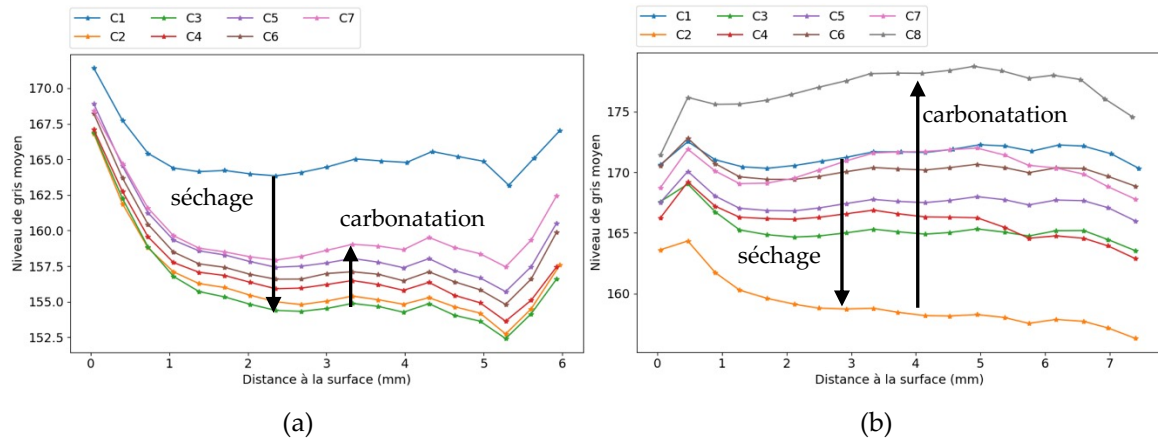


FIGURE 9. Évolution du niveau de gris moyen en fonction du rayon pour les échéances de l'échantillon PC15 (a) et PC20 (b)

La taille d'un côté de voxel des images étant d'environ $20\ \mu\text{m}$ (après redimensionnement), il est impossible de segmenter l'ensemble de la porosité de l'échantillon. On fait ici le choix de séparer les voxels sur la base d'un seuil de 120 qui correspond visuellement à la porosité interne résolue, ou en tout cas à des voxels contenant plus d'air que de solide (Figure 10). Notons que ce seuil correspond à un écart d'environ -2σ par rapport au pic de la gaussienne qui approxime le mieux le pic du solide de l'échantillon le plus sec (échéance C2). L'évolution de la porosité ainsi segmentée en fonction de la distance à la surface est présentée dans la Figure 11 pour l'ensemble des échéances. Lors du préconditionnement (noté « séchage » sur la figure), cette porosité augmente, ce qui s'explique simplement par une baisse de saturation en eau des pores visualisés sur l'image (de taille supérieure à $20\ \mu\text{m}$), plutôt qu'une augmentation réelle de la porosité. En cours de carbonatation, la porosité segmentée a tendance à diminuer, de manière assez uniforme dans les billes. Cette diminution peut s'interpréter comme l'apparition des carbonates de calcium qui ont tendance à colmater progressivement les pores du matériau en cours de carbonatation (d'où une augmentation des niveaux de gris). Une évolution de la porosité déterminée par une méthode plus classique, comme l'imbibition d'eau sous vide, nous permettrait d'aller plus loin dans cette interprétation. Soulignons que les variations de teneur en eau en cours de carbonatation pourraient aussi modifier ces profils de niveaux de gris (comme observé pendant le préconditionnement).

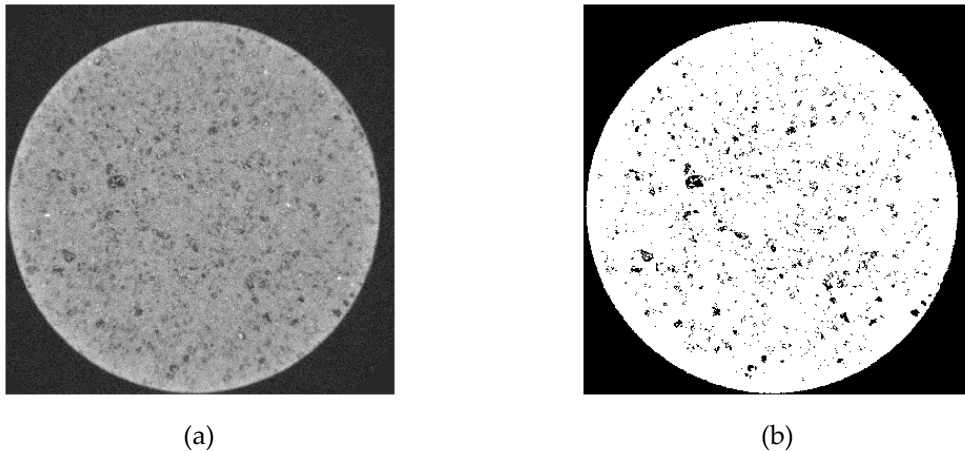


FIGURE 10. Section de l'échantillon PC15 à l'échance C2 (a) et image binarisée (seuil 120) (b)

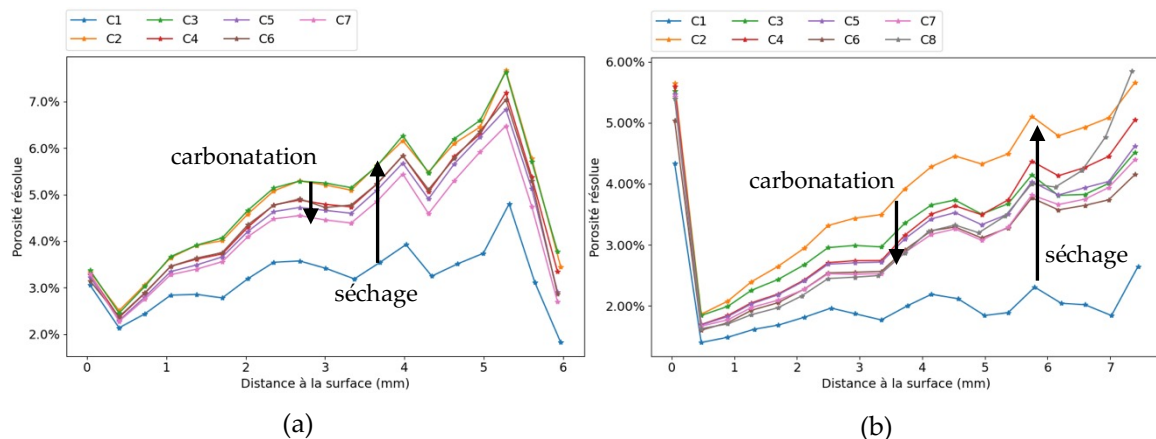


FIGURE 11. Évolution de la porosité résolue en fonction du rayon pour toutes les échances de l'échantillon PC15 (a) et PC20 (b)

III. DISCUSSION

Micro-tomographie et micro-indentation sont des techniques bien adaptées pour l'obtention des profils, difficiles à déterminer aux dimensions des GR avec des méthodes plus classiques comme le grignotage associé à l'ATG (Younsi et al., 2022). La première permet un suivi non-destructif d'un même échantillon en cours de carbonatation. La principale précaution à prendre est la présence de marqueurs de référence dans l'image permettant de recaler facilement les histogrammes de niveaux de gris, sans quoi le traitement des images s'avère compliqué et leur interprétation sujette à caution. La micro-indentation est une technique destructive qui nécessite plusieurs échantillons à prélever pour un suivi dans le temps. Une préparation rigoureuse de la surface des échantillons à indenter est également nécessaire. Un traitement plus poussé des profils de dureté, basé sur la connaissance des duretés de chaque minéral, permettrait d'aller plus loin dans l'analyse des résultats.

Dans l'étude présentée ici, ces deux techniques s'accordent sur le fait que la carbonatation se fait de manière quasi-uniforme pendant environ 14 jours, ce que laissaient supposer le peu de différences de prises de masse ou de quantités de CO_2 piégé entre les deux diamètres étudiés. Cette absence

d'un « front de carbonatation » permet d'avancer un scénario concernant le transfert réactif du CO₂. Pour le faible degré de saturation en eau obtenu à l'issue du préconditionnement, le CO₂ diffuse rapidement et vient saturer le volume des vides des billes avant d'être consommé par la matière. Contrairement au scénario classique utilisé pour les structures en béton, la vitesse de carbonatation n'est donc pas limitée par la diffusion gazeuse mais par les réactions chimiques.

Toutes les méthodes de caractérisation montrent que la carbonatation s'arrête à partir de 14 jours environ pour plafonner à un taux de carbonatation inférieur à 50%. Cela confirme qu'à faible saturation en eau, une partie de la matière carbonatable n'est pas accessible au CO₂ (Boumaaza et al., 2020). Cela va aussi dans le sens des conclusions de (Zajac et al., 2022) montrant qu'une carbonatation « complète » d'une pâte de ciment ne peut être obtenue qu'après broyage et immersion dans une solution saturée en carbonate.

IV. CONCLUSION

Des expérimentations en laboratoire sur des échantillons de pâte de ciment de géométries sphériques ont été menées pour comprendre le phénomène de carbonatation à l'échelle d'un granulats de béton recyclé de taille centimétrique. Ces expérimentations nous ont permis de tester de nouvelles méthodes de caractérisation, la micro-tomographie et la micro-indentation. Même si elles nécessitent de prendre quelques précautions du point de vue de la préparation, du traitement des données et de l'interprétation des résultats, ces techniques se sont révélées bien adaptées pour la cartographie de la carbonatation à l'intérieur des granulats étudiés. Ces données s'avèrent précieuses car elles confirment le résultat de simulations numériques (Turcry et al., 2023) : les granulats recyclés dans un état initial relativement sec (i.e., degré de saturation en eau d'environ 30%) doivent se carbonater de manière uniforme, avec un contrôle de la vitesse par les réactions chimiques. L'étude sera poursuivie avec le même protocole cette fois sur des billes n'ayant pas subi de préconditionnement avant carbonatation accélérée. Ces recherches sont indispensables pour valider le procédé de piégeage du CO₂ par carbonatation des granulats recyclés.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ANR pour le financement du projet CO₂NCRETE. Nous remercions également M. François Bertrand de l'Ecole Centrale de Nantes pour la réalisation des images tomographiques.

REFERENCES

- M. Boumaaza, B. Huet, Ph. Turcry, A. Aït-Mokhtar. (2020). The CO₂-binding capacity of synthetic anhydrous and hydrates: Validation of a test method based on the instantaneous reaction rate. *Cement and Concrete Research*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106113>
- D. Cui D, X. Zuo, K. Zheng, S. Talukdar. (2020). Tomography-Based Investigation on the Carbonation Behavior through the Surface-Opening Cracks of Sliced Paste Specimen. *Materials*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/ma13081804>

P. Guyard, M. Saade, A. Feraille. (2022). Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclés quels bénéfices environnementaux ? *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(3), 117-131. <https://doi.org/10.26168/ajce.40.3.10>

G. Habert, S.A. Miller, V.M. John, J. L. Provis, A. Favier, A. Horvath, K. L. Scrivener. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Review Earth & Environment*, 1, 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>

Y. Hou, P.Y. Mahieux, Ph. Turcry, J. Lux, Jérôme, A. Aït-Mokhtar, A. Nicolai. (2022). Plateforme de recyclage de déchets inertes du BTP : un puits de carbone « gris »? *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(1), 96-99. <https://doi.org/10.26168/ajce.40.1.24>

L. Izoret, L. Barnes-Davin, Y.-P. Jacob, X. Guillot, V. Meyer, J. Jeong, A. Cudeville. (2022). PN FastCarb Carbonatation accélérée des bétons de démolition : bilan des carbonateurs industriels et pilote. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(3), 82-92. <https://doi.org/10.26168/ajce.40.3.17>

F. Kaddah. (2022). Étude multi-échelles de la carbonatation des granulats de béton recyclé : nouvelles méthodes de caractérisation et modélisation. *Thèse de doctorat*, Ecole Centrale de Nantes.

J.-S. Kim, K. S. Youm, J.-H. Lim, T.-S. Han. (2020). Effect of carbonation on cement paste microstructure characterized by micro-computed tomography. *Construction and Building Materials*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120079>

A. Leemann, B. Münch, M. Wyrzykowski. (2023). CO₂ absorption of recycled concrete aggregates in natural conditions, *Materials Today Communications*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106569>.

J.M. Torrenti. (2022). Introduction, Special Issue PN Fastcarb. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(3). <https://doi.org/10.26168/ajce.40.3.1>

Ph. Turcry, B. Huet, J. Mai-Nhu, P.-T. Mahieux, T. Pernin. (2023). Modelling of the CO₂ uptake by recycled concrete aggregates. *The International RILEM Conference Synercrete*, Milos, Greece.

A. Younsi, Ph. Turcry, A. Aït-Mokhtar. (2022). Quantification of CO₂ uptake of concretes with mineral additions after 10-year natural carbonation, *Journal of Cleaner Production*, 349. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131362>

M. Zajac, J. Skibsted, F. Bullerjahn, J. Skocek. (2022). Semi-dry carbonation of recycled concrete paste, *Journal of CO₂ Utilization*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102111>

B. J. Zhan, C. S. Poon, C. J. Shi. (2016). Materials characteristics affecting CO₂ curing of concrete blocks containing recycled aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 67, 50-59, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.003>.