

# PN FastCarb - Carbonatation accélérée des bétons de démolition : bilan des carbonateurs industriels et pilote

Laurent Izoret<sup>1</sup>, Laury Barnes-Davin<sup>2</sup>, Yvan-Pierre Jacob<sup>2</sup>, Xavier Guillot<sup>3</sup>, Vincent Meyer<sup>3</sup>, Jena Jeong<sup>4</sup>, Amaury Cudeville<sup>5</sup>

<sup>1</sup> SFIC Syndicat Français de l'Industrie Cimentière

<sup>2</sup> Vicat

<sup>3</sup> Lafarge France

<sup>4</sup> ESTP Paris

<sup>5</sup> Clamens

## RESUME

Le groupe de travail dédié aux démonstrateurs de carbonatation du PN FastCarb avait pour mission de mettre en œuvre des démonstrateurs à l'échelle « pilote industriel » pour démontrer la capacité effective de fixation du CO<sub>2</sub> par précipitation de calcite néoformée (séquestration).

Les dispositifs mis en œuvre l'ont été par détournement d'installations existantes reconfigurées en carbonateurs, à savoir un sécheur à tambour tournant, un sécheur à lit fluidisé, un conteneur et un filtre à gravier. Les deux premiers étaient raccordés aux fumées industrielles de cimenterie, le troisième utilisait un gaz industriel purifié et le dernier fut le seul à être mis en œuvre à l'échelle du laboratoire en utilisant un mélange de gaz de laboratoire.

Les résultats montrent que sans optimisation particulière en dehors de la mise en route, on peut séquestrer entre 30 et 60kg de CO<sub>2</sub>/t de GBR selon la technologie et le granulats employés.

**Mots clés :** démonstrateurs industriels, gaz de cimenterie, calcite néoformée, séquestration du CO<sub>2</sub>.

## I. INTRODUCTION

Dans le Projet National FastCarb, le principal objectif est d'utiliser le béton concassé de démolition comme « puits de carbone » en profitant de la tendance spontanée de la pâte de ciment hydraté à fixer le CO<sub>2</sub> atmosphérique. Si cette tendance est connue depuis les travaux de Louis Vicat, elle a longtemps été considérée comme un aspect négatif car contribuant à l'abaissement du pH de la pâte de ciment hydraté, contribuant ainsi à la dépassement des armatures conduisant à leur corrosion. Si la cinétique de carbonatation démarre rapidement (quelques minutes après la mise en contact avec l'air), la progression du front de carbonatation est toutefois relativement lente (quelques centaines de micromètres par an) et dépend de nombreux paramètres comme la porosité de la pâte et/ou l'humidité relative.

Pour un béton courant, de génie civil ou de bâtiment, seule la partie exposée à l'air est soumise à la carbonatation, c'est-à-dire le parement et ce sur une épaisseur n'excédant pas 2 à 3 centimètres ; au-delà, la partie interne profonde du béton sans contact avec l'air n'est donc pas soumise à ce phénomène. La fracturation initiale du béton « à la boule » ou au brise-roche, suivi de l'opération de concassage met à jour des surfaces internes encore non exposées à l'air et dotée d'une plus grande surface spécifique. C'est cette surface qui devient alors la surface d'échange avec le CO<sub>2</sub> atmosphérique qui sera donc fixé sous forme de CaCO<sub>3</sub>.

Il vient alors, par le fait de la néoformation de carbonate de calcium, une hypothèse de réduction de porosité qu'il s'agit de vérifier (Sereng et al., 2021). Parmi les différentes classes granulométriques issues du concassage du béton, les fractions fines (sable et gravillon) sont celles qui sont les plus enrichies en pâte de ciment hydratée et par là même, les moins facilement réutilisables du fait de leur grande porosité et du fort coefficient d'absorption d'eau en résultant (Omary et al., 2016, Mazhoud et al., 2022)).

Si l'on parvient à mettre en contact de manière efficace une source de CO<sub>2</sub> (les fumées industrielles en général) et le béton concassé, on disposerait alors d'une solution de captage de CO<sub>2</sub> dont la fixation serait accélérée du fait de la forte concentration en CO<sub>2</sub> des fumées. Les fumées de cimenteries représentent donc un double atout supplémentaire puisque leur concentration volumique en CO<sub>2</sub> avoisine les 18% et du fait de la température élevée (variant de 40 à 80°C selon la configuration de la cimenterie), ce qui accélère la vitesse des réactions.

Outre son caractère accéléré, ce mécanisme de séquestration devrait induire une diminution de porosité du matériau. Si les rendements de conversion sont suffisants, cette solution diminuerait effectivement les rejets industriels dans l'atmosphère et favoriserait la recyclabilité des fractions les plus fines du béton concassé du fait de leur caractère carbonaté.

Dans un Projet National, outre la caractéristique du projet collaboratif entre les différents acteurs du secteur de la Construction, la mise en œuvre de démonstrateurs à l'échelle pilote ou même industrielle est le gage d'une appropriation rapide à l'échelle industrielle. C'est avec cette optique que le Groupe de Travail « démonstrateurs de carbonatation accélérée » a travaillé en précisant dès le lancement du Projet, que le principe de travail ne serait pas de faire du développement de procédé spécifique trop long et coûteux, mais de s'attacher à « détourner » des installations existantes conçues pour d'autres finalités, afin de les transformer en « carbonateur » dans le contexte industriel, cimentier en particulier.

L'objectif étant ainsi posé, l'analyse des opérations fondamentales des procédés industriels s'est tournée vers les processus mettant en contact des solides plus ou moins divisés et des gaz. Ces processus de mise en contact solide-gaz se répartissent en deux catégories : les systèmes dynamiques et les systèmes statiques. Pour les premiers, les opérations identifiées sont le séchage et la lyophilisation, pour les seconds, il s'agit de la percolation et la filtration sur lit de particules.

Pour les deux systèmes dynamiques, nous avons retenu le séchage par tambour rotatif, et la lyophilisation à lit fluidisé. Pour les systèmes statiques, nous avons retenu la percolation simple soit en conteneur, soit en dispositif de type filtre à gravier de dépoussiéreur de gaz.

Les deux premières solutions ont été mise en œuvre à pleine échelle sur des sites de cimenteries industrielles, respectivement de Vicat (cimenterie de Créchy) et LafargeHolcim (cimenterie de Val d'Azergues). La troisième solution (percolation simple en conteneur) a été mise en œuvre chez Clamens à l'aide de CO<sub>2</sub> industriel en bombonne. La quatrième solution (filtre à gravier) est intéressante car d'une part elle fut mise en œuvre en cimenterie jusque dans les années 80 et d'autre part son principe reste simple et entièrement automatisable. Devant l'impossibilité de réutiliser des installations, maintenant inexistantes, il fut décidé de mettre en œuvre ce principe à l'échelle pilote (ESTP-Paris).

Nous présentons ici les principaux résultats des deux campagnes de carbonatation des coupures granulométriques 0/4 et 4/16mm industrielles destinées à la production de béton pour caractérisation des propriétés d'usage et de durabilité des bétons à base de fractions de béton recyclé recarbonaté. Pour le filtre à gravier nous présentons les principes de l'installation et le programme et les résultats d'essais.

## II. CARBONATATION EN TAMBOUR ROTATIF (industriel)

Dans un tambour rotatif les GBR et le gaz de cimenterie enrichi en CO<sub>2</sub> circulent à contre flux. Le mouvement rotatif associé aux relevés soudés aux blindages du tube permet de mettre en contact avec le gaz toutes les surfaces des granulats.

Le tambour rotatif constituant le pilote FastCarb installé dans l'usine Vicat de Créchy est long de 11 m et a un rayon de 2 m (Fig. 1).

Le gaz alimentant le tambour est issu d'un « piquage » à la cheminée de la cimenterie présente une température comprise entre 40 et 60°C et une teneur en CO<sub>2</sub> variant de 11 à 16 %. L'humidité relative dans le tambour est de 90%.

Afin d'augmenter les temps de séjour dans le tube, il a été décidé de faire tourner le tube par intermittence, à 4 tour/min pendant 2 min toutes les 15 min. Le temps optimal de séjour a été identifié comme étant de 60 min pour 3t de GBR. Le tambour est ensuite vidangé pendant 10 minutes à la vitesse de 10 tours minutes.



Figure 1. Pilote FastCarb – Usine Vicat de Créchy

Les produits traités sont un sable recyclé et un gravillon recyclé fabriqués à la plateforme de recyclage Aggneo® de Saint-Fons (Figure 2). Le sable recyclé et le gravillon recyclé sont obtenus par simple concassage de béton durci. Ce procédé résulte en la fabrication de granulats ayant différentes tailles et qui sont constitués d'un mélange intime de pâte de ciment durcie, de sable et de gravillons. Des lots homogènes issus de mêmes fabrications ont été constitués et répartis sur les sites des deux pilotes (tambour tournant et lit fluidisé).



Figure 2. Plateforme de recyclage aggneo® de Saint-Fons

Les répartitions granulométriques de ces matériaux (sable et gravillon) avant et après carbonatation dans le tambour rotatif sont données dans les figures 3 et 4. On note peu de modification sur la répartition granulaire de la fraction 0-4 mm. Pour le gravillon recyclé, l'enrichissement de la fraction inférieure à 4 mm est faible (+5%) et pourra être évitée sur une future installation par un système de criblage en sortie du tambour. Nous pouvons donc conclure que le procédé de carbonatation en tambour rotatif utilisé ici ne génère pas de manière excessive des particules plus fines comme conséquence de la désintégration mécanique des sables et gravillons recyclés.

Deux campagnes de carbonatation ont eu lieu en décembre 2019 et en août 2020. Lors de la première campagne le taux d'humidité du sable en entrée était d'environ 14,5% et de 13,9% après re-carbonatation. De manière similaire l'humidité des gravillons était de 13,6% en entrée et 12,5% en sortie. On constate donc que malgré une humidité relative élevée dans le tambour, la teneur en eau des GBR évolue peu. Dans les 2 cas, ces teneurs en eau sont bien supérieures aux optimums déterminés en laboratoire par l'UGE de 5,8% pour le sable et 2,6% pour le gravillon (Sereng, 2020).

La tentative de séchage en étalant les GBR au sol en fine couche pendant plus de 6 mois n'a pas permis de ramener les teneurs en eau à des niveaux comparables à l'optimum. Cet étalement a, par contre, favorisé la carbonatation naturelle des GBR. L'addition d'un système de séchage à une future installation industrielle sera donc à envisager.

Les résultats de carbonatation obtenus lors de la première campagne de carbonatation et dans des conditions de teneurs en eau non optimale sont en moyenne de 31 kg de CO<sub>2</sub>/t GBR pour la fraction 0/4 et de 5kg/t de GBR pour la fraction 4/16.

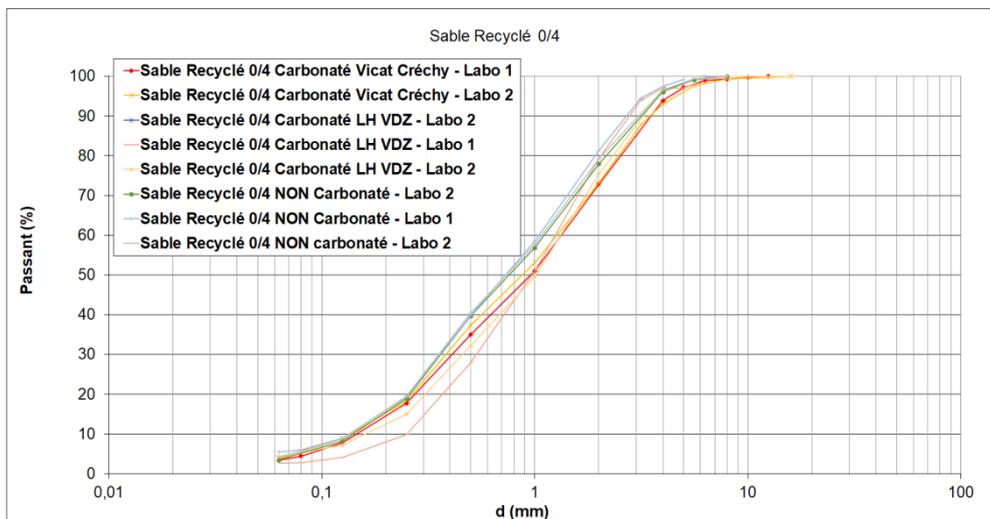


Figure 3. Courbes granulométriques du sable recyclé avant et après carbonatation selon les deux procédés

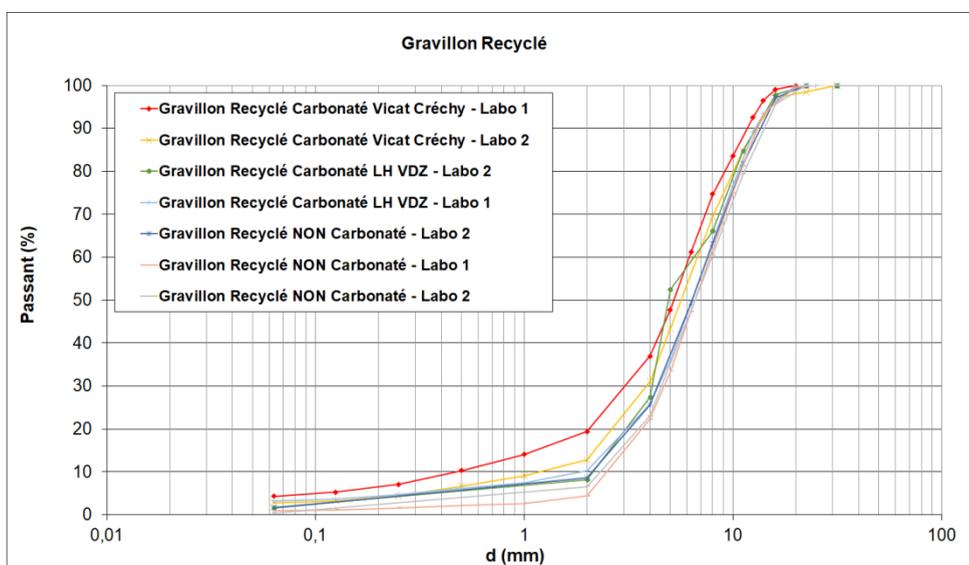


Figure 4. Courbes granulométriques du gravillon recyclé avant et après carbonatation selon les deux procédés

### III. CARBONATATION EN LIT FLUIDISE (industriel)

Le démonstrateur FastCarb installé depuis début 2020 à l’usine LafargeHolcim de Val d’Azergues (69) (Figure 5) est un lit fluidisé sécheur adapté pour l’occasion en un réacteur à courants croisés, les gaz de cimenteries traitant directement les granulats de béton recyclé. Ce carbonateur est directement connecté aux gaz de cimenterie par des conduites métalliques. Le piquage des gaz d’usine est effectué sur le filtre principal situé en amont de la cheminée ; de ce fait un filtre supplémentaire a été placé en sortie du carbonateur afin de prévenir de tout dégagement de poussière supplémentaire à la cheminée de l’usine.



Figure 5. Pilote FastCarb – Usine Lafarge France (Groupe Holcim) de Val d’Azergues

Le principe de fonctionnement est précisé sur la figure 6 :



Figure 6. Principe de fonctionnement du procédé de lit d’air fluidisé

Une première phase d’essais a permis de démontrer la faisabilité industrielle de la carbonatation accélérée des granulats recyclés en utilisant directement les gaz de la cimenterie (teneur en CO<sub>2</sub> d’environ 20%). Lors de cette première phase, il n’a pas été possible de travailler en processus continu car l’écoulement des matériaux sur la sole était insuffisant. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette difficulté : humidité élevée dans l’enceinte du carbonateur et inclinaison de la sole insuffisante principalement. Les premiers essais ont donc été conduits en semi-continu.

Afin de remédier aux difficultés rencontrées lors de la première phase, un certain nombre d’améliorations du procédé ont alors été envisagées. Profitant du changement du filtre principal de l’usine, des modifications suivantes ont été mises en œuvre :

- Réinstallation du pilote à un endroit plus proche du nouveau piquage de gaz. Par la même occasion, il a été nécessaire d'intégrer une pente de l'ordre de 3% au carbonateur afin de faciliter l'écoulement des matériaux.
- Reconexion du pilote au nouveau filtre de l'usine avec des conduites en inox jointées. Les conduites initiales n'ont pas pu être réutilisées du fait d'une géométrie différente (coudes, distance plus faible). Cette nouvelle configuration devait aussi permettre d'augmenter la température d'entrée des gaz dans le carbonateur.
- Soudure et meilleure fixation jointée de la sole perforée afin de limiter les passages préférentiels des gaz sur les côtés de l'appareil afin d'optimiser la fluidisation et la réaction gaz solide.
- Mise en place d'une alimentation continue et maîtrisée de la matière, afin de limiter une discontinuité de charge dans le carbonateur et favoriser la fluidisation.

Les mêmes matériaux (sable recyclé et gravillon recyclé) produits à la plateforme de recyclage aggneo® de Saint-Fons sont utilisés pour la carbonatation en lit fluidisé.

Les taux de carbonatation mesurés lors des deux phases sont présentés dans le Tableau 1. Les modifications apportées lors de la phase 2 ont significativement permis d'améliorer les taux de CO<sub>2</sub> piégés. Pour le sable recyclé, les valeurs obtenues sont comparables à celles déterminées en laboratoire à l'optimum de teneur en eau (Figure 7).

Il apparaît que le procédé ne modifie que très légèrement la distribution granulométrique des matériaux (Fig. 3 et 4) : il n'y a pas de phénomène de désintégration des matériaux.

		Lit fluidisé	
		Phase 1	Phase 2
Température des gaz à l'entrée du carbonateur (°C)		60 - 70	80 - 90
Sable recyclé	CO <sub>2</sub> piégé (kgCO <sub>2</sub> /T)	25 [max 36]	39 [max 49]
	Teneur en eau après carbonatation (%)	21,8	6,0
Gravillon recyclé	CO <sub>2</sub> piégé (kgCO <sub>2</sub> /T)	9 [max 19]	12 [max 32]
	Teneur en eau après carbonatation (%)	8,6	2,0

Tableau 1. Quantités de CO<sub>2</sub> piégé par les granulats recyclés dans le procédé à lit fluidisé

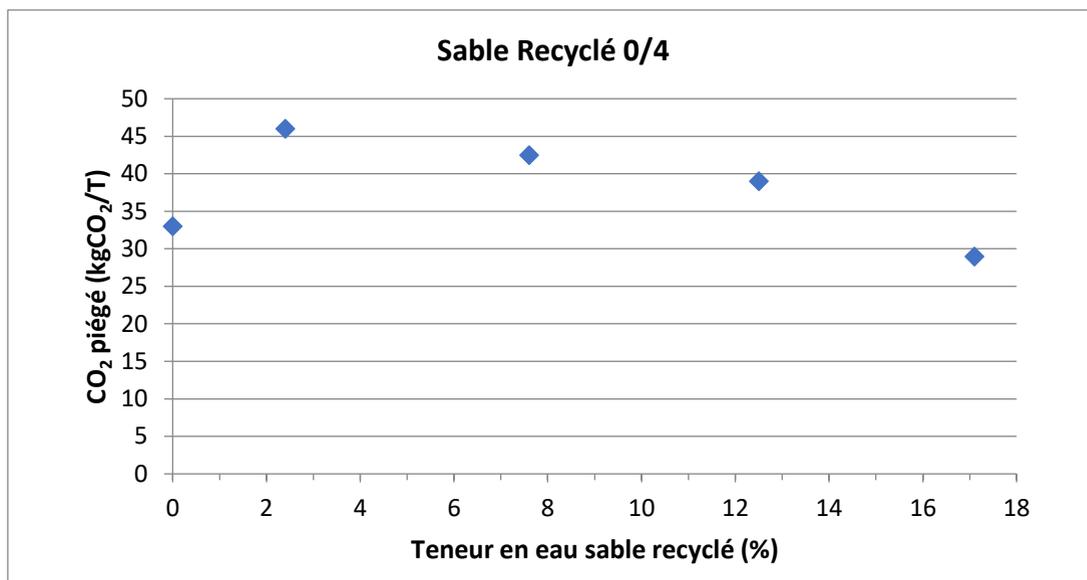


Figure 7. Détermination du CO<sub>2</sub> piégé par le sable recyclé en fonction de la teneur en eau - Essai en enceinte de laboratoire à 70°C pendant 3h (concentration en CO<sub>2</sub> de 20% et HR de 70%)

#### IV. CARBONATATION PAR CONTENEUR

En plus des démonstrateurs précédents, une expérimentation utilisant un conteneur a également été menée sur le site de la société Clamens, en profitant du fait que cette société utilise déjà du CO<sub>2</sub> afin de tamponner les eaux de lavage de ses installations.

Le principe (figure 8) est très simple : on place des granulats recyclés dans le conteneur qui est ensuite fermé de manière étanche et on injecte du CO<sub>2</sub> jusqu'à atteindre 30% de CO<sub>2</sub> dans le volume du conteneur.



Figure 8. Vue du conteneur Clamens et de son système d'injection.

Différentes modalités de stockage des granulats ont été réalisées, à savoir : i) stockage en big bag qui s'est révélé peu efficace ; ii) stockage vrac massif, qui s'est également révélé inefficace et enfin iii) stockage « étagé » en lit mince qui fut couronné de succès.

Différents lot de sable recyclé 3-6 en provenance du chantier Lavallée à Chatenay-Malabry (projet E3S entre Eiffage et l'Université Gustave Eiffel) a été testé.

Les résultats montrent un stockage de CO<sub>2</sub> égal à 28kg/t de granulats et une baisse de 2% de l'absorption d'eau du sable (qui passe de 7,4 à 5,3%). Le taux de captation est significativement plus faible que celui obtenu par les essais en laboratoire (Marie Sereng, 2021)

## V. CARBONATATION EN FILTRE A GRAVIER (laboratoire)

Dans l'industrie cimentière, pendant les années 1960-1980, la filtration des fumées de four était réalisée par des filtres à gravier. Le principe est assez simple et réside dans la percolation d'un gaz au travers d'une couche de gravier ou de mélange sable/gravier offrant une surface d'échange élevée. Cette disposition correspond parfaitement au principe fixé par le groupe de travail et présente l'avantage d'être de réalisation industrielle simple et automatisable. Aucune installation industrielle n'étant disponible (vétusté), nous avons opté pour un dispositif pilote en laboratoire afin de simuler les conditions d'un gaz issu d'une cimenterie et suivre la cinétique de la carbonatation.

Le dispositif expérimental est représenté sur le schéma ci-dessous (Figure 9) et il est principalement composé d'éléments suivants :

- (1) Un humidificateur d'un volume de 2l plongé dans un bain thermostaté (volume 12l) ;
- (2) Un réacteur en acier (diamètre=33cm et hauteur= 36cm) ;
- (3) Une résistance chauffante placée au fond du réacteur ;
- (4) Le réacteur est équipé d'un panier contenant les granulats de bétons recyclés (GBR) ;
- (5) Un système d'alimentation en gaz ;
- (6) Un système d'extraction de gaz.

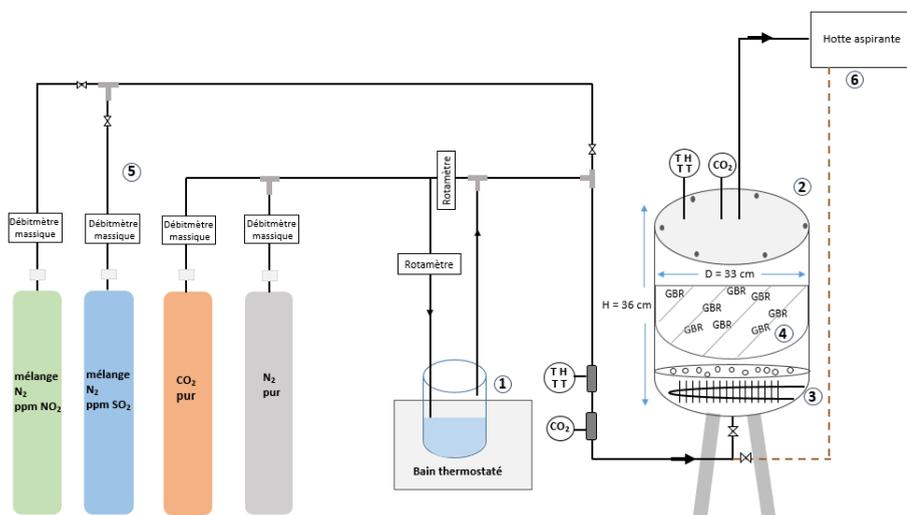


Figure 9 : Représentation schématique du Pilote de carbonatation

Le principe de l'essai consiste à humidifier préalablement le gaz (HR= 20-80%) avant son entrée par le bas du réacteur où il sera chauffé et traversera le lit de granulats (GBR) « per ascensum » pour ressortir par le haut à travers un flexible d'évacuation qui sera fixé sur la hotte d'extraction. Les conditions d'essais peuvent être variables selon les paramètres à étudier à savoir, la température et l'humidité des gaz, le débit et la composition des gaz. La composition modèle du gaz de cimenterie

a été fixée à  $\text{CO}_2 = 15\%$ ,  $\text{NO}_2 = 390$  ppm et  $\text{SO}_2 = 39$  ppm, le reste étant l'azote  $\text{N}_2$ . Ce dispositif est conçu à échelle pilote pour déterminer et optimiser le rendement de carbonatation en fonction des paramètres physico-chimiques de l'installation et des granulats.

Les conditions d'essais selon fonction des paramètres variables de l'installation, à savoir :

- Température : pilotable entre  $20^\circ\text{C}$  et  $60^\circ\text{C}$
- Pression atmosphérique uniquement
- Humidité relative du gaz : pilotable entre 50% et 80%
- Composition de gaz de cimenterie :  $\text{CO}_2 = 15\%$ ,  $\text{NO}_2 = 39$  ppm et  $\text{SO}_2 = 399$  ppm

Dans ces conditions les caractéristiques sont les suivantes : Débit de gaz max  $30$  l/min =  $0,03$  m<sup>3</sup>/min

Les résultats étant détaillés dans les résultats du groupe de travail « approche théorique », nous mentionnerons ici les résultats en termes de tendances, à savoir que :

- i) Le taux de carbonatation est directement fonction de la durée du contact solide-gaz
- ii) Le taux de carbonatation par les fractions fines est d'autant plus fort que la température des gaz est élevée dans la plage de température entre  $20$  et  $60^\circ\text{C}$ .
- iii) Le taux de carbonatation est modulé par le couple humidité relative/température avec un effet positif si  $T > 80^\circ\text{C}$ .
- iv) L'effet de la présence d'oxydes de soufre et d'azote ( $\text{NO}_x$  et  $\text{SO}_2$ ) peut affecter à la baisse le taux de carbonatation mais cet effet est variable selon la nature du GBR utilisé. Dans tous les cas de figure étudiés, ceci ne se traduit pas en aucun cas par la précipitation de composés spécifiques du type sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) et nitrocalcite  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ .

## VI. BILAN ET PERSPECTIVES

Ces résultats à l'échelle pilote démontrent que l'utilisation directe des gaz industriels, sans traitement préalable et sans développement spécifique de procédé, est possible avec des échelles de temps et de quantités de matière en ligne avec les pratiques industrielles actuelles. Ainsi, les taux de  $\text{CO}_2$  piégés dans les granulats recyclés en 1 heure de traitement, sont dans une fourchette de  $30$  à  $60$  kg $\text{CO}_2$  piégé /t de granulats de béton concassé). Ces données de rendement sont comparables à celles obtenues en laboratoire dans des conditions parfaitement maîtrisées. Si ce taux de piégeage peut sembler modeste, il reste néanmoins plausible à l'échelle industrielle et à court terme sans investissement financier irréaliste.

Enfin, nous espérons que ces résultats seront confirmés à court terme par ceux des essais avec le filtre à gravier (établissement des corrélations en cours); essais qui permettront également de préciser le rôle des autres gaz présents dans les fumées industrielles, à savoir  $\text{SO}_2$  et  $\text{NO}_x$ .

Dans notre objectif de démonstration du processus de capture du  $\text{CO}_2$  et d'amélioration des propriétés des granulats de béton concassés ainsi traités, l'aspect capture industrielle étant démontré, il reste maintenant à vérifier et démontrer les modifications positives des granulats de béton concassé, c'est-à-dire la précipitation du carbonate de calcium, sa forme minéralogique et la réduction de porosité associée, ainsi que le gain de réduction d'absorption d'eau et l'absence d'effet négatif en termes de durabilité.

Ainsi, plusieurs dizaines de tonnes de sable et de gravillon recyclés ont ainsi pu être carbonatées en conditions semi-industrielles et mises à disposition des partenaires du projet afin d'évaluer d'une part les propriétés des granulats avant et après traitement et d'autre part les propriétés à l'état frais et à l'état durci de différents bétons constitués de ces matériaux, en incluant certains aspects de la durabilité. **Le sable recyclé et le gravillon recyclé seront utilisés en substitution du sable et des granulats utilisés normalement pour la fabrication de béton (Pernin et al., 2022).**

Ces résultats très encourageants ouvrent de nouvelles perspectives en matière d'économie circulaire et constituent une nouvelle étape dans l'abaissement de l'empreinte carbone des bétons et du procédé cimentier.

Cette perspective positive est éclairée par le fait que dans son principe, cette modalité de capture du CO<sub>2</sub> est applicable à n'importe quelle source industrielle de CO<sub>2</sub>. En effet, ce qui est envisageable pour un four de cimenterie l'est tout autant pour un four de verrerie ou une installation d'incinération de déchets. Ce principe permettra sûrement d'optimiser les distances entre sources de CO<sub>2</sub> et matériaux « puits de carbone ». Enfin, il n'est pas déraisonnable de penser que ce qui est valable pour le béton de déconstruction puisse être applicable à d'autres matériaux de démolition ou d'extraction, ce qui permettra d'élargir la diversité des matériaux traitables par le CO<sub>2</sub> industriel et contribuer ainsi plus largement à la réduction effective des émissions industrielles de CO<sub>2</sub>.

## REMERCIEMENTS

La recherche présentée est réalisée dans le cadre du Projet National FastCarb soutenu par le Ministère de la Transition écologique et solidaire.

Les auteurs remercient également l'ensemble des membres du projet national FastCarb actifs au sein du groupe de travail, le SFIC pour sa contribution exceptionnelle au financement du PN ; ainsi que les sociétés Vicat et LafargeHolcim ayant mis à disposition leurs installations industrielles pour que la réalisation de ces démonstrateurs soit possible.

## REFERENCES

Omary, S., Ghorbel, E., & Wardeh, G. (2016). Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials*, 108, 163-174.

Mazhoud, B., Sedran, T., Cazacliu, B., Cothenet, A., & Torrenti, J. M. (2022). Influence of residual mortar volume on the properties of recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, 57, 104945.

Pernin T., Robbiano L., Ben Fraj A., Ranaivomanana H., Pham G., Geffray F., Guillot X., Amiri O., Mai-Nhu J., Rougeau P., Projet National FastCarb – Propriétés des bétons contenant des granulats de béton recyclés carbonatés, *AJCE*, vol. 40(3), 2022

Sereng, M. Amélioration des propriétés des granulats recyclés par stockage de CO<sub>2</sub>: étude de la faisabilité pré-industrielle. 2020. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.

Sereng, M., Djerbi, A., Omikrine Metalssi, O., Dangla, M., Torrenti, J-M. (2021). Improvement of Recycled Aggregates Properties by Means of CO<sub>2</sub> Uptake. *Applied Sciences*. 11, 6571. <https://doi.org/10.3390/app11146571>.