

Thème

- Réduction des impacts environnementaux des ouvrages et des matériaux
- Economie circulaire
- Recyclage, recyclabilité, réemploi

FastCarb - Retours d'expérience des démonstrateurs industriels

Laurent Izoret¹, Laury Barnes-Davin², Jena Jeong³ et Xavier Guillot⁴

¹ Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH)

² VICAT

³ Ecole Spéciale des Travaux Publics du bâtiment et de l'industrie (ESTP Paris), Institut de Recherche en Constructibilité (IRC)

⁴ LAFARGEHOLCIM France

1. INTRODUCTION

Dans le Projet National FastCarb, le principal objectif est d'utiliser le béton concassé comme « puits de carbone » en profitant de la tendance naturelle de la pâte de ciment hydraté à fixer le CO₂ 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. La vitesse 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. Lors de la démolition, le mécanisme de fracturation lié au concassage met à jour des surfaces internes encore non exposées à l'air et une plus grande surface spécifique devient alors une surface d'échange avec le CO₂ atmosphérique qui sera donc fixé sous forme de CaCO₃.

Il vient alors, par le fait de la néoformation de CaCO₃, une hypothèse de réduction de porosité qu'il s'agit de vérifier. 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 hydraté et par là même, les moins facilement réutilisables du fait de leur grande porosité et du fort coefficient d'absorption d'eau en résultant (Conclusions du PN Recybéton).

Si l'on parvient à mettre en contact une source de CO₂ (les fumées industrielles, de cimenteries en particulier) et le béton concassé, tout en accélérant le processus, on disposerait alors d'une solution de captage de CO₂ dont le mécanisme de séquestration devrait produire une diminution de porosité du matériau. Si les rendements sont 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.

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 GT2-1 a travaillé en stipulant dès la réunion de lancement que le principe de travail ne serait pas de faire du développement de procédé spécifique trop chronophage, mais de s'attacher à « détourner » des installations existantes avec d'autres finalités, pour les transformer en « carbonateur » dans le contexte cimentier.

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. Les opérations fondamentales pertinentes sont le séchage, la lyophilisation et la filtration. C'est ainsi que nous avons identifié précisément le séchage par tambour rotatif, la lyophilisation à lit fluidisé et le 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 (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 (ETSP-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 d'essais.

2. CARBONATATION EN TAMBOUR ROTATIF (industriel)

Dans un tambour rotatif les GBR et le gaz de cimenterie enrichi en CO₂ 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 situé 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 a une température comprise entre 40 et 60°C et une teneur en CO₂ 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).

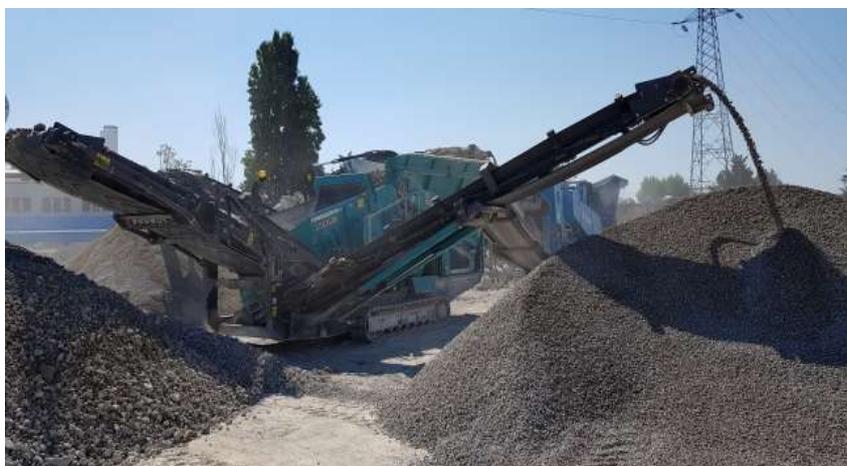


Figure 2. Plateforme de recyclage aggneo[®] de Saint-Fons

Les répartitions granulométriques de ces matériaux avant et après carbonatation dans le tambour rotatif sont données dans les figures n° 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 (+5%) 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 résulte pas en la désintégration 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 [1].

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 CO₂/t GBR pour la fraction 0/4 et de 5kg/t de GBR pour la fraction 4/16.

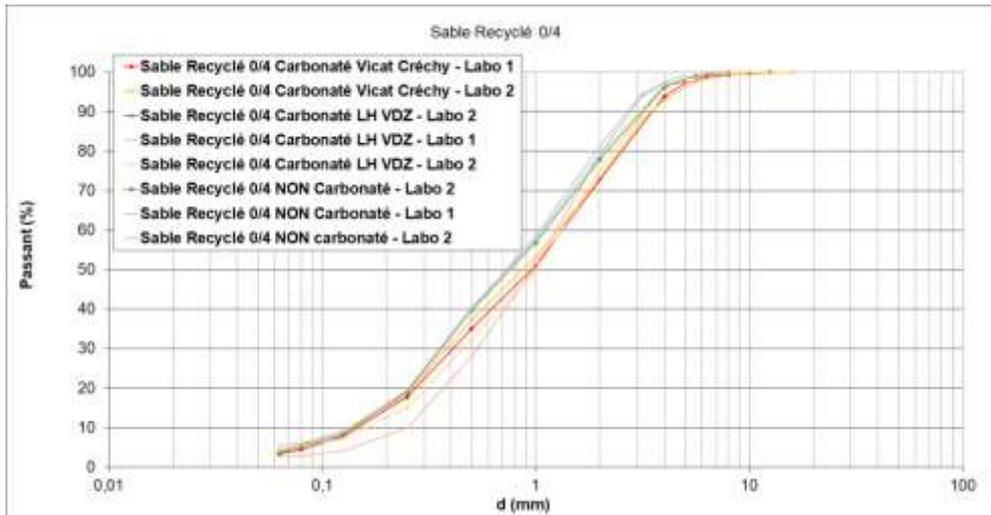


Figure 3. Courbes granulométriques du sable recyclé avant et après carbonatation selon les deux procédés

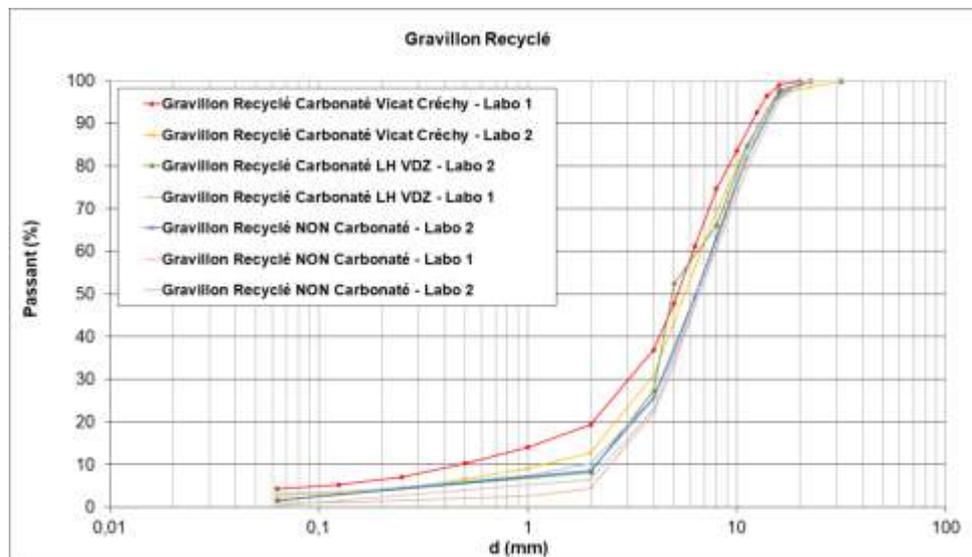


Figure 4. Courbes granulométriques du gravillon recyclé avant et après carbonatation selon les deux procédés

3. 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 cimenterie 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.

Le principe de fonctionnement est précisé sur la figure 6 :



Figure 5. Pilote FastCarb – Usine LafargeHolcim de Val d’Azergues



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 CO₂ 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 possible de surélever le carbonateur afin de faciliter l’écoulement des matériaux.
- Re-connexion 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 CO₂ 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 ₂ piégé (kgCO ₂ /T)	25 [max 36]	39 [max 49]
	Teneur en eau après carbonatation (%)	21,8	6,0
Gravillon recyclé	CO ₂ piégé (kgCO ₂ /T)	9 [max 19]	12 [max 32]
	Teneur en eau après carbonatation (%)	8,6	2,0

Tableau 1. Quantités de CO₂ piégé par les granulats recyclés dans le procédé à lit fluidisé

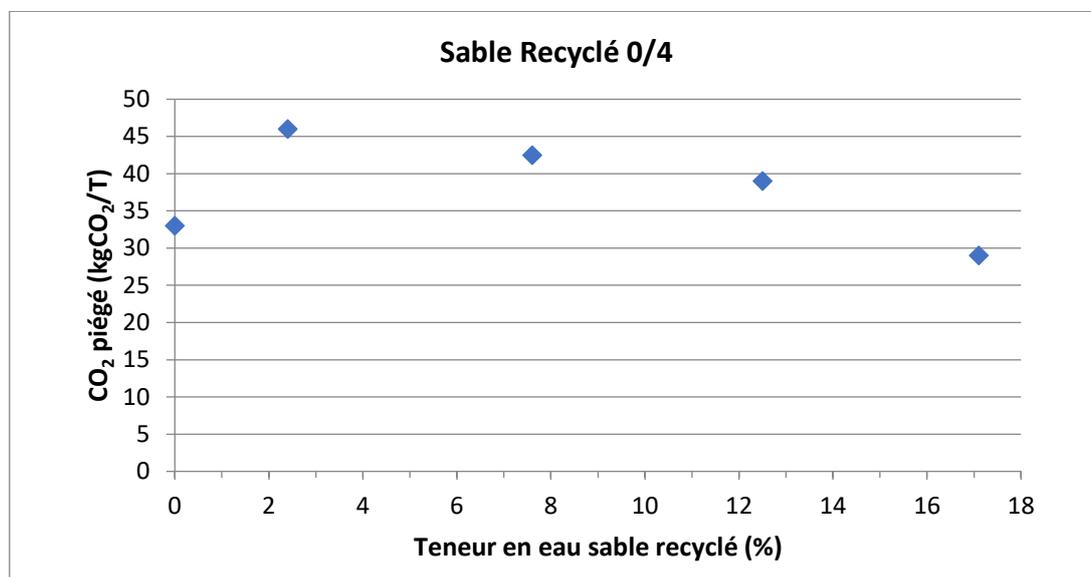


Figure 7. Détermination du CO₂ piégé par le sable recyclé en fonction de la teneur en eau - Essai en enceinte de laboratoire à 70°C pendant 3h (concentration en CO₂ de 20% et HR de 70%)

4. CARBONATATION EN FILTRE A GRAVIER (laboratoire)

Il s'agit de développer un pilote à l'échelle semi industriel afin de simuler les conditions d'un gaz issu d'une cimenterie et suivre la cinétique de la carbonatation. Un prototype expérimental semi-industriel (filtre à gravier) est en cours de préparation pour estimer et optimiser la durée et la quantité de CO₂ piégée dans un lit fixe de GBR avec un flux continu de CO₂ pur et un gaz multi-composant (NO₂ et SO₂). 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.

Le dispositif expérimental est représenté sur le schéma ci-dessous (Figure 8) 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 dans lequel des granulats de bétons recyclés (GBR) seront disposés;
- (5) Un système d'alimentation en gaz;
- (6) Un système d'extraction de gaz.

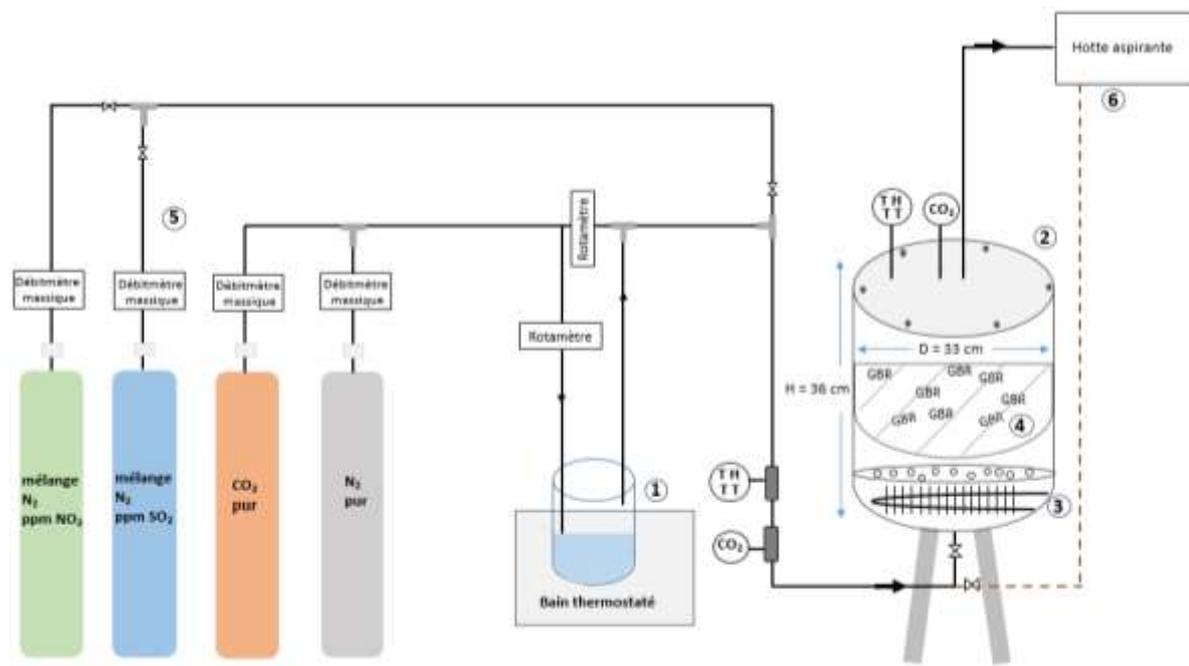


Figure 8 : Représentation schématique du Pilote de carbonatation

Le principe de cette installation a déjà été utilisé en cimenterie sous forme d'un filtre à gravier relativement simple à mettre en place et facilement automatisable et transportable. Ce pilote va permettre de simuler les conditions d'un gaz issu d'une cimenterie et suivre la cinétique de carbonatation. Le principe de l'essai consiste à humidifier le gaz (HR= 20-80%), ensuite le gaz rentre par le bas du réacteur où il sera chauffé et il va traverser le lit de granulat (GBR) pour ressortir par le haut à travers un tuyau d'évacuation qui sera fixé sur la hotte d'extraction. Les conditions d'essais peuvent être variables selon les paramètres à étudier :

- Température peut varier de 20°C à 60°C
- Pression atmosphérique
- Humidité relative du gaz sera comprise entre 50% et 80%
- Débit de gaz max 30 l/min = 0,03 m³/min
- Composition de gaz de cimenterie : CO₂ = 15%, NO₂ = 39 ppm et SO₂ = 399 ppm

Le rendement de carbonatation sera optimisé en fonction des paramètres physico- chimiques de l'installation : température, humidité, temps de contact et débit du gaz et de ceux des granulats : granularité et humidité résiduelle. De plus, ceci nous permettra de confirmer l'impact des gaz NO₂ et SO₂ pendant la carbonatation avec

CO₂ pur et le piégeage de CO₂ et vérifier notre hypothèse sur la précipitation du sulfite de calcium (CaSO₃) et du nitrocalcite Ca(NO₃)₂.

5. 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 CO₂ piégés dans les granulats recyclés en 1 heure de traitement, sont de l'ordre de 4% (40kg de CO₂ piégés par tonne 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 en cours avec le filtre à gravier ; essais qui permettront également de préciser le rôle des autres gaz présents dans les fumées industrielles, à savoir SO₂ et NO_x.

Dans notre objectif de démonstration du processus de capture du CO₂ 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.

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 CO₂ est applicable à n'importe quelle source industrielle de CO₂. 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 CO₂ 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 CO₂ industriel et contribuer ainsi plus largement à la réduction effective des émissions industrielles de CO₂.

6. 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 membres du projet national FASTCARB actifs au sein du groupe de travail GT2.1 ; ainsi que les sociétés Vicat et LafargeHolcim ayant mis à disposition leurs installations industrielles pour que la réalisation de ces démonstrateurs soit possible.

7. REFERENCE

[1] M. Sereng, « Amélioration des propriétés des granulats recyclés par carbonatation accélérée : étude de la faisabilité préindustrielle », Université Paris Est, 2020