

Résultats du projet national FastCarb : stockage de CO₂ par carbonatation accélérée du béton recyclé

RESUME L'objet du projet national FastCarb est d'étudier si l'on peut accélérer le processus de carbonatation des granulats de béton recyclé (GBR) et en tirer profit à la fois du point de vue bilan carbone et aussi recyclage de ces granulats dans des bétons. Cet article présente les résultats obtenus par le projet et ses perspectives. Dans ce cadre, ont été réalisés deux démonstrateurs industriels qui ont permis de carbonater des GBR et de fabriquer des bétons et des objets en béton contenant ces granulats. Une étude couplant ACV et économie a montré l'importance des distances de transport sur les résultats. Le projet montre finalement l'intérêt de la technique pour les sables de béton recyclé.

Mots clés béton, carbonatation, granulats recyclés, CO₂, économie circulaire

I. INTRODUCTION

Impliquant plus de 20 partenaires privés et publics, le projet FastCarb (fastcarb.fr) est le résultat de la conjonction de deux faits. D'une part, la production de ciment est une source importante de CO₂ dans le monde : le dernier rapport du GIEC estime que les émissions directes de CO₂ provenant de la décomposition du calcaire dans la production de ciment représentent environ 4,5 % des émissions totales de CO₂ fossile (1,6 % en France) (IPCC, 2021). D'autre part, une grande quantité de béton recyclé issu de la déconstruction est disponible alors que les ressources naturelles doivent être préservées. Même si les granulats de béton recyclé (GBR) peuvent déjà être utilisés dans le béton en ajustant les formulations (souvent avec une augmentation de la teneur en ciment (Ben Fraj & Idir, 2017), (Sedran, 2019), leur plus grande porosité, principalement pour les sables recyclés, a un impact négatif sur les performances des bétons réalisés avec ces granulats (Omary et al., 2016), (de Brito et al., 2016), (Tosic et al., 2021).

Cependant, les granulats recyclés incorporent des hydrates (notamment portlandite et C-S-H) qui peuvent être carbonatés rapidement. Ceci a été démontré dans des conditions de laboratoire (voir (Zhan et al., 2014) ou (Pu et al., 2021) par exemple). L'objectif du projet FastCarb est de minéraliser de manière accélérée le CO₂ au sein des GBR, d'améliorer la qualité de ces granulats de béton recyclé carbonaté (GBRC) par le colmatage de la porosité et enfin de diminuer l'impact CO₂ du béton dans les ouvrages. Le projet a deux objectifs principaux : optimiser en conditions de laboratoire un procédé de carbonatation accélérée transposable à l'échelle industrielle à un coût adapté et montrer que le procédé peut avoir un bilan positif en conditions industrielles.

Cet article présente une synthèse des résultats obtenus dans les conditions de laboratoire, puis dans des démonstrateurs à l'échelle industrielle. L'étude des bétons réalisés avec ces GBRC a

débuté et est présentée. Enfin, les premiers résultats concernant l'analyse du cycle de vie et les coûts économiques du procédé sont discutés. Certaines parties du projet telles que la modélisation, les études de bio-carbonatation ou la réalisation d'éléments en béton ne sont pas présentées.

II. CARBONATATION ACCELEREE EN LABORATOIRE

A. Facteurs affectant la carbonatation accélérée

Le taux de carbonatation des GBR dépend d'abord de l'état de saturation en eau des granulats (Zhan et al., 2014). En effet, lorsque la teneur en eau est trop faible, la quantité d'eau présente dans les pores ne permet pas une dissolution suffisante du CO₂. A l'inverse, trop d'eau contenue dans les pores ralentit la diffusion du CO₂, car la diffusion des gaz est beaucoup plus rapide dans l'air que dans l'eau. Le paramètre de la teneur en eau est donc déterminant pour favoriser l'accélération de la carbonatation et l'absorption de CO₂ (Zhan et al., 2014). De plus, ce paramètre est facilement mesurable sur une installation industrielle et peut être corrigé s'il est trop faible.

La température est un autre paramètre majeur contrôlant le taux de carbonatation du béton (Drouet et al., 2019) et des GBR (Wang et al., 2019). L'augmentation de la température provoque une accélération de la diffusion du CO₂ dans la matrice cimentaire, ce qui conduit ensuite à une augmentation de la carbonatation accélérée et donc de l'absorption du CO₂. Cependant, il existe une température optimale (inférieure à 100 °C) pour obtenir une absorption maximale de CO₂. Autre facteur, la pression partielle de CO₂ améliore évidemment la solubilité du CO₂ dans l'eau absorbée par le granulats et facilite aussi la minéralisation du carbone (Fernandes Bertos et al., 2004). Enfin, les gaz industriels, par exemple en cimenterie, contiennent d'autres gaz tels que NO₂ et SO₂ qui peuvent entrer en compétition avec le CO₂. Les GBR ont d'ailleurs un potentiel intéressant pour capter les NO_x et le SO₂.

Afin de mieux comprendre les mécanismes d'accélération de la carbonatation des GBR en conditions industrielles, des expérimentations ont été menées à l'échelle du laboratoire dans trois directions principales : caractéristiques des matériaux et paramètres environnementaux maximisant l'absorption du carbone, estimation de la capacité d'absorption de CO₂ et effet de la carbonatation rapide sur les propriétés. Des campagnes expérimentales ont été développées en conditions statiques, ou dynamiques (flux de CO₂ et tambour tournant), avec du CO₂ pur, un gaz à 15% de CO₂ ou avec des gaz multi-composants (CO₂, SO₂ et NO₂).

B. Carbonatation accélérée en conditions statiques

Les expériences sur plusieurs GBR et les résultats de ces tests ont déjà été publiés dans (Sereng et al., 2021). Les principales conclusions sont les suivantes :

- La teneur en eau est en effet le paramètre le plus important et il existe une corrélation entre la teneur en eau optimale et le coefficient d'absorption d'eau des GBR. Pour obtenir l'absorption maximale de CO₂, il est nécessaire d'avoir une teneur en eau optimale égale à environ 80% du coefficient d'absorption d'eau des GBR.

- La carbonatation diminue le coefficient d'absorption d'eau en remplissant les pores du fait de la formation de carbonates de calcium. La porosité capillaire est diminuée en raison du colmatage des pores. De plus, la carbonatation augmente la microporosité des GBR, en particulier la porosité du gel de C-S-H, à la suite de la décalcification (Kangni-Foli et al., 2021).

C. Effet de la température

L'influence de la température a été testée en introduisant un lit de GBR dans un environnement fermé (incubateur à CO₂) avec une température contrôlée (40°C) et une concentration en CO₂ égale à 15%.

Les essais statiques aux 2 températures (20°C au dessiccateur et 40°C à l'incubateur) ont été réalisés avec un granulats de 1-4mm obtenu par recyclage direct de retour de béton dans une centrale à béton prêt à l'emploi (BPE 1- 4) et un nouveau granulats de béton recyclé produit par concassage d'échantillons de laboratoire de béton ordinaire, âgés de plus de 20 ans, pour obtenir une fraction 12-20 mm (OC 12-20).

Pour tous ces essais la durée était de 24h sur granulats avec une humidité initiale préparée à 2,8%, ce qui correspondait à la teneur en eau optimale pour l'essai statique à 20°C. Les résultats de la figure 1 montrent la comparaison entre le taux d'absorption de CO₂ de l'OC 12-20 et du BPE 1-4 à 20°C et 40°C. En raison de la thermo-activation, on constate une augmentation de l'absorption de CO₂.

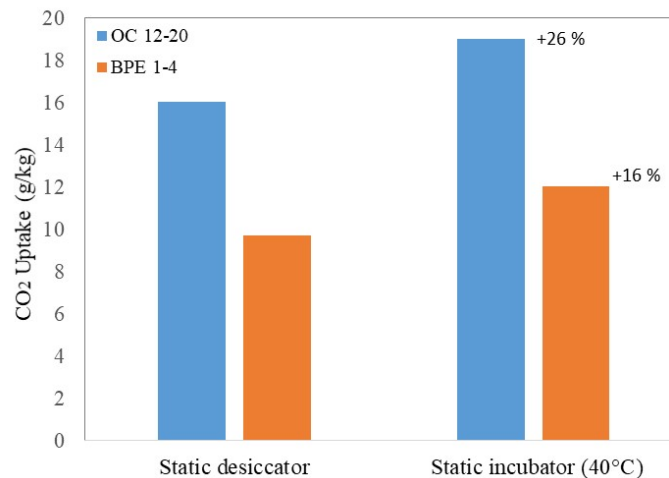


FIGURE 1. CO₂ stocké en 24h, pour les GBR OC 12-20 et BPE 1-4, à 20°C (dessiccateur) et 40°C (incubateur) avec une teneur en eau initiale de 2.8%.

D. Carbonatation accélérée en tambour tournant

Les résultats d'expériences utilisant un procédé de carbonatation accélérée en tambour tournant ont déjà été publiés (dos Reis et al., 2020), (dos Reis et al., 2021). Seuls les principaux résultats sont résumés ici.

La rotation du tambour a un effet d'attrition sur les granulats, ce qui facilite leur carbonatation. La vitesse de rotation influence la cinétique de carbonatation. La rotation permet

un mélange continu des particules solides avec le gaz ce qui permet de meilleures performances en termes de séquestration du CO₂. Enfin, la rotation a favorisé l'abrasion entre les GBR, ce qui améliore l'efficacité de l'ensemble du processus de carbonatation.

E. Carbonatation accélérée dans le cas de gaz multi-composants

Les gaz multi-composants contenant du CO₂, du SO₂ et du NO_x, comme les fumées industrielles, peuvent influencer la minéralisation du CO₂. Dans l'expérimentation réalisée, un gaz multi-composants a été introduit dans un incubateur à température, débit de gaz et humidité relative contrôlés. L'alimentation en gaz était assurée par une bouteille de mélange CO₂/air (teneur en CO₂ de 15%) et une bouteille de mélange CO₂/SO₂/NO₂/air (15% de CO₂, 390 ppm de NO₂ et 35ppm de SO₂). L'humidité relative dans l'incubateur a été régulée avec une solution de sel de nitrate d'ammonium (NH₄NO₃) à 63%. La température était égale à 21°C. Les essais ont été poursuivis jusqu'à carbonatation complète, vérifiée par la phénolphthaléine dans une coupe de quelques GBR.

Trois types de GBR ont été produits à partir d'échantillons de béton de laboratoire, conservés dans l'eau pendant 5 mois, puis broyés. Ces bétons ont été fabriqués avec du ciment CEM I, CEM II et CEMIII respectivement, à raison de 350 kg/m³ (F1, F2 et F3). Des granulats siliceux ont été utilisés dans ces mélanges. La composition chimique des échantillons a été testée avant et après carbonatation par ATG, après plusieurs durées de carbonatation (entre 0 et 1, 2, ..., 8 jours). Le CO₂ stocké a été déterminé sur les mesures ATG, par différence de masse entre 550 et 850°C.

Les résultats des essais de carbonatation sont donnés dans le tableau 1. L'absorption de CO₂ est conforme aux attentes : celle des granulats F1 et F2 était assez similaire, tandis que le granulats F3, produit avec un ciment CEMIII, a absorbé environ la moitié de la quantité. On peut observer que le gaz multi-composants a réduit la capacité de minéralisation du CO₂ d'environ 25%, pour les 3 types de GBR ce qui traduit une compétition entre gaz pour la fixation aux GBR.

TABLEAU 1. Estimation du CO₂ stocké pendant la carbonatation

	F1	F2	F3
Mélange CO ₂ /air (g/kg)	56,1	62,3	34,1
Gaz multi-composants (g/kg)	36,7	47,2	26,7

L'identification des gaz adsorbés lors de la carbonatation a également été réalisée par spectroscopie de masse couplée à l'ATG pour F1 et F3. Les résultats de l'analyse de la quantité de gaz CO₂, NO₂ et SO₂ adsorbés sont présentés dans le tableau 2. Ils montrent que NO₂ et SO₂ ont été bien adsorbés et/ou précipités. Par rapport à la concentration de NO₂ dans le gaz multi-composants, une quantité significative de NO₂ a été piégée lors de la précipitation des carbonates de calcium. Cela pourrait expliquer une plus faible quantité de CO₂ piégé dans le cas multi-constituant que dans le cas CO₂/air. Ce phénomène est similaire dans le cas de F1 et F3. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que, d'une part, la dissolution du CO₂ diminue en présence de NO₂ et SO₂, et, d'autre part, la compétitivité entre ces trois gaz est importante.

Le couplage gaz multi-composants – température va enfin être étudié dans la dernière partie du projet FastCarb à l'aide d'un réacteur de type filtre à gravier. Les résultats obtenus permettront de se rapprocher des conditions industrielles de la carbonatation accélérée.

III CARBONATATION ACCELEREE : LES DEMONSTRATEURS

Dans le cadre du projet FastCarb 3 démonstrateurs industriels ont été développés. Ils sont présentés ci-après.

III.A Sécheur à tambour rotatif

Le tambour rotatif constituant le pilote Fastcarb installé depuis fin 2019 dans l'usine Vicat de Créchy est long de 11 m et a un rayon de 2 m (Fig. 2). Le carbonateur est directement connecté aux gaz de cimenterie par des conduites métalliques. Dans un tambour rotatif les GBR et le gaz de cimenterie enrichi en CO₂ circulent à contre flux. Le mouvement rotatif associé aux relevateurs soudés aux blindages du tube permet de mettre en contact avec le gaz toutes les surfaces des granulats.

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 2. Pilote FastCarb – Tambour sécheur, usine Vicat de Créchy (Allier)

III.B Lit fluidisé

Le démonstrateur FastCarb installé depuis début 2020 à l'usine LafargeHolcim de Val d'Azergues (69) 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 (figure 2). Le 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 3. Pilote FastCarb – Sécheur à lit fluidisé, usine Lafarge de Val d’Azergues (Rhône).

III.C Comparatif des performances

Les taux de captation de CO₂ par les GBR ont varié entre 0 et 39 kg de CO₂/t de GBR pour la fraction sable et 2 à 12 kg de CO₂/t de GBR pour la fraction gravillons. Les raisons de ces variations sont, outre les différences entre les deux carbonateurs :

- i) Le stockage à l’air libre des GBR réduit considérablement le potentiel de stockage de CO₂.
- ii) L’optimisation de procédé reste une étape indispensable : l’optimisation de l’installation réalisée pour le lit fluidisé montre un gain de captation de CO₂, en particulier avec une meilleure maîtrise de l’humidité et de la température des gaz dans le carbonateur, que l’on sait être les deux paramètres de premier ordre pour la cinétique de carbonatation, avec la teneur en CO₂ des gaz.

III.D Carbonatation dans un 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 CO₂ afin de tamponner les eaux de lavage de ses installations. Le principe (figure 4) est très simple : on place des granulats recyclés dans le conteneur qui est ensuite fermé de manière étanche et on injecte du CO₂ jusqu’à atteindre 30% de CO₂ dans le volume du conteneur. Du 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 CO₂ égal à 28kg/t des GBR utilisés et une baisse de 2% de l’absorption d’eau du sable (qui passe de 7,4 à 5,3%).



FIGURE 4. Vue du conteneur Clamens et de son système d'injection.

IV PROPRIETES DES BETONS CONFECTIONNES A L'AIDE DE GBR CARBONATES

Cette partie traite des propriétés de bétons contenant des GBR carbonatés provenant des deux démonstrateurs décrits aux paragraphes III.B et III.C. L'étude expérimentale permet de mesurer l'impact du traitement au CO₂ sur la densité des granulats et leur contribution aux performances mécaniques des bétons dans lesquels ils sont recyclés afin d'identifier tout impact sur l'optimisation de la formulation. La contribution du traitement au CO₂ aux propriétés de durabilité est également étudiée, en particulier vis-à-vis du risque de corrosion dans le béton armé.

Deux familles de béton (C25/30 et C45/50) sont étudiées avec 7 compositions différentes de granulats (tableau 2). Pour simplifier la terminologie, les granulats naturels sont nommés NS (Natural Sand) et NG (Natural Gravel), les GBR sont nommés RS (Recycled Sand) et RG (Recycled Gravel), et les GBR carbonatés sont nommés CRS1 et CRS2 (Carbonated Recycled Sand), CRG1 et CRG2 (Carbonated Recycled Gravel), respectivement pour les cimenteries (1 - Val d'Azergues, carbonateur à lit fluidisé) et (2 - Créchy, carbonateur à tambour roulant).

Les bétons répondent aux exigences des classes d'exposition XC4 / XF1 (tableau NA.F.1) de la norme NF EN 206/CN. A l'exception des granulats, les 14 bétons sont similaires en termes d'autres constituants : même type de ciment CEM II/A, même adjuvant, même eau de gâchage. La consistance visée est S4 pour tous les bétons.

Les conclusions des essais à ce jour sont que quel que soit le processus de carbonatation des granulats recyclés utilisé, il n'entraîne pas d'effets significatifs sur les propriétés des granulats recyclés de nature à modifier les tendances observées sur les propriétés du béton (état frais, résistance mécanique, durabilité) i.e. les granulats recyclés carbonatés peuvent s'utiliser selon les mêmes conditions d'emploi que celles définies dans les recommandations du PN Recybéton (Recybeton, 2018).

Cette conclusion peut sembler un peu décevante car il était espéré au début du projet que le traitement de carbonatation améliore la qualité des granulats de béton recyclé et donc les propriétés des bétons les contenant. Comme on a vu que, en effet, la qualité des granulats est améliorée (par exemple moins d'absorption d'eau ou de porosité), nous étudions actuellement la

possibilité que le malaxage dégrade la couche extérieure carbonatée et fasse perdre l'avantage acquis pendant la carbonatation. De ce point de vue, il est vraisemblable que la fraction sable soit plus stable mais elle était minoritairement utilisée dans les bétons du tableau 2.

TABLEAU 3. Composition des 14 bétons étudiés dans le projet

		Sand				Gravel			
		NS (%)	RS (%)	CRS1 (%)	CRS2 (%)	NG (%)	RG (%)	CRG1 (%)	CRG2 (%)
C25/30	B1_C25_100NS-100NG	100				100			
	B2_C25_20RS-50RG	80	20			50	50		
	B3_C25_20CRS1-50CRG1	80		20		50		50	
	B4_C25_20CRS2-50CRG2	80			20	50			50
	B5_C25_40RS-100RG	60	40				100		
	B6_C25_40CRS1-100CRG2	60		40				100	
	B7_C25_40CRS2-100CRG2	60			40				100
C45/50	B8_C45_100NS-100NG	100				100			
	B9_C45_100NS-50RG	100				50	50		
	B10_C45_100NS-50CRG1	100				50		50	
	B11_C45_100NS-50CRG2	100				50			50
	B12_C45_100NS-100RG	100					100		
	B13_C45_100NS-100CRG1	100						100	
	B14_C45_100NS-100CRG2	100							100

V ANALYSE DU CYCLE DE VIE ET ANALYSE ECONOMIQUE

V.A Analyse du cycle de vie

Le projet de recherche FastCarb évalue les avantages possibles de la carbonatation minérale, à la fois en termes de valorisation des granulats de béton et d'absorption de CO₂. La présente recherche vise à évaluer les impacts environnementaux des procédés de carbonatation accélérée, en se basant sur une approche de cycle de vie.

Les données spécifiques au procédé de carbonatation minérale ont été collectées, en relation avec les partenaires industriels impliqués dans le projet. L'unité fonctionnelle choisie est une tonne de granulats de béton recyclé carbonaté fournie au chantier de construction. Les limites du système incluent les différentes étapes du cycle de vie des granulats de béton recyclé carbonaté, depuis le concassage sur le site de démolition/déconstruction (site d'utilisation antérieure) jusqu'au chantier de construction (à l'exclusion de la mise en œuvre sur site et de la production de béton).

L'inventaire des émissions et extractions est calculé à partir des flux de référence définis pour le démonstrateur VICAT (Saadé et al., 2021) et de la base de données générique ecoinvent 3.7. Les valeurs pour le processus de recyclage des GBR sont issues de (Mousavi et al., 2020). L'analyse d'impact est réalisée avec l'ensemble des indicateurs recommandés par la norme EN 15 804+A2, fournie dans le paquet de méthodes d'évaluation environnementale compatible avec ecoinvent 3.7 via le logiciel OpenLCA.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- La distance de transport induite par le procédé de recarbonatation est un facteur important du bilan.

- La carbonatation de la fraction 4-16 mm présente peu d'intérêt car la quantité de CO₂ liée est faible, et du même ordre de grandeur que le CO₂ émis lors du processus de carbonatation.

- La carbonatation de la fraction 0-4 mm est plus intéressante en termes d'absorption de CO₂. Le sable de béton recyclé ayant un faible impact environnemental (la déconstruction étant incluse dans le cycle de vie du béton initial), sa réutilisation après carbonatation devrait permettre qu'il ait un bilan initial négatif.

V.B Analyse économique

Une analyse coûts/bénéfices a été réalisée afin d'évaluer la viabilité économique des procédés de carbonatation accélérée. Les données des deux démonstrateurs industriels du projet ont été utilisées. L'analyse a nécessité de comparer les coûts de production et les avantages associés au processus de carbonatation accélérée aux coûts de solutions plus traditionnelles. Quatre scénarios ont été élaborés et examinés (figure 5) :

- Scénario A : utilisation de granulats naturels.
- Scénario B : utilisation de granulats recyclés pour les routes.
- Scénario C : utilisation de granulats recyclés pour le bâtiment.
- Scénario D : utilisation de granulats recyclés après carbonatation accélérée.

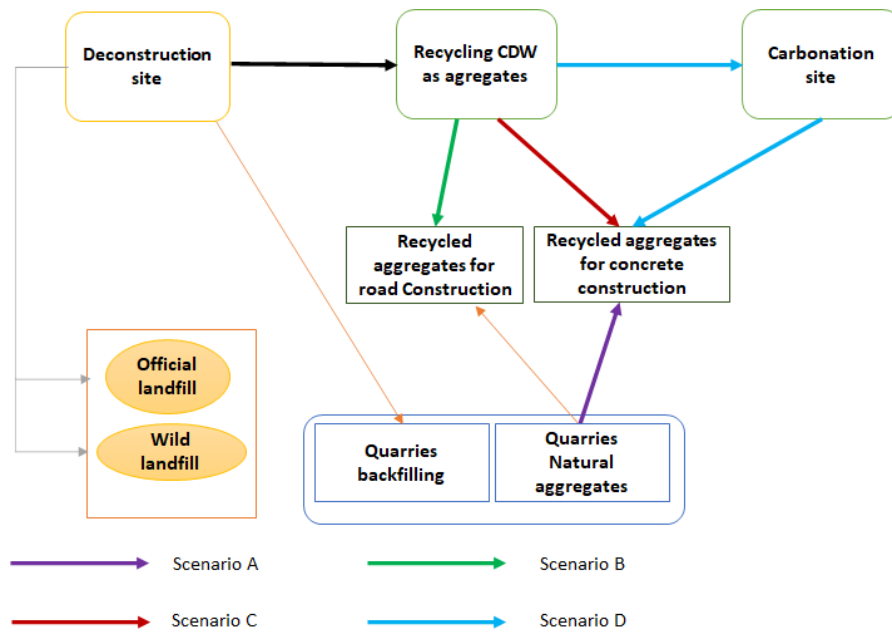


FIGURE 5. Les différents scénarii étudiés.

L'analyse de ces scénarios consiste à formuler des hypothèses sur les distances entre les carrières/platformes de recyclage et les sites de fabrication du béton. Une distance maximale de 30 kilomètres a été retenue pour les granulats naturels tandis que les distances minimale et maximale entre la plateforme de recyclage et le site de fabrication du béton étaient respectivement de 5 et 25 kilomètres. Cependant, il était nécessaire de prendre en compte les flux amont et aval. Dans la moitié des cas, les camions sont vides lorsqu'ils atteignent la plate-forme. Par conséquent, les distances minimales et maximales parcourues par les camions étaient de 7,5 et 37,5 kilomètres.

Le scénario D nécessite d'intégrer une hypothèse concernant la distance entre le site de carbonatation (la cimenterie dans le cas des démonstrateurs) et le site de construction. Comme le nombre de cimenteries situées à proximité de grandes zones urbaines reste limité, nous avons supposé que le processus de carbonatation pouvait également avoir lieu dans n'importe quelle usine générant des émissions de CO₂ et capable de capter le CO₂. Nous avons supposé que la distance couvrirait un spectre allant de 5 à 50 kilomètres.

Les coûts de construction, de maintenance et d'exploitation du démonstrateur ont été compilés et le coût d'une tonne de granulats recyclés carbonatés a été calculé en jouant sur deux variables : 1) la distance parcourue par les camions qui chargent et déchargent les granulats au cours de leur transformation (concassage, recyclage, carbonatation) et 2) le coût du transport qui se situerait dans une fourchette de 1 à 2 euros pour une tonne sur 10 kilomètres (soit entre 2,50 € et 5 € pour un camion de 25 tonnes parcourant 1 kilomètre). Le coût des granulats naturels à la sortie de la carrière était de 13 euros. Les coûts des granulats recyclés pour la route et le bâtiment étaient respectivement de 11 et 13 euros. L'application de ces hypothèses au démonstrateur développé par Vicat indique que les granulats recyclés carbonatés souffrent d'un désavantage compétitif par rapport aux solutions traditionnelles. Ceci est dû aux coûts de transport et à un processus industriel supplémentaire. Lorsque les distances de transport sont maximales, l'écart est énorme.

Ensuite, la viabilité économique du processus de carbonatation industrielle a été examinée en tenant compte de l'évaluation environnementale basée sur la méthode de l'analyse du cycle de vie qui quantifie les impacts environnementaux (cf. 7.1). Ainsi, le CO₂ émis et lié au cours du procédé et du transport des granulats a été comptabilisé. Chaque tonne de CO₂ a été tarifée en fonction de l'évolution du marché du carbone.

Pour la fraction grossière, les calculs (figure 6) ont indiqué que le carbone émis au cours du processus industriel était plus élevé que les gains de carbone issus de la carbonatation. Par conséquent, le désavantage concurrentiel était encore pire. Pour la fraction sableuse, les gains liés à la capture du carbone étaient plus élevés que le carbone émis au cours du processus. Ces gains et l'évolution du prix de la tonne de carbone réduiraient le prix des granulats recyclés carbonatés (fraction sable).

Cette analyse a montré que le transport est la variable prédominante dans la viabilité économique des granulats recyclés carbonatés. Ceci est en accord avec les conclusions de (Dias et al., 2021) dans le cas des granulats recyclés au Portugal et de (Braymand et al., 2019) qui ont montré que la distance entre les villes, les sites de granulats naturels et les plateformes de recyclage impactait fortement les résultats de l'analyse environnementale liée à la production de granulats recyclés. Les résultats indiquent également que la mise en place d'un procédé de carbonatation sur un site de déconstruction ou une plateforme de recyclage permettrait probablement d'augmenter la compétitivité de cette approche. De plus, une optimisation des coûts de transport serait possible.

Enfin, plus le niveau de prix de la tonne de CO₂ sur le marché ETS sera élevé et plus le procédé sera intéressant : au 1^{er} juin il dépassait 80€ ce qui renforce la compétitivité du procédé pour la fraction sable.

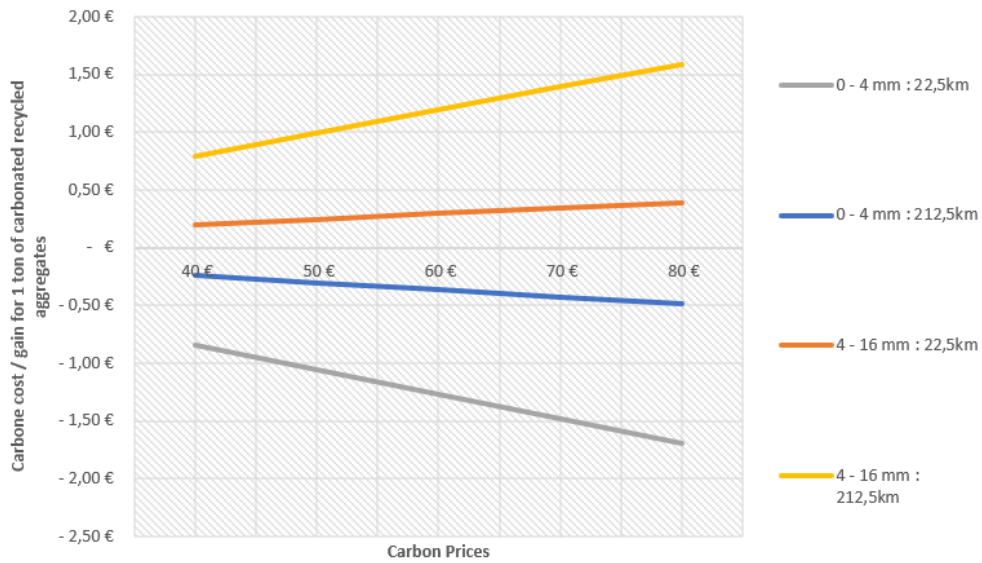


FIGURE 6. Analyse de sensibilité économique au prix du CO₂ sur le marché ETS

VI CONCLUSIONS

Le projet national FastCarb, qui s'achèvera en 2022, a déjà permis de tirer certaines conclusions concernant la carbonatation accélérée des granulats de béton recyclé. Les expériences en laboratoire et la modélisation ont confirmé l'influence de plusieurs paramètres tels que la teneur en eau des granulats, la température et la taille des granulats. Une relation entre la teneur en eau optimale et l'absorption d'eau a également été obtenue. La carbonatation accélérée améliore l'absorption d'eau des GBR, en particulier pour la fraction sableuse.

A l'échelle industrielle, des démonstrateurs ont été développés. Deux de ces démonstrateurs ont été installés dans des cimenteries où il était possible d'utiliser directement les gaz issus du four. La quantité de CO₂ stockée a été jusqu'à 40kg/t de GBR pour la fraction sableuse. Des bétons incorporant ces GBR carbonatés ont été fabriqués et ont permis de montrer que l'emploi de ces bétons pouvait se faire comme pour des GBR classiques.

L'ACV et l'étude économique sur ces démonstrateurs confirment que la fraction sableuse des GBR est le matériau le plus intéressant pour l'absorption du CO₂. Le sable recarbonaté a même un poids négatif initial du point de vue du CO₂. Ceci est également intéressant pour un objectif d'économie circulaire car le sable de béton recyclé est en fait difficilement utilisable dans les bétons fabriqués avec des RCA.

Le projet Fastcarb montre que la carbonatation accélérée est réalisable à l'échelle industrielle avec des résultats conformes aux expériences de laboratoire et avec des impacts positifs lorsque le transport des GBR est limité. La quantité de CO₂ qui pourrait être minéralisée ne résoudra pas à elle seule le problème des émissions de CO₂ de l'industrie du béton mais constitue une contribution possible et intéressante pour favoriser l'économie circulaire et dans le cadre de la RE2020.

Remerciements

La recherche présentée a été réalisée dans le cadre du projet FastCarb soutenu par le Ministère de la Transition écologique.

REFERENCES

- Ben Fraj A., & Idir R. (2017). Concrete based on recycled aggregates–Recycling and environmental analysis: A case study of Paris’ region. *Construction and Building Materials*, 157, 952-964
- Braymand S., Feraille A., Serres N., Idir R., Life cycle analysis of recycled concrete, in de Larrard, F., & Colina, H. (Eds.). (2019). *Concrete Recycling: Research and Practice*. CRC Press
- De Brito, J.; Ferreira, J.; Pacheco, J.; Soares, D.; Guerreiro, M. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. *J. Build. Eng.* 2016, 6, 1–16
- Dias, A. B., Pacheco, J. N., Silvestre, J. D., Martins, I. M., & de Brito, J. (2021). Environmental and Economic Life Cycle Assessment of Recycled Coarse Aggregates: A Portuguese Case Study. *Materials*, 14(18), 5452
- Dos Reis, G. S., Cazacliu, B. G., Artoni, R., & Torrenti, J. M. (2020). Effect of the accelerated carbonation treatment on the recycled sand physicochemical characteristics through the rolling carbonation process. *Journal of CO₂ Utilization*, 39, 101181.
- Dos Reis, G. S., Cazacliu, B., Artoni, R., Torrenti, J. M., Hoffmann, C. S., & Lima, E. C. (2021). Coupling of attrition and accelerated carbonation for CO₂ sequestration in recycled concrete aggregates. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100106
- Drouet, E., Poyet, S., Le Bescop, P., Torrenti, J.-M., Bourbon, X., Carbonation of hardened cement pastes: Influence of temperature, *Cem. Concr. Res.* 2019, 115, 445–459
- Fernandez Bertos, M.; Simons, S.J.R.; Hills, C.D.; Carey, P.J. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. *J. Hazard. Mat.* 2004, 112, 193–205
- IPCC report AR6 WGI, chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks, 2021
- Kangni-Foli, E., Poyet, S., Le Bescop, P., Charpentier, T., Bernachy-Barbé, F., Dauzères, A. & de Lacaillerie, J. B. D. E. (2021). Carbonation of model cement pastes: The mineralogical origin of microstructural changes and shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 144, 106446
- Omary S, Ghorbel E, Wardeh G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construct Build Mater.* 2016; 108:163–174

Mousavi, M., Ventura, A. & Antheaume, N. (2020), Decision-based territorial life cycle assessment for the management of cement concrete demolition waste, *Waste Management & Research*, 38(12):1405-1419

Pu, Y.; Li, L.; Wang, Q.; Shi, X.; Luan, C.; Zhang, G.; Fu, L.; El-Fatah Abomohra, A. Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: A state-of-the-art review. *Constr. Build. Mat.* 2021, 282, 122671

Recybéton, Comment recycler le béton dans le béton, Recommandations du projet national Recybéton, Irex, 2018

Saadé M., Feraille A., Rospars C., Torrenti J.M., Captage de CO₂ : analyse du cycle de vie d'un processus de carbonatation de granulats de béton recyclés, GC2021, 2021.

Sedran T., Chapter 15: Adaptation of existing methods to incorporate recycled aggregates, in *Concrete Recycling Research and Practice*, 1st Edition, Edited by Francois de Larrard, Horacio Colina, CRC Press, 636p, ISBN 9781138724723, march 2019

Sereng, M.; Djerbi, A.; Metalssi, O.O.; Dangla, P.; Torrenti, J.-M. Improvement of Recycled Aggregates Properties by Means of CO₂ Uptake. *Appl. Sci.* 2021, 11, 6571

Tošić N., Torrenti J.M., Sedran S., Ignjatović I., Towards a codified design of recycled aggregate concrete structures: background for the new fib Model Code 2020 and Eurocode 2, *Structural Concrete*, 2021

Wang, D.; Noguchi, T.; Nozaki, T. Increasing efficiency of carbon dioxide sequestration through high temperature carbonation of cement-based materials. *J. Clean. Prod.* 2019, 238, 117980

Zhan, B.; Poon, C.S.; Liu, Q.; Kou, S.C.; Shi, C. Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties. *Constr. Build. Mat.* 2014, 67, 3–7.