

Thème

ANALYSE ECONOMIQUE D'UN PROCEDE DE CARBONATATION ACCELEREE DES GRANULATS DE BETONS RECYCLES

Frédéric Bougrain et Mathilde Doutreleau

CSTB, Direction de l'Analyse et des Etudes Economiques

1 Introduction

L'industrie cimentière est l'une des plus émettrices de gaz à effet de serre. Si au niveau français, elle contribue à 2,9% des émissions de CO₂, à l'échelle mondiale ce taux atteint 6%. Sous l'effet des pressions écologiques, des progrès ont été réalisés. Son empreinte carbone a notamment été réduite de 39% au cours des trente dernières années.

Néanmoins, face l'urgence climatique et aux évolutions réglementaires qui vont de pair, les industriels ont conscience qu'il convient de développer des solutions qui conduisent à une réduction drastique des émissions de CO₂ et permettent au béton de rester compétitif.

Le seul recyclage du béton dans le béton testé dans le projet national RECYBETON permet d'économiser une ressource naturelle (sable et gravillon deux des composants du béton) qui tend à se raréfier. En revanche cette seule solution ne permet pas d'améliorer l'impact environnemental de cette filière fortement émettrice de gaz à effet de serre.

La carbonatation accélérée des bétons qui est au cœur du projet national FastCarb fait partie des solutions envisageables qui doivent permettre à l'industrie de baisser ses émissions de CO₂ de 80% d'ici 2050. Le travail de recherche mené dans le projet a permis de valider, sur les plans théorique et expérimental, le concept technique de carbonatation accélérée des granulats de béton recyclés. Les industriels impliqués dans le projet ont de leur côté conçu différents procédés de carbonatation accélérée. À la suite des différents tests industriels, seuls les démonstrateurs des sociétés VICAT et LAFARGEHOLCIM ont été retenus. L'analyse qui suit, examine la viabilité économique du démonstrateur VICAT qui est raccordé au four de la cimenterie de Créchy (Allier). Le choix d'une cimenterie comme lieu de carbonatation est spécifique au projet FastCarb. Afin d'optimiser les coûts de transport, d'autres secteurs émetteurs de CO₂ tels que le raffinage, la sidérurgie, la chimie, la production de verre, etc. pourraient être intéressés par ce procédé.¹ Pour tenir compte d'une meilleure localisation potentielle du site de carbonatation des analyses de sensibilité intégrant la distance parcourue par les granulats naturels, les granulats recyclés à usage routier / bâtiment et les granulats recyclés-carbonatés sont proposées. Ce point est essentiel dans la mesure où les coûts de transport sont susceptibles d'impacter la compétitivité des solutions industrielles envisagées. Par ailleurs, la viabilité économique de ces

¹ Les cimenteries font partie des 1 300 entreprises françaises des secteurs de l'énergie et de l'industrie soumises au Système Communautaire d'Echange des Quotas d'Emissions (SCEQE – UE – cf : infra 6.1. Le marché européen du carbone)

procédés industriels à moyen et long terme est examiné selon les évolutions du prix du quota d'émissions carbone.

2 Les flux de granulats : du chantier de déconstruction au chantier de construction

Dans la construction, les flux sont multiples, complexes et ils échappent parfois à la comptabilité nationale. En 2014, la construction et le génie civil ont ainsi eu recours à 326 millions de tonnes de granulats naturels (2 millions étaient importées). 24 millions de tonnes de granulats résultaient du recyclage (déconstruction et déchets de l'industrie). A ces deux ensembles s'ajoutaient 71 millions de tonnes issues du réemploi sur chantier soit un total de 423 millions de tonnes mis en œuvre (112 dans le bâtiment et le reste dans les travaux publics).

Les déchets inertes issus de la déconstruction (215 millions de tonnes) étaient réemployés sur le chantier (71 Mt), utilisés au remblaiement des carrières (49 Mt), recyclées sur des plateformes avant de bénéficier de nouveaux aux activités des travaux publics (18 Mt) et dirigées vers des Installations de Stockage des Déchets Inertes (ISDI 36 Mt). 41 millions de tonnes avaient une destination inconnue.

Le caractère pondéreux des granulats fait que le transport représente une des principales contraintes que doivent résoudre les parties prenantes de la logistique du chantier. Cette contrainte est d'autant plus forte qu'elle se double d'un impact environnemental important lorsque le mode de transport choisi est de type routier. De ce fait, les entreprises de démolition tendent à circonscrire leurs actions à un rayon de vingt kilomètres de leurs installations et les plateformes de recyclage réceptionnent rarement des matériaux qui proviennent d'un rayon supérieur à vingt kilomètres. La compétitivité des matériaux pondéreux dépend ainsi étroitement de la distance qui sépare leur usage de leur origine. Le recours à des granulats recyclés est plus favorable dans et autour des grandes agglomérations qui bénéficient de gisements conséquents liés à la multitude de chantiers de déconstruction alors que leur accès au granulat naturel est moins aisé.

Les aspects logistiques influencent fortement l'équation économique des opérations de déconstruction / construction et par conséquent la politique de gestion des déchets. Cela constitue même souvent un facteur central dans l'arbitrage entre un recyclage sur plateforme ou sur chantier voire même entre le recyclage et la mise en décharge. La carbonatation accélérée qui consiste à ajouter une étape supplémentaire au processus de transformation du granulat de béton se traduira par un flux logistique additionnel dès lors que cette carbonatation se déroulera dans une usine (par exemple une cimenterie). Néanmoins, cette logique de proximité géographique n'est pas systématique comme le rappelle Mongeard (2017).

D'une part, les acteurs raisonnent parfois en distance-temps plutôt qu'en distance-coût. Des centres proches mais moins facilement accessibles à cause de routes congestionnées ou de la nécessité de traverser une agglomération ne sont pas toujours privilégiés. De même, la qualité des services offerte par la plateforme constitue une variable d'arbitrage. Si une plateforme de recyclage éloignée propose des granulats naturels, elle bénéficie d'un atout par rapport à une plateforme plus proche qui ne stocke pas de granulats naturels. La fluidité de son site constitue un autre atout. Des camions qui livrent, sont rapidement déchargés (puis chargés si nécessaire) et restent donc peu de temps immobilisés sur une plateforme.

D'autre part, une logique de proximité relationnelle se substitue parfois à la logique de proximité géographique. Le partage de certaines valeurs entre recycleurs et entreprises de déconstruction, des relations d'affaires antérieures conduisent ainsi parfois à ne pas sélectionner la plateforme la plus proche.

Les sites industriels qui pourraient s'avérer intéressants pour une carbonatation accélérée sont souvent implantés loin des villes mais proches des axes routiers principaux. Le risque est donc élevé de ne pas avoir une convergence spatiale entre les plateformes de recyclage localisées le plus souvent à la périphérie des centres urbains et les sites de carbonatation.

Figure 1 : Les cimenteries en France



Dans le cadre du projet, c'est une cimenterie qui a été retenue. Ce cas est privilégié puisque la carbonatation accélérée doit contribuer à améliorer le bilan carbone de l'industrie. La figure 1 traduit la mauvaise couverture territoriale des cimenteries. L'Ouest et le Sud-Ouest sont faiblement dotés. Deux départements, l'Isère et la Moselle comptent deux cimenteries.

3 Analyse économique de la carbonatation des GBR : le cadre théorique et les hypothèses de calcul

3.1 Les hypothèses relatives aux prix des granulats naturels et des granulats recyclés

Les granulats issus de la carbonatation entrent en concurrence avec les granulats naturels mais aussi avec les granulats recyclés. Ces derniers sont valorisés soit en sous-couche routière, soit dans le béton pour les bâtiments.

Le prix des granulats naturels est variable selon les régions. La qualité et l'abondance de la ressource influencent beaucoup les prix pratiqués. Devant la diversité des tarifs et l'impossibilité de comparer des matériaux qui ne sont pas homogènes, il a été décidé de s'appuyer sur certains prix obtenus auprès d'experts lors du projet RECYBETON. Deux séries de données avaient été communiqués par certains acteurs du projet. Elles devaient correspondre à environ 80% des cas. Le tableau 1 indique les données transmises par ces experts et précise le tarif retenu pour la suite de l'analyse.

Tableau 1 : Tarifs retenus pour le granulat naturel et les granulats recyclés

	Prix en € - expert n°1 (données 2014)	Prix en € - expert n°2	Tarif retenu € par tonne
Granulat naturel à usage béton	7,8 à 10,4/t (HT)	12 à 13/t	13
Granulat recyclé pour la route	7,9 à 8,4/t	8 à 14/t	11
Granulat recyclé pour le bâtiment	Aucun retour d'expérience	Surcoût du criblage de 1 à 2€	13

3.2 Les hypothèses liées aux distances entre sites d'approvisionnement, de transformation et d'utilisation des granulats recyclés et carbonatés

Les flux logistiques permettant d'obtenir du granulat recyclé et carbonaté sont au nombre de trois :

1. Du chantier de déconstruction à la plateforme de recyclage (flux 1) ;
2. De la plateforme de recyclage au site de carbonatation (flux 2) et
3. Du site de carbonatation au site de production du béton (flux 3).

Les coûts liés au premier flux ne seront pas pris en compte puisque les prix donnés par les experts sont ceux au départ des plateformes de recyclage.

Les distances parcourus de la plateforme de recyclage au site de carbonatation (flux 2) : Les sites permettant la carbonatation accélérée (cimenteries), ne sont pas répartis de façon équilibrée sur le territoire national (cf. figure 1). Sur cette base, une distance maximale de 50 kilomètres entre le site de recyclage des granulats de béton et celui de la carbonatation a été retenue. La distance minimale est supposée égale à 5 kilomètres.

Le camion qui chargera le granulat de béton recyclé (GBR) sur la plateforme de recyclage pour le transporter vers la cimenterie (site de la carbonatation accélérée) apportera une fois sur deux des déchets ou des granulats naturels (les plateformes de recyclage stockent fréquemment des granulats naturels dans cette optique). La distance parcourue par un camion pour accéder à la plateforme de recyclage est supposée s'étendre entre 5 et 25 kilomètres. Cette donnée résulte de l'analyse opérée au stade de la section 2 qui révélait que les plateformes de recyclage des centres urbains recevaient rarement des déchets inertes provenant d'un rayon supérieur à 20 kilomètres. Comme cette assertion est sans doute moins stricte en dehors des centres urbains et que le critère « distance-temps » et la « proximité relationnelle » jouent, cette barrière des 20 kilomètres est relevée à 25 kilomètres. Les distances minimale et maximale à considérer sont ainsi de 2,5 et 12,5 kilomètres. En revanche, le camion qui amènera les GBR à la cimenterie, repartira à vide (soit au maximum 50 km de plus). En effet, ce n'est pas la même typologie de camion qui est utilisée pour transporter les granulats et les sacs de ciment. Une optimisation des pratiques de transport par camion n'est pas envisagée à court terme. La distance totale maximale retenue est ainsi fixée à 112,5 kilomètres. Le scénario optimum donne une distance minimale de 12,5.

Les distances parcourues du site de carbonatation au site de production du béton (flux 3) : La distance maximale retenue entre les sites de carbonatation et de production du béton est de 50 kilomètres et la distance minimale de 5 kilomètres.

4 Les scénarios examinés

Le coût de la carbonatation accélérée dans une cimenterie est à comparer aux coûts de solutions plus traditionnelles telles que les granulats naturels ou les granulats recyclés. En matière de valorisation, deux voies sont à mettre en parallèle : la sous-couche routière qui correspond toujours à l'usage quasi-exclusif des granulats recyclés et le bâtiment (« le béton dans le béton »). Quatre scénarios sont ainsi examinés :

- Scénario A : recours à du granulat naturel ;
- Scénario B : recours à du granulat de béton recyclé sur une plateforme pour un usage routier ;
- Scénario C : recours à du granulat de béton recyclé sur une plateforme pour un usage bâtiment ;
- Scénario D : recours à du granulat carbonaté (GBRC) après un recyclage du granulat sur une plateforme de et une carbonatation sur un site type cimenterie.

Dans tous les cas de figure, la distance parcourue par les camions vides au retour du site de fabrication béton n'est pas prise en compte.

L'analyse de ces scénarios suppose de formuler de nouvelles hypothèses relatives aux distances entre les carrières / les plateformes de recyclage et les sites de fabrication béton. Mongeard et Dross (2016) avait calculé les distances moyennes qui séparaient les unités de fabrication béton (les centrales de béton prêt à l'emploi et les centrales de préfabrication) des lieux de production granulats (soit les plateformes de recyclage, soit les lieux d'extraction des matériaux naturels) dans quelques départements français. L'écart était en moyenne supérieur d'environ 5 kilomètres au détriment des carrières². L'hypothèse d'une distance maximale de 30 kilomètres, est donc retenue pour le granulat naturel. La distance minimale est fixée à 5 kilomètres. Sur cette base, les distances minimale et maximale séparant la plateforme de recyclage et le site de fabrication béton sont respectivement de 5 et 25 kilomètres. Comme le camion qui transporte le granulat de la plateforme de recyclage au site de fabrication béton, apporte une fois sur deux des déchets ou des granulats naturels, la distance minimale totale parcourue par un camion livrant du granulat sur chantier est alors comprise entre 7,5 et 37,5 kilomètres.

Le tableau 2 résume les scénarios examinés. Dans le scénario D (carbonatation dans la cimenterie), la probabilité de se situer vers les valeurs hautes de la fourchette est plus importante. En effet, l'hypothèse haute et maximale suppose que la cimenterie se situe à 50 kilomètres de la plateforme et du futur chantier. Comme le nombre de cimenterie sur le territoire français reste limité, ce cas de figure risque d'être beaucoup plus fréquent. Dans les scénarios B, C et D, les distances liées au premier flux ne sont pas prises en compte pour calculer le prix final du granulat recyclé et du granulat recyclé et carbonaté puisque le coût lié à ce flux est déjà intégré dans le prix donné par les experts.

Tableau 2 : Les configurations étudiées

	Distance flux 1		Distance flux 2		Distance flux 3		Distance totale prise en compte	
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi
Scénario A	5	30					5	30
Scénario B	7,5	37,5	7,5	37,5			7,5	37,5
Scénario C	7,5	37,5	7,5	37,5			7,5	37,5
Scénario D	7,5	37,5	12,5	112,5	10	100	22,5	212,5

² Lorsque la moyenne des distances minimales était prise en compte, l'écart était en revanche favorable d'environ 3 kilomètres pour les carrières.

5 Les coûts du processus de carbonatation accélérée dans le cas du démonstrateur VICAT

La conception du démonstrateur devait reprendre un système bien maîtrisé qui ne requérait pas forcément de lourds investissements. C'est le cas du tambour rotatif sélectionné qui est utilisé traditionnellement pour sécher les matériaux (enrobé). Son coût d'acquisition s'éleva à 40 000€ et sa remise en état à 20 000€.

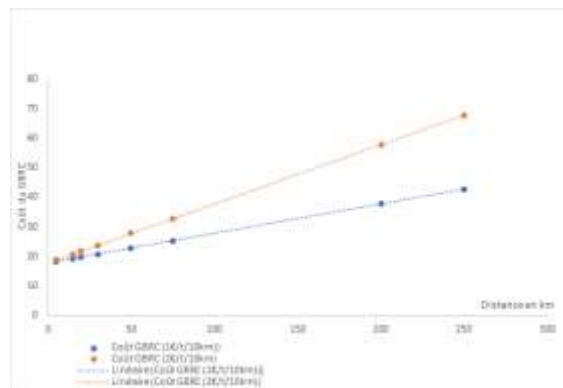
Le système retenu a été positionné après le broyeur. Le taux de concentration du CO₂ est de 16% et moindre qu'au niveau de la tour de préchauffage où il atteint 25%. Néanmoins, avec cette solution, le coût de raccordement reste raisonnable. Les travaux de raccordement au four de la cimenterie de Créchy (Allier) comprenaient le montage mécanique, les modifications mécaniques, l'instrumentation, la mise au point des branchements électriques, des automatismes et de la tuyauterie, et le dépoussiérage des gaz. Le coût de l'ensemble de ces opérations a été estimé à 90 000€. Le montant de l'investissement initial s'élève donc à 150 000 €. Il est prévu que le démonstrateur fonctionne 7 000 heures par an et sur cette base sa durée de vie prévisionnelle est de dix ans. La durée d'amortissement retenue est de cinq années.

L'entretien-maintenance qui comprend le changement des relevés dans le sécheur, le graissage s'élève à 10 000€ par an. Deux personnes sont nécessaires pour assurer le fonctionnement du carbonateur (chargement, pilotage et surveillance du système). Leur formation a duré deux jours. Néanmoins, ils n'interviennent pas de façon continue. L'usage du démonstrateur est en effet discontinu. Le coût de fonctionnement qui comprend la main d'œuvre et l'alimentation électrique est de 1€ par tonne.

Le GBR vient des retours des centrales à béton (déchets des chantiers neufs). Son prix a été considéré identique à celui du GBR à usage bâtiment des plateformes de recyclage obtenu à dire d'experts, soit 13€.

Le système retenu carbonate trois tonnes de granulat en deux heures et la capacité de production annuelle est de 10 500 tonnes. La livraison s'effectuant avec des camions de 25 tonnes, cela représente 420 trajets.

Figure 2 : Coût d'une tonne de granulat de béton carbonaté selon des coûts de transport de 1 et 2€



L'ensemble des coûts précédemment annoncés ont été compilés et le coût d'une tonne de granulat de béton carbonaté a été calculé en jouant sur deux variables :

1. La distance parcourue par les camions qui chargent et déchargent les granulats au fil de leur transformation (concassage, recyclage, carbonatation) ;
2. Le coût du transport qui s'établirait dans une fourchette allant de 1 à 2 euros pour une tonne pour 10 kilomètres parcourus (soit entre 2,50€ et 5€ pour un camion de 25 tonnes parcourant 1 kilomètre).

On obtient ainsi deux séries de coûts (figure 2).

Lorsque les distances de transports sont minimales (cas des deux tarifs à 1 et 2€/t/10 km), Les coûts pour les trois premiers scénarios sont relativement proches. Pour un usage bâtiment, cela montre l'intérêt du GBR autour des grandes métropoles où le gisement est important et les plateformes de recyclage relativement proches des sites de construction. Lorsque les distances sont maximales et pour un usage bâtiment, le granulat naturel bénéficie d'un avantage compétitif. Ce cas correspond sans doute davantage aux chantiers éloignés des grandes aires métropolitaines là où les plateformes de recyclage sont moins nombreuses. Pour un usage routier, le granulat recyclé, a priori de moindre qualité, est plus concurrentiel.

Les scénarios avec carbonatation dans une cimenterie s'avèrent tous défavorables. Dès l'instant où la distance totale parcourue atteint ou dépasse 200 kilomètres, les coûts montent en flèche. Pour les distances plus faibles, le désavantage compétitif est moins marqué surtout que le GBRC bénéficie d'un avantage qualitatif supplémentaire : il est « bas carbone » comparativement aux autres solutions. La section suivante examine si la prise en compte du prix du carbone réduit de manière drastique ce coût du GBRC.

Tableau 3 : Les quatre scénarios mis en perspective

	Distance totale (km)		Coût (1€/t/10km)		Coût (2€/t/10km)	
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi
Scénario A - Granulat naturel)	5	30	13,5	16	14	19
Scénario B – GR pour sous-couche routière	7,5	37,5	11,75	14,75	12,5	18,5
Scénario C – GR pour usage bâtiment	7,5	37,5	13,75	16,75	14,5	20,5
Scénario D – Recyclage plateforme et carbonatation	22,5	212,5	20,06	39,06	22,31	60,31

6 Viabilité économique du procédé industriel de carbonatation au regard de l'évolution du marché du carbone

6.1 Le marché européen du carbone

Le Système Communautaire d'Echange des Quotas d'Émissions (SCEQE – UE)³ aussi appelé marché du carbone Européen, a été mis en place en 2005 afin de contrôler par un mécanisme de plafonnement des quotas disponibles, la quantité de CO₂ émise par les installations très émettrices de gaz à effet de serre. Un quota correspond au droit d'émettre une tonne de CO₂ dans l'atmosphère.

En Europe, ce marché concerne 11 000 sites industriels responsables de 45% des émissions de l'Union. Chaque état membre détermine pour cinq ans un niveau d'émissions carbone compatible avec ses objectifs puis répartit les émissions traduites en quotas au sein de chaque entreprise via le Plan National d'Allocation de Quotas (PNAQ) (Chavallier, 2018, Aykut, 2014). Ces quotas sont distribués gratuitement aux entreprises ou vendus aux enchères par les Etats. A la fin de chaque année, les entreprises qui ont émis moins d'émissions que prévu peuvent vendre leurs quotas excédentaires ou bien les épargner pour un usage ultérieur. A l'inverse, celles qui ont émis plus de CO₂ doivent se procurer des quotas auprès des entreprises excédentaires ou acheter des crédits de compensations⁴ afin d'éviter de lourdes amendes (jusqu'à 100€/tCO₂ depuis 2018).

L'objectif à horizon 2030 est de réduire de 43% par rapport à 2005 les émissions des secteurs couverts par le système. Pour ce faire, la Commission Européenne a défini quatre périodes qui structurent le Système d'Echange de Quotas d'Émissions et tendent à réduire progressivement le nombre de permis à polluer disponibles. La quatrième phase de 2021 à 2023 amène encore à réduire l'allocation de quotas gratuits. Cette réduction entraîne une augmentation du prix du quota et incite les entreprises à orienter leurs investissements dans des technologies à faible teneur en carbone ou à améliorer leur process de production afin de réduire leurs émissions (Aldy et Stavins, 2012).

6.2 Le cas des cimentiers

Les secteurs industriels exposés à un risque important de délocalisation de leurs émissions hors Union Européenne pour réduire les coûts de production, reçoivent gratuitement une partie des quotas d'émission qui leur sont nécessaires. Cette mesure vise également à ne pas pénaliser financièrement les entreprises européennes exposées à la concurrence internationale. Les industries lourdes comme le ciment, l'acier et les produits chimiques font partie des secteurs bénéficiant de ces allocations gratuites. Cet avantage devait être supprimé lors de la quatrième phase de structuration. Néanmoins, le Parlement européen a voté son maintien le 11 mars 2021 et les cimentiers bénéficieront de ces allocations gratuites encore quelques temps. Par conséquent, les émissions captées par les GBRC ne seraient pas à ce jour décomptées des émissions des cimenteries. La réglementation est malgré tout susceptible d'évoluer à court terme. L'industrie cimentière encourage cette réforme de la Directive ETS. Par ailleurs, les quotas excédentaires ou manquants sont toujours soumis au prix du marché du carbone. La composante carbone est donc intégrée à l'analyse suivante.

6.3 Analyse du coût carbone du procédé de carbonatation accélérée de l'usine VICAT

Le procédé de carbonatation accélérée des granulats de bétons recyclés conduit à capter le CO₂ présent dans les fumées dégagées par les cimenteries. Il réduit d'autant l'impact carbone de l'industrie cimentière. L'analyse suivante effectue un bilan économique de ce procédé en intégrant le prix du carbone.

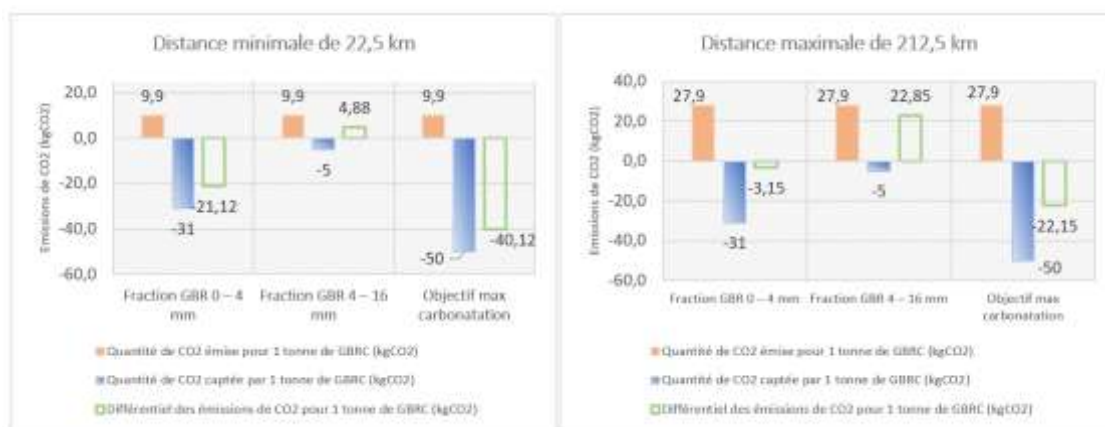
³ <https://www.ecologie.gouv.fr/marches-du-carbone>.

⁴ Crédits correspondants à des réductions d'émissions pouvant être réalisées dans une autre zone géographique ou dans un autre secteur.

Les économies réalisées grâce à la carbonatation sont dépendantes de la quantité de CO₂ captée par les granulats. D'après les données transmises par l'usine VICAT, la carbonatation d'une tonne de granulats de béton recyclé de fraction fine (0 – 4 mm) permet de capter 31kg de CO₂ et celle de fraction plus grossière (4 – 16 mm) de capter 5kg de CO₂. A noter que ces taux de captation du carbone ne sont pas optimaux et que VICAT vise un objectif de 5% ce qui correspondrait à 50kg de CO₂ captés par une tonne de GBR.

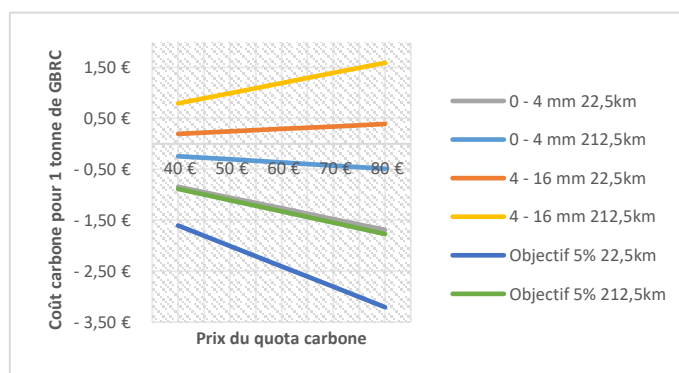
Les émissions générées sont celles liées au concassage, à la carbonatation et au transport de ces GBR. Les deux premiers postes engendrent l'émission de 8,10 kg de CO₂ pour une tonne de GBRC d'après l'analyse environnementale⁵. L'impact du transport quant à lui dépend de la distance parcourue. Les hypothèses du scénario D (Recyclage sur plateforme et carbonatation) ont été reprises. Le graphique ci-dessous représente les émissions captées, générées et le différentiel des deux pour les distances minimale de 22,5 km et maximale de 212,5 km.

Figure 3 : Emissions captées et générées par la carbonatation selon les hypothèses de distance



Dans le cas de la fraction grossière de 4 – 16 mm, le CO₂ capté ne permet pas de compenser les émissions générées par le transport des granulats, même pour la distance minimale. Le prix du carbone étant positif, cela engendre un coût économique supplémentaire. En considérant le prix de 45€/t CO₂ en vigueur en avril 2021, le coût de carbonatation de la tonne de GBRC augmente de 0,22€/tonne pour une distance de 22,5 km et de 0,89€/tonne pour une distance de 212,5 km pour cette fraction. En revanche, la fraction fine offre un taux de captation plus élevé. Le CO₂ capté compense alors les émissions générées dans les deux cas et ainsi de réduire le coût carbone de la carbonatation de 0,95€/tonne pour 22,5 km et de 0,28€/tonne pour 212,5 km. Si les objectifs de captation de 5% du CO₂ étaient atteints cela réduirait le coût de la tonne de GBRC de 1,81€/tonne pour 22,5 km et 1,13€/tonne pour 212,5 km. A 60€ la tonne, les baisses seraient respectivement de 2,41€ de 1,51€ par tonne.

Figure 4 : Sensibilité du prix de la tonne CO₂ à l'évolution du prix du carbone



Le prix du quota est en constante évolution depuis la mise en place du système d'échange. Autour de 5€/tonne en 2017, le prix du carbone est remonté à 25€/tonne en 2020 pour s'envoler à 40€/tonne début 2021. Ce prix « pourrait dépasser 50 ou 60 euros au cours des prochaines années », d'après le président de la commission Environnement du Parlement Européen. Ceci nécessite d'étudier la sensibilité du coût de carbonatation de la tonne de GBR relativement à ce prix. Le graphique ci-dessous montre que plus le taux de captation de CO₂ par les granulats est élevé moins le prix de la tonne de GBRC est sensible à l'augmentation du prix du carbone.

⁵ Féraïlle A. et M. Saadé, 2021, « ACV de granulats carbonatés », Rapport d'avancement, PN FastCarb.

La sensibilité du coût carbone de la tonne de GBRC à l'évolution du prix du carbone est fortement dépendante des distances de transport. Plus elles sont courtes, plus les économies sur les quotas carbone seront intéressantes si le prix vient à augmenter rapidement.

7 Conclusion

L'analyse précédente basée sur le démonstrateur industriel mis en œuvre par l'entreprise VICAT sur le site de sa cimenterie de Créchy a cherché à tester la viabilité économique du procédé de carbonatation en intégrant des analyses de sensibilité liées aux évolutions du prix de la tonne de carbone. Les calculs indiquent que le processus n'est pas compétitif pour la fraction grossière des granulats. Les surcoûts liés à ce processus industriel supplémentaire et au transport ne sont pas compensés par les gains carbonés issus de la carbonatation. Les résultats liés à la fraction fine sont plus nuancés. Les gains liés à la captation du carbone et à l'évolution du prix de la tonne de carbone compensent partiellement les surcoûts liés au process et au transport notamment lorsque les distances parcourues sont faibles. Cette analyse montre que le transport constitue la variable prépondérante de la viabilité économique des GBRC. Cela rejoint les conclusions de Dias et al. (2021) dans le cas des GBR au Portugal et de Braymand et al. (2017) qui montraient que la distance entre les villes, les sites de granulats naturels et les plateformes de recyclage impactaient fortement les résultats de l'analyse environnementale liée à la production de GBR. La configuration la plus favorable sur le plan environnemental était celle où les granulats étaient recyclés in situ sur le chantier de déconstruction / reconstruction. Ce résultat indique que la mise en œuvre d'une carbonatation sur un site de déconstruction ou une plateforme de recyclage s'avèrerait sans doute plus compétitive. Ce cas mériterait donc d'être analysé. Par ailleurs, une optimisation des coûts de transport serait également possible. Sur ce plan les marges de progrès semblent considérables puisque les stratégies de double flux ne sont pas encore dominantes et que l'organisation des flux logistiques ne sont pas optimisés.

Enfin, les prix de la tonne de carbone évolueront sans doute à la hausse. Dans le cas de leurs projets de R&D, certaines entreprises industrielles s'appuient déjà en interne sur des prix de 100 €/tCO₂. Comme l'indique De Chandelar (2020, p.7), « dans tous les cas avec un prix du carbone autour de 100 à 150 euros/tCO₂, la plupart des process industriels peuvent être décarbonés tout en restant compétitifs. »

8 Remerciements

Nous remercions les membres du Projet National FastCarb impliqués dans les échanges liés à cette thématique, la société VICAT pour l'organisation de la visite du site de Créchy et les données transmises, les relecteurs d'une première version de cet article et le ministère de la Transition écologique qui soutient le PN FastCarb.

9 Bibliographie

- Aldy JE, Stavins RN., 2012, « The Promise and Problems of Pricing Carbon: Theory and Expérience », *The Journal of Environment & Development*, 21(2), pp. 152-180.
- Aykut, Stefan C., 2014, « Gouverner le climat, construire l'Europe : l'histoire de la création d'un marché du carbone (ETS) », *Critique internationale*, vol. 62, no. 1, pp. 39-55.
- Braymand S, Feraille A et N. Serres, 2017, *Evaluation environnementale du béton de granulats recyclés – 2^{ème} étape*, Rapport de recherche, RECYBETON, Juillet 2017.
- Chevallier J., 2008, « Les règles de fonctionnement du marché européen du carbone (2005-2007) : le rôle du stockage et de l'emprunt de quotas, les fondamentaux du prix et les stratégies de gestion des risques », *Economies et finances*. Thèse Université de Nanterre - Paris X.
- De Chandelar, 2020, "Préface", in M. Glachand et C. Mini, *Quand le carbone coûtera cher. L'effet sur la compétitivité industrielle de la tarification du carbone*, Paris, Presses des Mines, 2020.
- Dias A. B., Pacheco J. N., Silvestre J. D., Martins I. M. et J. de Brito, 2021, « Sustainability of the use of recycled aggregates in concrete : from research to a practical application in a national context », *Congrès FIB* (à venir)
- Mongear L., 2017, « De la démolition à la production de graves recyclées : analyse des logiques de proximité d'une filière dans l'agglomération lyonnaise », *Flux*, n° 108 Avril – Juin 2017 pp. 64-79.
- Mongear L. et A. Dross, 2016, *La ressource en matériaux inertes recyclables dans le béton en France Estimation des pratiques actuelles et des évolutions potentielles à partir des études publiées par les Cellules Économiques Régionales de la Construction*, RECYBETON, 8 avril 2016.
- Recybéton, 2018, *Comment recycler le béton dans le béton – Recommandations du projet national RECYBETON*, Novembre 2018.