

Analyse économique de deux procédés de carbonatation accélérée de granulats de béton recyclés

Frédéric Bougrain¹, Mathilde Doutreleau¹

¹ CSTB, Direction Economie et Ressources, 84 avenue Jean Jaurès, 77420 Champs-sur-Marne

RESUME La carbonatation accélérée des granulats de béton est une des solutions envisagées par l'industrie cimentière pour réduire ses émissions de CO₂ et tendre d'ici 2050 vers la neutralité carbone. Dans cette optique, LAFARGE (groupe HOLCIM) et VICAT ont testé dans leur cimenterie deux procédés de carbonatation accélérée. Les données transmises par les deux cimentiers et les résultats des analyses de cycle de vie menées par ailleurs, ont servi de base aux analyses économiques exposées dans cet article. Les résultats montrent que la carbonatation accélérée dans une cimenterie renchérit fortement le coût du granulats recyclé quel que soit le procédé adopté. Les coûts liés au transport et à un processus industriel supplémentaire ne sont pas compensés par les revenus potentiels liés à la vente de quotas carbone même à un prix du carbone de 100€/t. Néanmoins, comme la quantité de CO₂ captée est plus importante que la quantité de CO₂ émise pour la fraction fine (sable), cette technologie n'est pas économiquement condamnée si les prix du carbone poursuivent leur hausse, si l'impact environnemental du transport est réduit et enfin si la maîtrise d'ouvrage marque un intérêt plus marqué pour des solutions moins carbonées et moins consommatrices de matière première mais plus coûteuses.

Mots-clés : analyse coûts-bénéfices, bétons recyclés, carbonatation, quota carbone

I. 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% (Pin, 2019). Conscients de la nécessité d'agir, les cimentiers se sont engagés à réduire leurs émissions de 24% d'ici 2030 et de 80% d'ici 2050, par rapport à 2015. Pour atteindre ces objectifs, la feuille de route de la filière ciment (Conseil national de l'industrie, 2021) distinguent plusieurs leviers d'actions :

- Améliorer l'efficacité énergétique du process cimentier ;
- Substituer progressivement les combustibles fossiles par des combustibles alternatifs de type biomasse ;
- Baisser la teneur en clinker des ciments ;
- Développer des ciments alternatifs
- Développer des technologies de captage et de stockage du carbone.

La carbonatation accélérée des bétons qui est au cœur du projet national FastCarb fait partie des solutions de captage du carbone qui doivent permettre à l'industrie de baisser ses émissions de CO₂. Dans le cadre de la Directive ETS, ce captage pourrait donner lieu à la vente de crédits de compensation carbone et générer des revenus. En effet, le Système Communautaire d'Echange des Quotas d'Emissions (SCEQE – UE), appelé aussi marché carbone, a été créé en 2005 pour inciter les 11 000 sites industriels responsables de 45% des émissions de l'Union, à réduire progressivement leurs émissions de CO₂. Les seuils d'émissions autorisées fixés par secteur dépendent d'un facteur spécifique à chaque secteur basé sur un benchmark du niveau d'émissions de la moyenne des 10% des installations les plus performantes et de leur niveau d'activité historique (moyenne glissante des émissions des années n-2 et n-1).¹

A la fin de chaque année, les entreprises qui ont émis moins d'émissions que le seuil autorisé, 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 compensations. La diminution progressive du nombre de quotas disponible entraîne mécaniquement une hausse du prix 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). L'incitation est d'autant plus forte qu'entre 2017 et fin juin 2022, le prix du quota carbone est passé de 5 à 90€/tonne.

Les deux procédés de carbonatation accélérée développés par VICAT et LAFARGE dans leur cimenterie de Créchy (Allier) et du Val d'Azergues (Rhône) s'inscrivent dans ce contexte. La question centrale est de savoir si le surcoût lié à ce process supplémentaire de traitement et de transport du granulat de béton recyclé (GBR) est compensé en tout ou partie par les revenus potentiels générés par la revente / l'épargne de quotas.

Peu d'articles ont cherché à apprécier la viabilité économique des procédés de carbonatation accélérée. Tienfenthaler et al. (2021) ont démontré la pertinence du process pour l'ensemble de la chaîne de valeur mais uniquement sur le plan environnemental sur la base d'une analyse de cycle de vie. Quand des analyses économiques sont menées, elles portent sur l'intérêt du recours au granulat de béton recyclé (Braga et al., 2017 et Dias et al., 2021). Elles mettent en avant la prépondérance dans l'équation économique de la variable « distance de transport » du fait du caractère pondéreux des granulats.

Dans cet article, la viabilité économique des granulats de béton recyclés et carbonatés (GBRC) sera examinée et comparée aux coûts des granulats naturels, des granulats recyclés pour des usages routiers et bâtiment. Comme les coûts de transport sont susceptibles d'impacter la compétitivité des solutions industrielles envisagées, des analyses de sensibilité intégrant la distance parcourue par les granulats naturels et les granulats recyclés-carbonatés seront proposées. En outre, la viabilité économique de ces procédés industriels à moyen et long terme selon les évolutions du prix de la tonne de CO₂ sera également testée.

II. Méthodologie

¹ Par exemple, le benchmark pour le ciment gris est de 693 kg CO₂/t clinker, alors que la moyenne européenne des émissions pour le clinker est de 830 kg CO₂/t. La différence de 137kg doit être achetée au cours du marché (de Parisot, 2022).

A. L'analyse coûts / bénéfiques

L'analyse coûts / bénéfiques (ACB) est un outil d'aide à la décision fréquemment utilisé par les acteurs en amont d'un projet afin de valider sa pertinence économique. Cet exercice consiste à sommer des coûts supportés le long de la vie d'une opération et à les mettre en perspective avec les bénéfices générés sur la même durée. L'ACB intègre certaines externalités environnementales ou sociales en leur attribuant une valeur économique, comme c'est le cas pour le CO₂ avec le prix du quota carbone.

Dans la présente analyse coûts / bénéfiques de la carbonatation accélérée des granulats de béton recyclés, les coûts identifiés sont ceux relatifs à l'investissement dans les équipements nécessaires à la carbonatation (le carbonateur, le système de raccordement, la main d'œuvre, etc), ceux nécessaires au concassage et transport des granulats de béton ainsi que le coût du carbone émis lors de l'opération par les biens et services mobilisés. Les bénéfices eux sont liés à l'économie de quota d'émissions grâce à la captation de CO₂ dans les granulats et à la vente des granulats recyclés carbonatés aux acteurs du bâtiment.

B. Les quatre scénarios

Dans le cadre du projet, c'est l'idée d'une carbonatation accélérée dans une cimenterie qui a été retenue. Ce scénario (D) d'une carbonatation dans une cimenterie après un recyclage des granulats sur une plateforme de recyclage sera comparé à trois autres scénarios :

- Scénario A : recours à du granulat naturel pour un bâtiment ;
- Scénario B : recours à du granulat de béton recyclé pour un usage routier après un recyclage sur une plateforme ;
- Scénario C : recours à du granulat de béton recyclé pour un usage bâtiment (GBR) après un recyclage sur une plateforme.

Pour chaque scénario, la qualité des granulats est considérée comme uniforme.

C. Les hypothèses liées aux prix des granulats

Les granulats issus de la carbonatation entrent en concurrence avec les granulats naturels mais aussi avec les granulats recyclés. Pour ces derniers deux types de valorisation sont possibles :

- En sous-couche routière ;
- Dans le béton pour les bâtiments.

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

Le prix des granulats naturels est variable selon les régions. La qualité et l'abondance de la ressource influencent beaucoup les prix pratiqués. Devant cette diversité des tarifs et l'impossibilité de comparer des matériaux qui ne sont pas homogènes, il a été décidé de s'appuyer sur des avis d'experts du sujet.

D. Les hypothèses liées aux distances de transport

Dans les quatre scénarios, par convention, la distance parcourue par les camions vides au retour du chantier de construction n'est pas prise en compte. Les autres hypothèses sont les suivantes :

- La distance du site de déconstruction à la plateforme de recyclage

La distance entre le site de déconstruction et la plateforme de recyclage est supposée s'étendre de 5 à 25 kilomètres. En effet, les plateformes de recyclage des centres urbains reçoivent rarement des déchets inertes provenant d'un rayon supérieur à 20 kilomètres (Mongear, 2017). Comme cette assertion est sans doute moins stricte en dehors des centres urbains et que la « distance-temps » et la « proximité relationnelle »² jouent, cette barrière des 20 kilomètres est relevée à 25 kilomètres.

Du fait du caractère pondéreux du béton et coût du transport, la stratégie du double fret est recherchée. Par conséquent, l'hypothèse d'un camion qui repart avec des matériaux recyclés ou naturels (les plateformes de recyclage stockent fréquemment des granulats naturels dans cette optique) une fois sur deux, sera retenue. La distance totale maximale du site de déconstruction à la plateforme est donc de 37,5 kilomètres (25 + 12,5) et la minimale de 7,5 kilomètres (5 + 2,5).

- La distance des sites d'extraction au chantier de construction

Les hypothèses liées aux distances de transport se basent sur les travaux de Mongear et Dross (2016) qui avaient 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 carrières. L'hypothèse d'une distance comprise entre 5 et 30 kilomètres est donc retenue pour le granulats naturel.

- La distance de la plateforme de recyclage au chantier

Afin de suivre les conventions précédentes, il est admis que le camion qui transporte le granulats de la plateforme de recyclage au chantier (pour un usage routier ou bâtiment), apporte une fois sur deux des déchets. Les distances minimale et maximale séparant la plateforme de recyclage et le site de construction (route ou bâtiment) sont identiques aux distances entre site de déconstruction et chantier. Elles s'établissent entre 5 et 25 kilomètres. La distance totale parcourue par un camion livrant du granulats sur chantier est ainsi comprise entre 7,5 et 37,5 kilomètres.

- La distance de la plateforme de recyclage au site de carbonatation accélérée

Les sites permettant la carbonatation accélérée, ne sont pas répartis de façon équilibrée sur le territoire national. La distance entre le site de recyclage des granulats de béton et celui de la carbonatation est supposée s'étendre de 5 à 50 kilomètres. Le camion qui charge le GBR sur la plateforme de recyclage pour le transporter vers la cimenterie apporte une fois sur deux des déchets. Les distances minimale et maximale à considérer sont ainsi de 2,5 et 12,5 kilomètres. En revanche, le camion qui amène les GBR à la cimenterie, repart à vide. En effet, les camions utilisés

² Cette proximité renvoie aux relations informelles qui s'établissent entre les acteurs de la filière de la déconstruction et du recyclage. Certaines entreprises pourront ainsi privilégier une plateforme plus éloignée si leurs dirigeants connaissent bien le responsable de cette plateforme. La distance de 25 kilomètres correspond aussi à la distance maximale acceptable pour transporter du GBR dans le cadre de l'obtention du label suisse MINERGIE-ECO®.

pour transporter les granulats et les sacs de ciment sont différents et ne permettent pas d'envisager à court terme le double fret. La distance retenue s'établit entre 12,5 (2,5 km + 2 x 5 km) et 112,5 kilomètres (12,5 km + 2 x 50 km).

- La distance du site de carbonatation au chantier

Afin d'être cohérent avec les hypothèses précédentes, la distance entre le site de carbonatation et le chantier est comprise entre 5 et 50 kilomètres, fourchette identique à celle pour accéder au site de carbonatation. Comme les distances parcourues par les camions vides au retour du site de construction ne sont pas prises en compte, les distances retenues s'établissent entre 10 et 100 km.

Dans le cadre d'un bilan environnemental, ce sont les distances parcourues qu'il convient de retenir en faisant varier le taux de charge. Néanmoins, dans le cadre d'un bilan économique, dans les trois scénarios intégrant du granulat recyclé, le premier flux (les distances bleues du tableau 2) n'est pas pris en compte dans les calculs réalisés afin d'éviter un double comptage. En effet, ces flux sont intégrés dans le prix des granulats recyclés qui est fixé au départ de la plateforme de recyclage. Du fait de cette situation et des hypothèses logistiques liées à la stratégie du double fret, les distances retenues (tableau 2) pour les calculs économiques s'avèrent inférieures aux distances parcourues par les camions (tableau 1).

TABLEAU 1. Les distances parcourues dans les cinq scénarios

	Distance flux 1		Distance flux 2		Distance flux 3		Distance totale parcourue	
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi
Scénario A	5	30	-	-	-	-	5	30
Scénario B	10	50	10	50	-	-	20	100
Scénario C	10	50	10	50	-	-	20	100
Scénario D	10	50	15	125	10	100	35	275

TABLEAU 2. Les distances retenues dans les quatre scénarios

	Distance flux 1		Distance flux 2		Distance flux 3		Distance totale retenue	
	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

III. Résultats : les coûts des granulats recyclés et carbonatés

A. Les coûts d'investissement, de transport et les coûts opérationnels associés aux deux démonstrateurs

Les calculs et les résultats économiques liés aux deux démonstrateurs ne sont pas strictement comparables. Les données obtenues du groupe VICAT concernent un démonstrateur, installation temporaire testée dans un projet pilote. Celles adressées par LAFARGE résultent d'un projet pilote similaire. Néanmoins, les données sont le fruit d'une extrapolation pour un équipement industriel, c'est-à-dire une installation pérenne, dotée d'une capacité de production beaucoup plus importante nécessitant des investissements plus conséquents. Le coût de cet équipement industriel a été estimé à 3 400 000€. LAFARGE a prévu que l'équipement industriel fonctionne 12 heures par jour sur une

base de 261 jours par an. Les capacités de production ont été évaluées à 10 tonnes de GBR par heure soit une moyenne annuelle de 31 320 tonnes de GBRC. Le système retenu par VICAT carbonate 3 tonnes de granulats en deux heures. Ceci donne une capacité de production annuelle de 10 500 tonnes. Il est prévu que le démonstrateur fonctionne 7 000 heures par an pour une durée de vie prévisionnelle de 10 ans.

Le tableau 3 résume l'ensemble des données nécessaires au calcul du coût de production et d'acheminement d'une tonne de GBRC.

TABLEAU 3. Les coûts de production et de transport des deux démonstrateurs

	VICAT	LAFARGE
Montant de l'investissement initial	150 000	3 400 000
Coûts de main d'œuvre	90 000	90 000
Coûts d'entretien	10 000	30 000
Coûts de fonctionnement (électricité)	10 500	22 691
Durée d'amortissement	5 ans	10 ans
Capacité de production (tonnes)	10 500	31 300
Coût transport (mini) pour une tonne pour 1 km	0,10 €	0,10 €
Coût transport (maxi) pour une tonne pour 1 km	0,20 €	0,20 €
Nombre de trajets annuels envisageables	420	1 252
Durée de vie	10 ans	Investissement pérenne

B. Coût d'une tonne de granulats de béton recyclé et carbonaté

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

- La distance parcourue par les camions qui chargent et déchargent les granulats au fil de leur transformation (concassage, recyclage, carbonatation) ;
- Le coût du transport qui s'établirait dans une fourchette allant de 1 à 2 euros.

Le tableau 4 met en parallèle les résultats des quatre scénarios. Au-delà du processus de traitement des granulats, chaque option se distingue par la logistique nécessaire à mettre en œuvre pour transporter les granulats jusqu'au site de construction.

Pour un usage routier, le recours au granulats recyclés, a priori de moindre qualité, s'avère moins coûteux quelles que soient les distances de transport.

Pour un usage bâtiment, le granulats naturel bénéficie d'un avantage compétitif sur le recyclé. Néanmoins, cet avantage disparaît lorsque les distances minimales sont retenues pour le recyclé et maximales pour le granulats naturel (16€ par tonne versus 13,7€ sur la base d'un coût de transport de 1 euro par tonne pour 10 km par camion de 25 tonnes). 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 alors qu'à l'inverse les gisements de granulats naturels tendent à s'éloigner et nécessitent davantage de transport. Pour que cette filière émerge vraiment, il conviendrait d'une part que les plateformes ne privilégient plus de manière quasi exclusive l'usage routier et investissent dans des équipements qui favorisent le

développement d'une offre de granulats recyclés, et d'autre part que les maîtres d'ouvrage prescrivent les GBR dans leurs cahiers des charges.

TABLEAU 4. Les quatre scénarios mis en perspective

	Distance totale (km)		Coût d'une tonne de granulats (1€/t/10km)		Coût d'une tonne de granulats (2€/t/10km)					
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi				
Scénario A – Granulats naturels	5	30	13,5	16	14	19				
Scénario B – Granulats recyclés pour sous-couche routière	7,5	37,5	11,7	14,7	12,5	18,5				
Scénario C – Granulats recyclés pour usage bâtiment	7,5	37,5	13,7	16,7	14,5	20,5				
Scénarios avec carbonatation			VICAT		LAFARGE		VICAT		LAFARGE	
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi
Scénario D – Recyclage plateforme et carbonatation cimenterie	22,5	212,5	28,6	47,6	30,7	49,7	30,9	68,9	32,9	70,9

De tels résultats reposent sur un prix des granulats naturels de 13 euros. Dans le cas de la région parisienne qui n'a pas ou n'a plus de carrière de roches massives ou de dépôts de roches alluvionnaires, les gravillons viennent du Pas de Calais (Carrières du Boulonnais). Les prix sont donc de façon générale plus élevée. Ils s'établissent au moins à 25€/t pour du 4/10 (marché livré en alluvionnaire et/ou calcaire concassé mais reste voisin de 12€/t pour du sablon. Dans ce cas de figure, le GBR présenterait un fort avantage compétitif.

Les scénarios avec carbonatation dans une cimenterie s'avèrent défavorables en raison de l'ajout d'un processus industriel. L'étape supplémentaire liée à la carbonatation est d'autant plus coûteuse que les quantités produites restent relativement faibles. Par conséquent, les coûts fixes pèsent davantage. En outre, la carbonatation occasionne davantage de transport. Lorsque la distance totale parcourue dépasse 100 kilomètres (scénario a priori le plus plausible au regard de l'éloignement géographique des cimenteries), ces coûts ne sont plus du tout compétitifs.

IV. Analyse de l'impact carbone des procédés de carbonatation accélérée

Le procédé de carbonatation accélérée des granulats de bétons recyclés a pour but de réduire l'impact carbone du béton et plus particulièrement du ciment en permettant de capter le CO₂ présent dans les fumées dégagées par les cimenteries pour la carbonatation des granulats. L'analyse suivante vise à évaluer les revenus générés par les procédés VICAT et LAFARGE en contrepartie de la vente des crédits de compensation carbone.

A. Le démonstrateur VICAT

Les économies de quotas réalisées grâce à la carbonatation sont dépendantes de la quantité de CO₂ captée par les granulats. La carbonatation d'une tonne de granulats de béton recyclés de fraction fine (0 – 4 mm) permet de capter 31kg de CO₂, celle de fraction plus grossière (4 – 16 mm) capte 5kg

de CO₂. Ces taux de captation ne sont pas optimaux. VICAT vise un objectif de 5% ce qui correspondrait à 50kg de CO₂ captés par tonne de GBR.

Les émissions générées sont liées au concassage, au transport et à la carbonatation de ces GBR. D'après l'analyse environnementale (Guyard et al., 2022) effectuée en parallèle de cette analyse économique, la somme de ces actions liées à la carbonatation d'une tonne de GBR engendre des émissions comprises entre 3,42 kg et 24.30 kg de CO₂ pour des distances de transport allant de 35 à 275 km. La figure 1 représente les émissions captées, générées et le différentiel des deux.

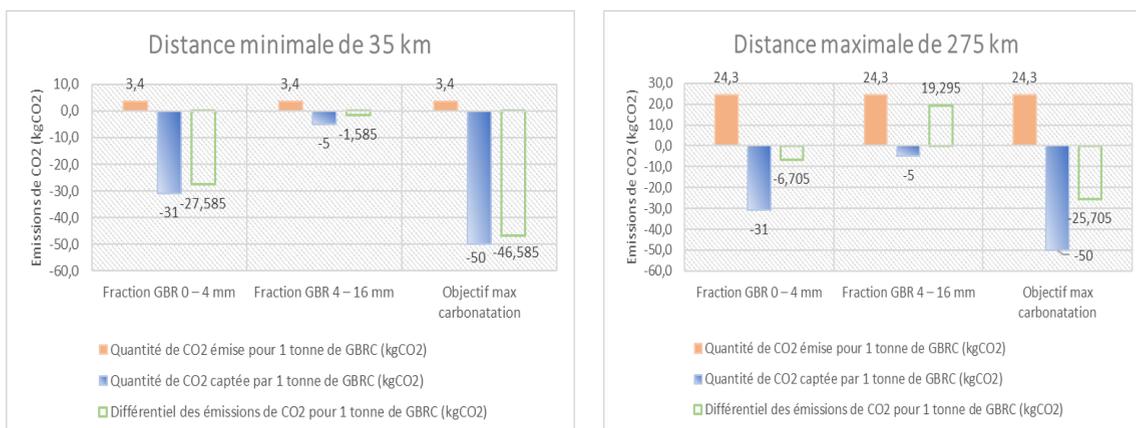


FIGURE 1. Emissions captées et générées par la carbonatation accélérée (démonstrateur VICAT)

Pour la fraction fine, la quantité de CO₂ captée est supérieure à la quantité de CO₂ émise sachant qu'un taux supérieur de captation est envisageable après optimisation.

L'intégration dans le calcul du prix du carbone permet de valoriser la quantité de CO₂ captée. Pour une distance de 35 km, la carbonatation de sable conduit à une réduction du coût de la tonne de granulats de béton de 4 et 7,20€ aux prix respectifs du quota de 100 et 140€/tonne. A contrario, la carbonatation de granulats de fraction grossière transportés sur 275 km conduit à des surcoûts de la tonne de granulats de 2 et 3,60€ aux prix respectifs du quota de 100 et 140€/tonne.

B. Le procédé industriel LAFARGE

Dans le cas du procédé industriel LAFARGE, la carbonatation d'une tonne de GBR de fraction fine (0 – 4 mm) permet de capter 39kg de CO₂; celle de fraction plus grossière (4 – 16 mm) capte 12kg de CO₂. Comme pour VICAT ces taux ne correspondent pas à une captation optimisée qui serait de l'ordre de 49kg de CO₂ captée pour la fraction fine.

Les émissions liées au concassage, au transport et à la carbonatation de ces GBR sont de 4,1kg de CO₂ pour la carbonatation d'une tonne de GBR transportée sur la distance minimale de 35 km et de 24,94kg de CO₂ pour un transport sur une distance de 275 km maximum. La figure 2 représente les émissions captées, générées et le différentiel des deux.

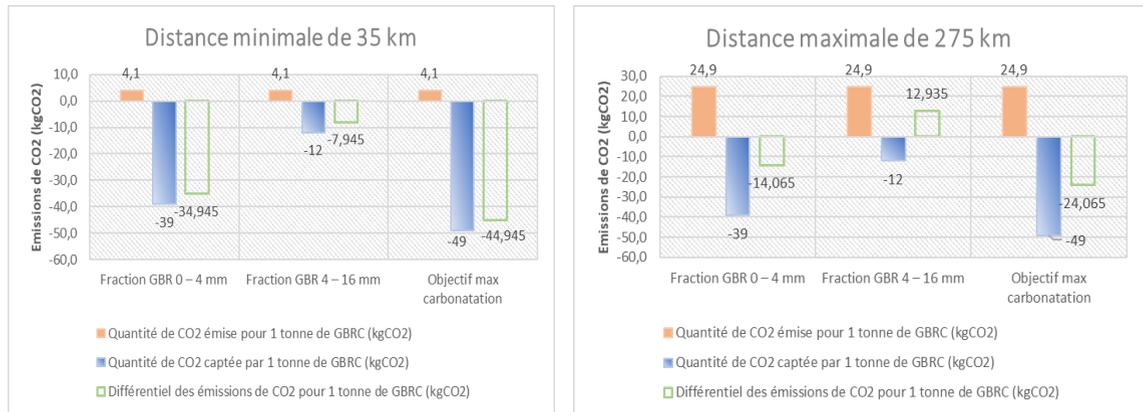


FIGURE 2. Emissions captées et générées par la carbonatation accélérée (démonstrateur LAFARGE)

La quantité de CO₂ captée par la fraction fine est plus importante que la quantité de CO₂ émise. Pour la fraction grossière, lorsque la distance parcourue est la plus faible, le gain est minime et il disparaît dès que les distances s'allongent. Comme dans le cas précédent, les économies et coûts carbone associés aux procédés de carbonatation accélérée sont fortement corrélés au taux de captation du CO₂ et aux distances parcourues.

C. Bilan économique lié au carbone pour chacun des procédés

Le procédé industriel LAFARGE conduit à capter davantage de CO₂ que celui de VICAT. Pour autant et pour la fraction grossière, l'approche ne s'avère pas pertinente (tableau 5).

TABLEAU 5. Bilan du coût du carbone pour chacun des cas de figure

	VICAT				LAFARGE			
	Minimum		Maximum		Minimum		Maximum	
	100€/t CO ₂	140€/t CO ₂						
Fraction fine 0 - 4 mm	-2,76 €	-3,86 €	-0,67 €	-0,94 €	-3,49 €	-4,89 €	-1,41 €	-1,97 €
Fraction grossière 4 - 16 mm	-0,16 €	-0,22 €	1,93 €	2,70 €	-0,79 €	-1,11 €	1,29 €	1,81 €
Objectif fraction fine	-4,66 €	-6,52 €	-2,57 €	-3,60 €	-4,49 €	-6,29 €	-2,41 €	-3,37 €

Les émissions de CO₂ liées au transport absorbent en effet tous les gains liés à la carbonatation. En revanche, pour la fraction fine, le gain carbone lié au process contrebalance toujours les émissions résultant du transport. Toutefois, au prix actuel de la tonne de carbone, ce gain ne compense pas le surcoût du process de production. Cette réduction est trop faible et ne permet pas de rendre les GBRC concurrentiels face aux granulats naturels ou aux granulats recyclés.

V. L'impact de la carbonatation sur le prix d'un m³ de béton

Le GBRC souffre d'un désavantage compétitif par rapport au granulat naturel et au granulat recyclé à usage bâtiment. Pour apprécier l'impact de la carbonatation au niveau d'un projet, il semblait

pertinent de comparer le prix d'un m³ de béton selon des formulations qui intègrent différents types de granulat : granulat naturel, granulat recyclé et granulat recyclé carbonaté. Pour 1 m³ de béton, le dosage suivant a été retenu : 250 kg de ciment, 1 200 kg de gravillons, 800 kg de sable et 125 litres d'eau.

Le prix du ciment : Les prix retenus correspondent à ceux payés par un groupe leader du marché sur Paris. D'autres marchés en France qui n'affronteraient pas une concurrence similaire pourraient pratiquer des prix différents. Deux types de prix ont été obtenus :

- Prix sur Paris d'un CEM II 42,5 R livré dans une centrale à béton 115-120 €/t
- Prix d'un m³ de béton C25/30 XC2/XC3 livré sur un chantier à Paris 105€/m³

Ces prix correspondent à ceux retenus dans le rapport du Shift Project (2022) qui indiquait 120€/t pour du ciment gris. Le prix de la tonne de ciment a ainsi été considérée égale à 120 euros.

Le prix de l'eau : 1 m³ d'eau coûte en moyenne 4,14€.

La composition du granulat : Selon la norme NF EN 206 en vigueur en France, le recours à du GBR reste limité et est fonction de l'exposition. Néanmoins, à la suite du projet RECYBETON (2018), la norme EN206 version française va évoluer dès 2022 sur la partie granulats recyclés. L'intégration de sable recyclé sera désormais possible. Comme les résultats précédents (tableau 5) ont montré que la partie gravillons carbonatés était rarement rentable, seule la fraction fine carbonatée a été intégrée à la formulation d'un m³ de béton. Une formule intégrant 30% de gravillons recyclés et 10% de sable recyclé et carbonaté a été retenue pour les calculs.³

Lorsque les distances de transport sont minimales, les formules intégrant du sable recyclé et carbonaté ne souffrent pas d'un désavantage compétitif trop fort par rapport aux solutions comprenant soit une grande part de granulat recyclé soit intégralement du granulat naturel (tableau 6). En outre, dans tous les cas de figure, les prix restent inférieurs au prix de certains bétons aujourd'hui commercialisés (par exemple un m³ de béton C25/30 XC2/XC3 livré sur un chantier à Paris au prix de 105€/m³).

TABLEAU 6. Prix d'un m³ de béton (scénario 30% de gravillons recyclés et 10% de sable recyclé et carbonaté)

	Quantité pour 1 m ³ béton	Distance parcourue de 35 km				Distance parcourue de 275 km			
		VICAT	LAFARGE	Granulat naturel	Granulat recyclé B	VICAT	LAFARGE	Granulat naturel	Granulat recyclé B
Prix d'un m ³ (coût du transport : 1€/t/10km)		58,80	58,97	57,52	57,61	65,30	65,47	62,52	62,83
Prix d'un m ³ (coût du transport : 2€/t/10km)		60,05	60,21	58,52	58,74	73,05	73,21	68,52	69,18

VI. Conclusion et perspectives

La viabilité économique des procédés de carbonatation accélérée développés par les groupes VICAT et HOLCIM a été testée à partir d'une analyse coûts-bénéfices qui a permis d'intégrer les externalités environnementales liées aux deux investissements.

³ L'impact carbone de la carbonatation n'a pas été prise en compte. Cela conduit en effet à formuler des hypothèses critiquables.

Les résultats ont confirmé que dans certaines circonstances (abondance de la matière première secondaire à proximité du site de construction et éloignement de la ressource naturelle), l'intégration de GBR était plus pertinente qu'un recours exclusif au granulats naturels. L'analyse a également montré que les coûts de la carbonatation accélérée dans une cimenterie ne sont pas contrebalancés par les gains potentiels liés à une revente de quotas même à un prix du carbone de 100€/t. Ce désavantage compétitif du GBRC face aux granulats naturels et aux granulats recyclés pour un usage routier ou bâtiment résulte en partie de l'étape supplémentaire liée au processus industriel. La carbonatation est d'autant plus coûteuse que les quantités produites dans les différents scénarios restent relativement faibles. Par conséquent, les coûts fixes pèsent davantage. En outre, comme la carbonatation se déroule dans une cimenterie, le transport impacte fortement la compétitivité des solutions industrielles envisagées dès lors que les distances ne sont pas minimales et inférieures à une cinquantaine de kilomètres.

A moyen ou long terme, l'intérêt de carbonater le gravillon apparaît nul même en cas de hausse du prix du carbone. En revanche, la viabilité économique d'une carbonatation de la fraction fine pourrait être envisagée. En effet, pour le sable, la quantité de CO₂ captée est plus importante que la quantité de CO₂ émise. Un équilibre économique pourrait être trouvé si les prix du carbone augmentent et dépassent largement la barrière des 100€/t et si la variable « transport » est mieux maîtrisée. En outre, même si ces solutions sont plus onéreuses, elles pourraient intéresser des maîtres d'ouvrage telles que des collectivités territoriales qui seront amenées à privilégier des matériaux moins carbonés afin de respecter les engagements pris dans leur plan climat-air énergie territorial (PCAET).

Ces résultats indiquent une fois de plus que maîtriser le coût du transport et limiter les émissions de gaz à effet de serre associées forment les clés de voute de la compétitivité des fournisseurs de matières premières et matières premières secondaires pondérables. Si un procédé mobile de carbonatation s'avérait performant, il ouvrirait la porte à de nouvelles solutions. La carbonatation sur un site de déconstruction ou une plateforme de recyclage constituerait peut-être une solution viable sur les plans économique et environnemental.

Un système de carbonatation sur une plateforme de recyclage constituerait a priori une approche moins complexe à mettre en œuvre qu'une carbonatation mobile sur site de déconstruction soumise à la double contrainte de l'espace disponible pour stocker les matériaux et des nuisances sonores vécues par les habitations riveraines. En outre, ces plateformes permanentes disposent déjà des équipements liés au concassage et au criblage et elles font partie du circuit d'approvisionnement des entreprises de construction. La stratégie du double fret pratiquée de manière plus systématique permettrait d'améliorer encore davantage la rentabilité de cette approche et de limiter les émissions de CO₂ liées au transport des GBRC.

REMERCIEMENTS

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

REFERENCES

J. E. Aldy & R. N. Stavins. (2012). The Promise and Problems of Pricing Carbon: Theory and Experience. *The Journal of Environment & Development*, 21(2), 152-180.

A. M. Braga, J. D. Silvestre & J. de Brito. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 162, 529 – 543.

Conseil national de l'industrie. (2021). *Décarbonation de l'industrie - Feuille de route de la filière ciment*, Mai 2021.

A. B. Dias, J. N. Pacheco, J. D. Silvestre, I. M. Martins & J. de Brito. (2021). Sustainability and the use of recycled aggregates in concrete: from research to a practical application in a national context. *FIB Symposium, Concrete Structures: New Trends for Eco-Efficiency and Performance*, 14 – 16 June 2021, Lisbon.

P. Guyard, M. Saadé & A. Feraille. (2022). Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclés : Quels bénéfices environnementaux ? *AJCE*, 40 (3).

L. Mongeard. (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, 64-79.

L. Mongeard & 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.

R. de Parisot. (2022). Valorisation économique de la captation du CO₂. *Recommandations FastCarb*.

R. Pin. (2019). Bilan carbone du ciment : comment la filière veut changer la donne ? *Actu-Environnement*, 15 avril 2019.

Recybéton. (2018). *Comment recycler le béton dans le béton – Recommandations du projet national RECYBETON*, Novembre 2018.

J. Tiefenthaler, L. Braune, C. Bauer, R. Sacchi & M. Mazzotti. (2021). Technological demonstration and life cycle assessment of a negative emission value chain in the Swiss concrete sector. *Frontiers in Climate*, 3, 729259.

The Shift Project. (2022). *Décarboner la filière ciment-béton dans le cadre du plan de transformation de l'économie française*, Janvier 2022.