

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

Analyse économique des procédés de carbonatation accélérée

Auteurs / Organisme :

Frédéric BOUGRAIN et Mathilde DOUTRELEAU (CSTB)

Thème de rattachement :

GT2-3 – Evaluations économiques et environnementales

FCARB/R/007

LC/20/FCARB/046

27 septembre 2022

Sommaire

Sommaire	2
1 Introduction	5
2 Les flux de granulats : du chantier de déconstruction au chantier de construction	6
2.1 Les flux dans la construction en France.....	6
2.2 Les aspects logistiques.....	6
3 Analyse économique de la carbonatation des GBR : cadre théorique et hypothèses de calcul	11
3.1 Les coûts	11
3.2 La qualité des granulats.....	12
3.3 Les hypothèses relatives aux prix des granulats naturels et des granulats recyclés	12
3.4 Les hypothèses liées aux distances entre sites d'approvisionnement, de transformation et d'utilisation des granulats recyclés et carbonatés, des granulats recyclés et des granulats naturels	14
3.4.1 La distance du site de déconstruction à la plateforme de recyclage.....	15
3.4.2 La distance des sites d'extraction au chantier de construction	15
3.4.3 La distance de la plateforme de recyclage au chantier	15
3.4.4 La distance de la plateforme de recyclage au site de carbonatation accélérée	16
3.4.5 La distance du site de déconstruction assurant le recyclage au site de carbonatation accélérée	16
3.4.6 La distance du site de carbonatation au chantier	16
3.5 Les hypothèses liées au tarif du transport	16
4 Les cinq scénarios	18
5 Les coûts des processus de carbonatation accélérée	21
5.1 Les coûts d'acquisition, d'installation, de fonctionnement et de maintenance des deux démonstrateurs	21
5.1.1 Le cas du démonstrateur VICAT	21
5.1.2 Le cas du démonstrateur LAFARGE	22
5.2 Les coûts de production et d'acheminement d'une tonne de granulats carbonatés dans les deux cas	24
5.3 L'impact de la carbonatation sur le prix d'un m ³ de béton.....	26
6 L'impact du prix du carbone	30
6.1 Le principe de fonctionnement du marché.....	30
6.2 Le cas des cimentiers.....	31
6.3 Analyse du coût carbone des procédés de carbonatation accélérée	32
6.3.1 Le démonstrateur de l'usine VICAT.....	32
6.3.2 Le procédé industriel LAFARGE	33
6.3.3 Bilan économique lié au carbone pour chacun des procédés.....	35

7 Conclusion et perspectives	35
Bibliographie	37
ANNEXE 1	38

Tableau 1 : Description des variables nécessaires pour l'analyse économique du procédé de carbonatation	11
Tableau 2 : Ventes de matériaux – tarifs pratiqués par YPREMA en Bretagne et en Ile-de-France - Prix en € HT la tonne sauf indication contraire	13
Tableau 3 : Tarifs retenus pour le granulats naturel et les granulats recyclés.....	13
Tableau 4 : Flux de la figure 6	14
Tableau 5 : Tarifs de livraison en Ile-de-France – Prix en € HT	17
Tableau 6 : Flux logistiques supplémentaires correspondant à des scénarios alternatifs.....	18
Tableau 7 : Les distances parcourues dans les cinq scénarios	19
Tableau 8 : Les distances retenues dans les cinq scénarios	20
Tableau 9 : Les coûts d'investissement et de fonctionnement du démonstrateur VICAT	22
Tableau 10 Les coûts d'investissement et de fonctionnement du procédé industriel LAFARGE	23
Tableau 11 : Coût d'une tonne de granulats de béton carbonaté selon des coûts de transport de 1 et 2€ pour les procédés de carbonatation accélérés VICAT et LAFARGE	24
Tableau 12 : Les cinq scénarios mis en perspective.....	25
Tableau 13 : Taux d'incorporation des granulats recyclés suite à l'évolution de la norme EN206	27
Tableau 14 : Prix d'un m ³ de béton (scénario 30% de gravillons recyclés et 10% de sable recyclé et carbonaté).....	28
Tableau 15 : Prix d'un m ³ de béton (scénario 60% de gravillons recyclés et 30% de sable recyclé et carbonaté).....	29
Tableau 16 : Bilan du coût du carbone pour chacun des cas de figure	35
Tableau 17 : Les cimenteries en France.....	38
Figure 1 : Représentation schématique des flux dans la construction.....	6
Figure 2 : Nombre d'installations traitant des déchets inertes dans un rayon de 40 km des 12 principales agglomérations françaises.....	7
Figure 3 : Les centres de recyclage des déchets inertes du Nord-Est du Grand Paris.....	8
Figure 4 : Nombre de centres de recyclage dans un rayon de 30 km de l'agglomération principale de chaque département	8
Figure 5 : Les cimenteries en France	9
Figure 6 : Flux logistiques liés à la carbonatation des granulats jusqu'au chantier de construction.....	14
Figure 7 : Représentation schématique des flux correspondant aux sept scénarios	19
Figure 8: Coût d'une tonne de granulats de béton carbonaté selon des coûts de transport de 1 et 2€ pour le procédé de carbonatation accélérée LAFARGE.....	24
Figure 9 : Application du béton à base de granulats recyclés sur différentes parties d'un bâtiment	27
Figure 10 : Principes des marchés de quotas.....	30
Figure 11 : Evolution du prix du carbone simulé avec et sans réformes. Source : Chaire Economie du Climat, 2018	31
Figure 12 : Augmentation du prix du quota carbone - Carbon Viewer (Mars 2022).....	31
Figure 13 : Emissions captées et générées par la carbonatation dans le cas du démonstrateur VICAT	32
Figure 14 : Sensibilité du prix de la tonne CO ₂ à l'évolution du prix du carbone et de la distance parcourue dans le cas du démonstrateur VICAT	33
Figure 15 : Emissions captées et générées par la carbonatation dans le cas du procédé industriel LAFARGE	34

Figure 16 : Sensibilité du prix de la tonne CO₂ à l'évolution du prix du carbone et de la distance parcourue dans le cas du procédé LAFARGE34

Photo 1 : Le démonstrateur de la cimenterie VICAT à Créchy dans l'Allier21

Photo 2: Le carbonateur de l'usine LAFARGE.....23

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% (Pin, 2019). 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 à 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 par rapport à d'autres matériaux tels que le bois. Si le prix de la tonne de CO₂ poursuit sa hausse et le modèle économique et environnemental actuel n'évolue pas, la question de la survie de l'industrie cimentière se pose notamment si des mesures de compensation carbone aux frontières de l'Europe ne sont pas adoptées.

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'empreinte environnementale du béton à cause des émissions de gaz à effet de serre d'un de ses constituant, le ciment.

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 sur l'ensemble de sa chaîne de valeur.

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. Ces solutions mises au point ne pourront être adoptées et diffusées que si elles s'avèrent viables sur les plans environnemental et économique.

À la suite des différents tests industriels, seuls les démonstrateurs des sociétés VICAT et LAFARGE¹ ont été retenus. Par démonstrateurs industriels, on entend « *tout dispositif permettant de traiter par carbonatation accélérée des quantités industrielles de matériaux de déconstruction* »² Ces démonstrateurs s'appuient sur des technologies préexistantes qui ne requièrent pas de développement spécifique pour être mises en œuvre.

L'analyse qui suit, examine la viabilité économique du démonstrateur de VICAT qui est raccordé au four de la cimenterie de Créchy (Allier) et de celui de LAFARGE qui est raccordé au four de la cimenterie du Val d'Azergues (Rhône). Des analyses de sensibilité intégrant la distance parcourue par les granulats naturels 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. 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. Ceci permettra d'établir un lien avec les résultats de l'analyse environnementale.

Cette recherche est originale dans la mesure où aucune étude n'a cherché à apprécier la viabilité économique des procédés de carbonatation accélérée. Tienfenthaler et al. (2021) ont démontré la pertinence du processus 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 granulats 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.

¹ A l'été 2021, LafargeHolcim est devenu simplement Holcim. En France, on parle plus communément de Lafarge France, membre du groupe Holcim. Dans l'intégralité du rapport, c'est le nom de Lafarge qui est mentionné.

² L. Izoret, 2018, *Compte-rendu de réunion n°1*, Groupe de travail Approche Industrielle, Projet FastCarb, 30 janvier 2018.

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

2.1 Les flux dans la construction en France

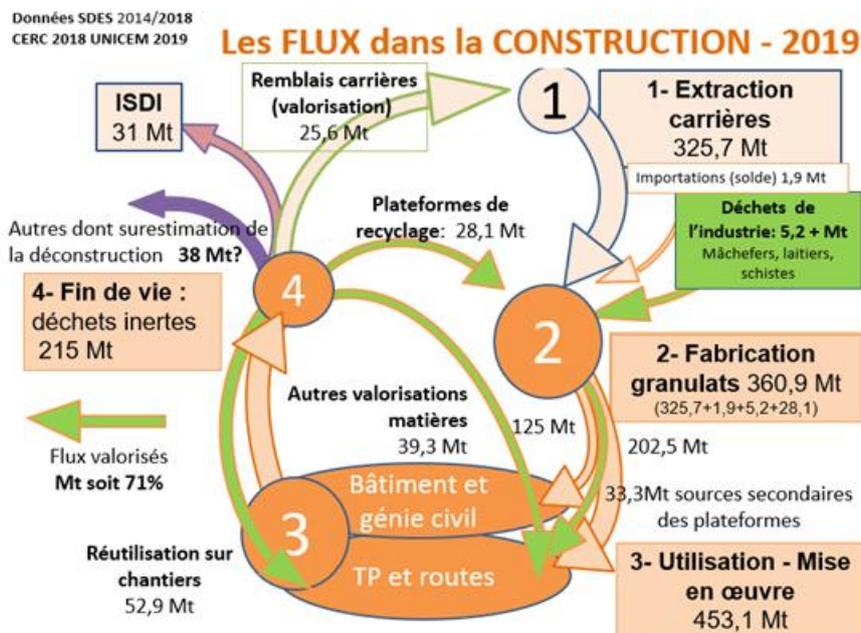
Dans la construction, les flux sont multiples, complexes et ils échappent parfois à la comptabilité nationale.

La figure 1 développée récemment par Bodet et Collonge (2022) illustre cette complexité et montre comment les flux de matière s'articulent en amont et en aval du chantier en France. En 2019, la construction et le génie civil ont ainsi eu recours à 325,7 millions de tonnes de granulats naturels (1,9 tonnes étaient importées). A ces deux ensembles s'ajoutaient 120,3 millions de tonnes de matière primaire secondaire soit un total de 453,1 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) empruntaient six destinations :

- 52,9 millions de tonnes étaient réutilisées sur le chantier ;
- 39,3 millions de tonnes bénéficiaient d'une autre valorisation matière
- 28,1 millions de tonnes étaient recyclées sur des plateformes avant de bénéficier de nouveaux aux activités des travaux publics ;
- 25,6 millions de tonnes étaient destinées au remblaiement des carrières ;
- 31 millions de tonnes étaient dirigées vers des Installations de Stockage des Déchets Inertes (ISDI) et
- 43 millions de tonnes avaient une destination inconnue.

Figure 1 : Représentation schématique des flux dans la construction



Source : Bodet et Collonge, 2022

2.2 Les aspects logistiques

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

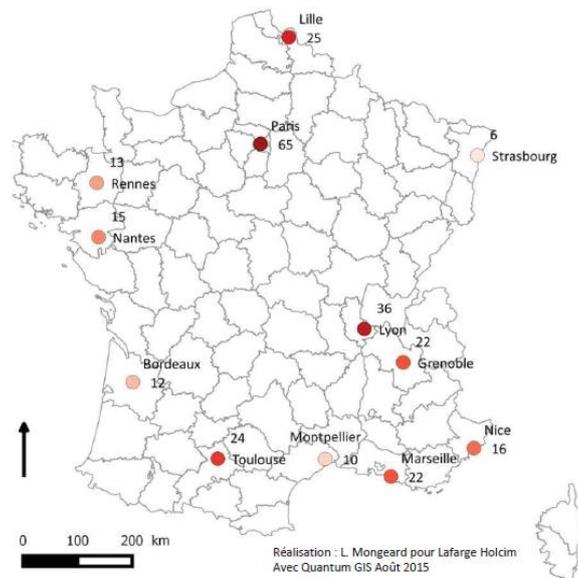
tendent à circonscrire leurs actions à un rayon de vingt kilomètres de leurs installations et les plateformes de recyclage réceptionnent rarement des matériaux qui proviennent d'un rayon supérieur à vingt kilomètres.

La compétitivité des matériaux pondéreux dépend ainsi étroitement de la distance qui sépare leur usage de leur origine. La distance entre la carrière et le chantier ou une plateforme intermédiaire qui stockera les granulats naturels sera ainsi à comparer avec les distances cumulées entre un chantier de déconstruction, une plateforme de recyclage et un chantier de construction. Ceci constitue l'élément décisif de la compétitivité économique de ces matériaux. Le recours à des granulats recyclés semble ainsi plus favorable dans et autour des grandes agglomérations qui bénéficient de gisements conséquents liés à la multitude de chantiers de déconstruction alors qu'au même moment, l'accès au granulats naturels 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 entre le recyclage et la mise en décharge. La carbonatation accélérée qui consiste à ajouter une étape supplémentaire au processus de transformation du granulats de béton se traduira par un flux logistique additionnel dès lors que cette carbonatation se déroulera dans une usine (par exemple une cimenterie).

Les centres de recyclage sont le plus souvent localisés à la périphérie des centres urbains.

Figure 2 : Nombre d'installations traitant des déchets inertes dans un rayon de 40 km des 12 principales agglomérations françaises

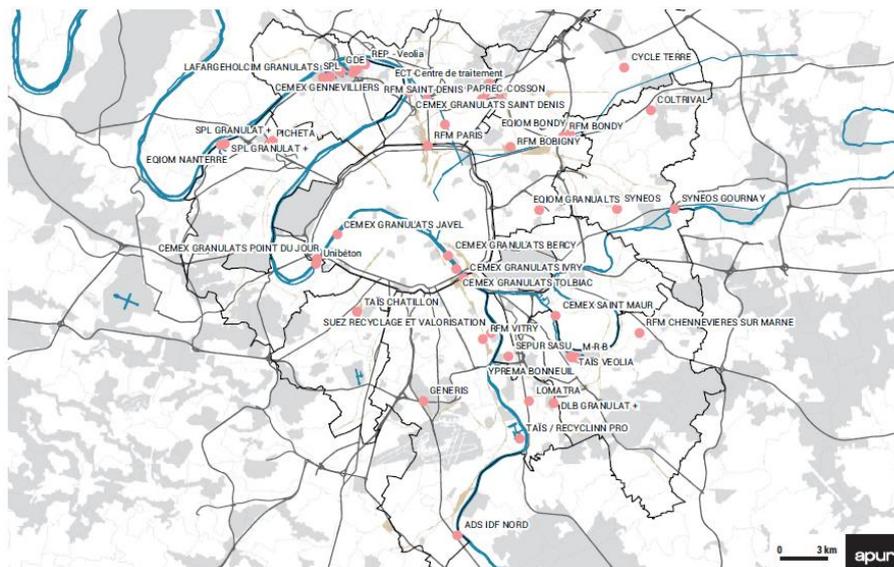


Source : Mongeard et Dross, 2016

Le cas de Paris est sur ce plan emblématique de la situation qui prédomine dans la plupart des grands métropoles françaises. Les plateformes de recyclage qui réceptionne une grande part des déchets inertes issus des chantiers de déconstruction sont installées à la périphérie de Paris, en première ou seconde couronne (figure 3).

Cette localisation en périphérie, là où le terrain disponible est important et moins cher, et à proximité des nœuds de transport, résulte d'une stratégie de minimisation des coûts de transport qui constituent le poste de coût principal pour une entreprise de démolition qui amène ses déchets inertes pondéreux sur une plateforme de recyclage. Mongeard (2017, p.73) citait un entrepreneur qui « estimait à 2 € le kilomètre de transport en camion, quand l'entrée d'un camion des déchets inertes mélangés sur un site coûte autour de 10 € ». Ceci explique pourquoi le représentant d'une plateforme de recyclage localisée en région parisienne indiquait que les déchets inertes qui transitaient sur sa plateforme provenaient à 50% d'un rayon de 10 km, à 85% d'un rayon de 15 km et jamais au-delà de 20 km.

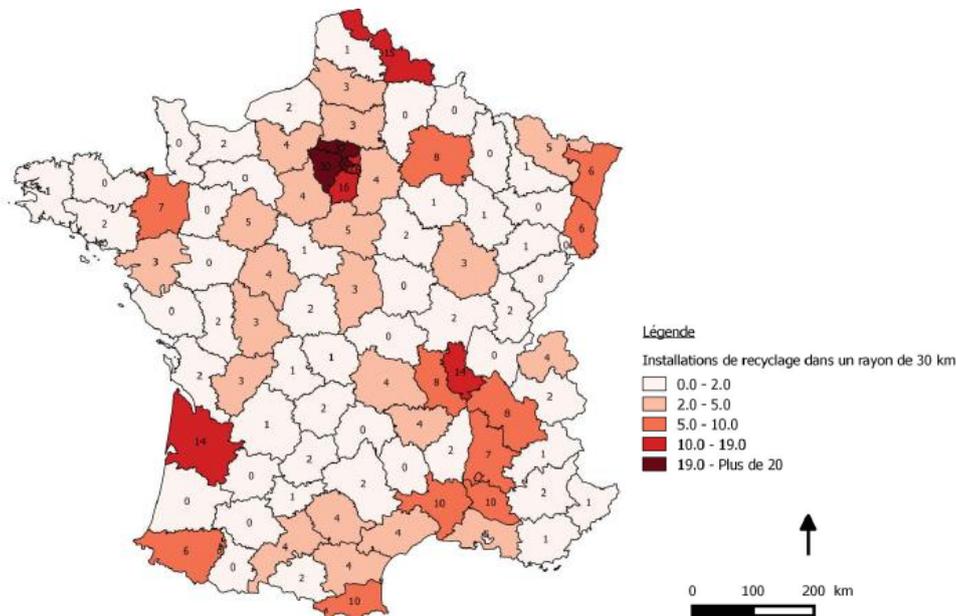
Figure 3 : Les centres de recyclage des déchets inertes du Nord-Est du Grand Paris



Source : APUR, 2020

Par ailleurs, la région parisienne bénéficie d'une matière première secondaire relativement abondante. Le gisement annuel pour le béton de déconstruction serait de 2,6 millions de tonnes (et de 4,7 millions de tonnes pour les déchets inertes en mélange – Région Ile-de-France, 2015). A l'inverse, l'approvisionnement en granulats naturels tend à s'éloigner. 45% des granulats naturels utilisés proviennent des départements limitrophes et 17% d'un rayon dépassant les 120 km. Cette situation pourrait rendre le GBR compétitif par rapport au granulat naturel qui est pénalisé par l'éloignement des sites d'approvisionnement et le coût du transport.

Figure 4 : Nombre de centres de recyclage dans un rayon de 30 km de l'agglomération principale de chaque département



Source : Mongeard et Dross, 2016

Néanmoins, cette logique de proximité géographique n'est pas systématique comme le rappelle Mongeard (2017).

La situation est diamétralement opposée dans des départements français moins urbanisés. L'Aisne, les Ardennes, la Meuse, les Vosges, la Manche, les Côtes d'Armor, la Mayenne, le Maine-et-Loire, la Charente-Maritime, le Doubs, la Nièvre, l'Allier, l'Ain, la Lozère, le Cantal, le

Lot-et-Garonne, le Gers, les Hautes Pyrénées, ne disposaient pas de plateforme pour déchets inertes à moins de 30 km de leur agglomération principale (figure 4). Ceci pénalise fortement le recours aux matériaux recyclés dans ces départements.

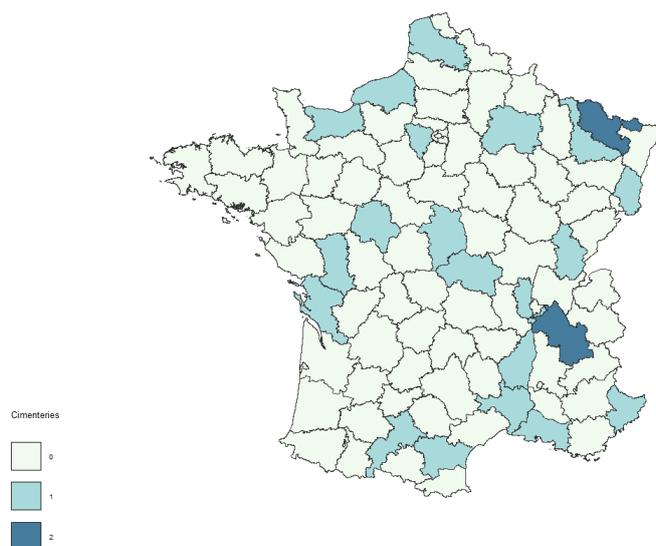
D'une part, les acteurs raisonnent parfois en distance-temps plutôt qu'en distance-coût. Des centres proches mais moins facilement accessibles à cause de routes congestionnées ou de la nécessité de traverser une agglomération ne sont pas toujours privilégiés. De même, la qualité des services offerte par la plateforme constitue une variable d'arbitrage. Le représentant d'une plateforme indiquait que les camions qui apportaient des déchets inertes destinés au recyclage repartaient rarement à vide afin de minimiser les coûts de transport. 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. Un autre représentant de plateforme localisée en région parisienne considérait que le succès de sa plateforme résultait de la fluidité de son site. Les camions qui livraient, étaient rapidement déchargés (puis chargés si nécessaire) et restaient donc peu de temps immobilisés sur la plateforme.

D'autre part, une logique de proximité relationnelle se substitue parfois à la logique de proximité géographique. Les filières de déconstruction et de recyclage forment des milieux assez fermés où tous les acteurs se connaissent. Certaines entreprises pourront ainsi privilégier une plateforme puisqu'elles connaissent bien le responsable qui leur offre des services supplémentaires ou des ristournes. De même une entreprise de déconstruction filiale d'un groupe pourra ainsi choisir une plateforme plus éloignée mais gérée par une entreprise de recyclage du même groupe.

La localisation des sites qui offriraient les conditions optimales pour une carbonatation accélérée s'inscrit dans un contexte très différent. Les sites industriels sont souvent implantés loin des villes mais proches des axes routiers principaux.

Dans le cadre du projet, c'est l'idée d'une carbonatation accélérée dans une cimenterie qui a été retenue. Ce cas sera privilégié puisque la carbonatation accélérée doit contribuer à améliorer le bilan carbone de l'industrie. La figure 5 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. Les adresses reprises en annexe 1 montrent que ces cimenteries restent éloignées des grands centres urbains.

Figure 5 : Les cimenteries en France



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 qui en sont très éloignés. La variable transport risque ainsi d'impacter fortement l'équilibre économique du processus industriel de carbonatation accélérée.

Ces éléments liés au transport des granulats constituent une contrainte forte qui est intégrée à l'analyse économique notamment dans les hypothèses portant sur les distances entre les lieux d'approvisionnement, de transformation et d'utilisation des granulats.

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

3.1 Les coûts

De façon schématique, les coûts liés au recours aux granulats recyclés puis carbonatés se divisent en deux grands postes : les coûts des processus de déconstruction, de recyclage et de carbonatation et les coûts du transport du granulat.

Tableau 1 : Description des variables nécessaires pour l'analyse économique du procédé de carbonatation

Thèmes	Données de coûts	Données géographiques
Activité de la carrière fournissant les granulats naturels (coûts d'extraction et de traitements des granulats naturels)	<ul style="list-style-type: none"> Coûts d'extraction des matériaux Coûts de traitement des granulats naturels 	
Activité de la plateforme de recyclage (coûts de traitement des granulats recyclés)	<ul style="list-style-type: none"> Coûts de réception facturé par une plateforme de recyclage à un producteur-constructeur (en fonction du matériau et de la quantité) Coûts de l'opération de recyclage pour une plateforme de recyclage (en fonction du matériau et de la quantité) 	
Activité du site de carbonatation (coûts de la carbonatation des granulats recyclés)	<ul style="list-style-type: none"> Coûts d'acquisition et d'installation des démonstrateurs (coûts fixes) Coûts de formation du personnel (coûts fixes) Coûts de fonctionnement et de maintenance des démonstrateurs (coûts variables) Durée d'amortissement des investissements 	
Logistique granulats naturels	<ul style="list-style-type: none"> Coûts de transport (en fonction de la quantité et surtout de la distance) de la carrière vers le chantier de construction 	<ul style="list-style-type: none"> Localisation des carrières
Logistique granulats recyclés	<ul style="list-style-type: none"> Coûts de transport (en fonction de la quantité et surtout de la distance) du chantier de déconstruction vers la plateforme de recyclage Coûts de transport de la plateforme de recyclage vers le site de carbonatation Coûts du chargement et du déchargement 	<ul style="list-style-type: none"> Localisation des plateformes de recyclage Localisation des sites de carbonatation (cimenteries)
Logistique granulats recyclés et carbonatés	<ul style="list-style-type: none"> Coûts de transport (en fonction de la quantité et surtout de la distance) vers le site de construction 	<ul style="list-style-type: none"> Localisation des sites de carbonatation (cimenteries)

La faisabilité économique du recyclage des déchets de béton et leur carbonatation peut être formalisée, de manière simplifiée, en décrivant les coûts des granulats naturels (C_N), les coûts des granulats recyclés (C_R) et les coûts des granulats recyclés puis carbonatés (C_{Carb}) comme suit :

$$C_N = C_{Gn} + C_{Tn}$$

$$C_R = C_{Gr} + C_{TrGr} + C_{qualité}$$

$$C_{Carb} = C_R + C_{CarbGr} + C_{TrGrRC} + C_{qualité}$$

C_{Gn} : coûts d'extraction et de traitement des granulats naturels

C_{Tn} : coûts de transport des granulats naturels

C_{Gr} : coûts de traitement des granulats recyclés

C_{TrGr} : coûts de transport des granulats du chantier de déconstruction vers la plateforme de recyclage (en cas de recyclage sur site de déconstruction, ces coûts sont nuls)

C_{TrGrR} : coûts de transport des granulats recyclés sur la plateforme de recyclage vers le site de carbonatation (en cas de carbonatation sur site / plateforme de recyclage, ces coûts sont nuls)

C_{CarbGr} : coûts de la carbonatation des granulats recyclés

C_{TrGrRC} : coûts de transport des granulats recyclés et carbonatés du site de carbonatation vers le chantier de construction

$C_{qualité}$: coûts de la qualité

Les granulats recyclés présentent un intérêt économique si et seulement si : $C_R < C_N$

De même les granulats recyclés et carbonatés présentent un intérêt économique si et seulement si : $C_{Carb} < C_N$

3.2 La qualité des granulats

La qualité des granulats recyclés est en règle générale inférieure à celle des granulats naturels. Il présente en effet une porosité plus élevée à cause de la gangue de ciment qui les entoure et leurs caractéristiques mécaniques sont dégradées par rapport à des granulats naturels.

Néanmoins, elle peut être supérieure si les matériaux concassés pour arriver au granulat recyclé sont de bonne qualité et si à l'inverse les granulats naturels sont de piètre qualité. En outre, la présence de résidu de ciment dans des granulats recyclés peut renforcer la qualité du GBR. C'est ce qui fut mis en avant dans le cas du chantier expérimental Le Onze à Chartres. Ce projet démonstrateur qui n'a pas conduit à une hausse des coûts de construction comprenait douze logements du T2 (41 m²) au T4 (97 m²). Sur les 400m³ de bétons utilisés pour la structure des logements, environ 80 tonnes, soit 20% du volume, étaient constituées de GBR de la marque GRANUDEM (Bazzana et al., 2020). Les 80 tonnes furent utilisées sur différentes parties d'ouvrage et à partir de différentes techniques constructives : béton prêt à l'emploi (BPE) et parties d'ouvrage préfabriquées en béton. Le CERIB (Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton) accompagna l'ensemble des acteurs du projet par une aide à la mise en œuvre et des tests techniques démontrant que la qualité des bétons n'était pas altérée par le recours au GRANUDEM. Les tests effectués en amont pour la société POULLARD révélèrent que la résistance des bétons utilisés pour le projet était supérieure à celle de bétons utilisant uniquement des granulats naturels locaux. La faible qualité de la matière première primaire, la qualité de la matière première secondaire et du process de recyclage, expliquent ce résultat.

Quant au processus de carbonatation, il est apparu à la suite des analyses de laboratoire qu'il n'améliore pas la qualité des granulats recyclés.

3.3 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. Pour ces derniers deux types de valorisation sont possibles :

- En sous-couche routière ;
- 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. Très peu de sociétés indiquent publiquement leurs tarifs. La société YPREMA qui se définit comme une société de « *transformation des matériaux de déconstruction, des mâchefers d'incinération et des terres inertes* » et emploie environ 80 salariés dans quatre régions, affiche les tarifs qu'elle pratique en Ile-de-France et en Bretagne (tableau 2).³ Ces tarifs sont probablement négociables mais ils montrent que la problématique de la gestion des matériaux naturels et issus de la déconstruction, est locale. Au sein de l'Ile-de-France, il existe aussi des disparités régionales assez fortes. Par ailleurs, la comparaison intrarégionale est délicate dans la mesure où les matériaux appartenant à une même catégorie peuvent avoir des qualités différentes.

Tableau 2 : Ventes de matériaux – tarifs pratiqués par YPREMA en Bretagne et en Ile-de-France - Prix en € HT la tonne sauf indication contraire

Matériaux recyclés	Exemples d'utilisation	Bonneuil/ Marne (74)	Trappes (78)	Pluguffan (29)
Recyclés mixtes (béton et couches de chaussée) –				
Grave concassée industrielle 0/31,5	Couche de fondation de base	17,90€	14,30€	7,90€
Tout béton				
Grave de béton concassé 0/31,5	Couche de fondation et de base	23,90€	18,40€	10,10€
Matériaux naturels (TGAP comprise) – taxe générale sur les activités polluantes +0,20€/t				
Gravillon silico-calcaire 5/25	Lit de pose drainant	43,10€	43,10€	-
Grave naturelle 0/31,5 (GNTA)	Couche de forme et de fondation	-	-	13,80€
Big Bag – Prix en € HT à l'unité				
Grave concassée industrielle 0/31,5	Remblai et sous-couche de voirie	39,40€		26,30€
Grave de béton concassé 0/31,5	Structure de route et de chaussée	48,40€		31,40€

Source : YPREMA, 2020

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 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 3 indique les données transmises par ces experts et précise le tarif retenu pour la suite de l'analyse.

Tableau 3 : 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 https://www.yprema.fr/index.php?rub=nos_tarifs

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

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

- Du chantier de déconstruction à la plateforme de recyclage ;
- De la plateforme de recyclage au site de carbonatation ;
- Du site de carbonatation au chantier de construction.

La figure 6 et le tableau 5 caractérisent ces trois flux.

Figure 6 : Flux logistiques liés à la carbonatation des granulats jusqu'au chantier de construction

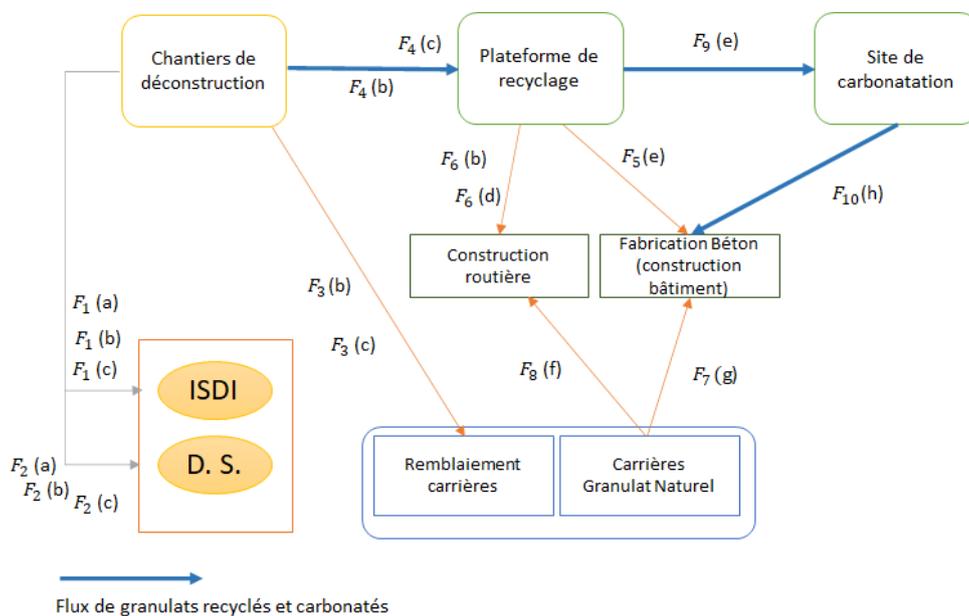


Tableau 4 : Flux de la figure 6

Flux	Description	Type matériaux
F ₁	Chantier de déconstruction → ISDI (Installation de Stockage des Déchets Inertes)	a, b, c
F ₂	Chantier de déconstruction → décharge sauvage	a, b, c
F ₃	Chantier de déconstruction → remblaiement de carrières	b, c
F ₄	Chantier de déconstruction → plateforme de recyclage	b, c
F ₅	Plateforme de recyclage → fabrication béton	e, h
F ₆	Plateforme de recyclage → construction routière	b, d
F ₇	Carrières / granulat naturel → fabrication béton	g
F ₈	Carrière / granulat naturel → construction routière	f
F ₉	Plateforme de recyclage → site de carbonatation	e
F ₁₀	Site de carbonatation → fabrication béton	h

Où a : inertes non valorisables ; b : inertes valorisables en terrassement ; c : déchets de béton ; d : granulats à béton recyclé qualité « routière » ; e : granulats à béton recyclé qualité « béton » ; f : granulats naturels alternatifs (impropres à la consommation de béton) ; g : granulats naturels pour la fabrication béton ; h : granulés recyclés qualité « béton » carbonatés

3.4.1 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. Cette donnée résulte de l'analyse opérée au stade de la section 2.2 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.

Cette distance de 25 kilomètres correspond à la distance maximale acceptable pour transporter du GBR dans le cadre de l'obtention du label suisse MINERGIE-ECO®. Les principes qui ont conduit au développement de ce label suisse en 2006, peuvent sans doute s'appliquer à la France. Parmi les critères à respecter sans exception pour satisfaire aux exigences du label, l'un concerne le recyclage du béton. Il est notamment indiqué que « *là où du béton RC peut être utilisé, sa fraction volumique (selon le cahier technique SIA 2030) ne doit pas être inférieure à 50%* »⁴. Néanmoins, comme le transport de ce matériau à faible valeur ajoutée représente parfois une part conséquente de son coût et que l'impact environnemental du transport par camion est négatif, le critère d'exclusion est levé si aucune entreprise ne peut fournir du RC-béton dans un rayon de 25 kilomètres ou encore si le matériau recyclé doit être transporté plus de 25 kilomètres jusqu'à la centrale à béton.

Au regard de ces différents éléments qui intègrent une contrainte environnementale, cette distance maximale de 25 kilomètres semble un choix raisonnable et acceptable.

Du fait du caractère pondéreux du béton et coût du transport, la stratégie du double fret est recherchée par les entreprises qui transportent les matériaux mais elle n'est cependant pas toujours possible à mettre en œuvre. On supposera donc que le camion repart avec des matériaux recyclés ou naturels (les plateformes de recyclage stockent fréquemment des granulats naturels dans cette optique) une seule fois sur deux. La distance totale maximale retenue est donc de 37,5 kilomètres (25 + 12,5) alors que la minimale est de 7,5 kilomètres (5 + 2,5).

Si le recyclage a lieu sur le site de déconstruction, la distance tombe à zéro. Pour être mise en place, cette solution suppose de disposer d'un site de déconstruction suffisamment grand afin de pouvoir stocker les matériaux concassés. Tous les projets de déconstruction qui se déroulent en ville n'offrent généralement pas cette possibilité.

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

Les hypothèses liées aux distances de transport se baseront sur les travaux de Mongeard 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 carrières⁵. L'hypothèse d'une distance maximale de 30 kilomètres, sera donc retenue pour le granulats naturels. La distance minimale sera fixée à 5 kilomètres.

3.4.3 La distance de la plateforme de recyclage au chantier

Afin de suivre les conventions précédentes, on suppose 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

⁴ « La fraction volumique se réfère à la totalité des constructions en béton, y compris le béton de remplissage, d'enrobage et les lits de béton. » MINERGIE, 2016, MINERGIE-ECO – Questionnaire et indications pour les nouvelles constructions, Version 1.3/Janvier 2016 (révisé en mars 2016).

⁵ Lorsque la moyenne des distances minimales était prise en compte, l'écart était en revanche favorable d'environ 3 kilomètres pour les carrières.

recyclage et le site de construction (route ou bâtiment) seront 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 granulat sur chantier sera alors comprise entre 7,5 et 37,5 kilomètres.

3.4.4 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. Sur la base des éléments de contexte de la section 2.2, 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 GBR sur la plateforme de recyclage pour le transporter vers la cimenterie (site de la carbonatation accélérée) apportera une fois sur deux des déchets. Les distances minimale et maximale à considérer sont 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 (12,5 km + 2 x 50 km). Le scénario optimum donne une distance minimale de 12,5 (2,5 km + 2 x 5 km).

3.4.5 La distance du site de déconstruction assurant le recyclage au site de carbonatation accélérée

Les camions qui se déplacent pour charger du granulat recyclé ou carbonaté sur un site de déconstruction arrivent systématiquement à vide alors que le double fret est envisagé une fois sur deux lorsqu'il y a un chargement sur plateforme de recyclage. La distance parcourue par un camion qui livrera du granulat de béton recyclé à une cimenterie depuis un site de déconstruction, sera ainsi comprise entre 15 et 125 km (25 km au maximum pour accéder au site de déconstruction, 50 km pour atteindre la cimenterie et autant pour en revenir – dans le meilleur des cas le site de déconstruction de la cimenterie comme dans le cas 3.4.4).

3.4.6 La distance du site de carbonatation au chantier

Afin d'être cohérent avec les hypothèses précédentes, la distance maximale retenue entre le site de carbonatation (cimenterie) et le chantier est de 50 kilomètres et la distance minimale de 5 kilomètres. Pour le camion la distance d'accès au site de carbonatation s'établit dans la même fourchette : de 5 à 50 km. Il est intégré aux calculs. En revanche, la distance parcourue par les camions vides au retour du chantier de construction n'est pas prise en compte. Les distances totales retenues au titre de ce flux sont donc comprises entre 10 et 100 km.

3.5 Les hypothèses liées au tarif du transport

Les coûts liés au transport sont très impactants. Ces tarifs sont variables selon les régions. La distance-temps influence les tarifs pratiqués. Dans les milieux les plus denses, là où le risque d'allongement du temps de transport est aussi le plus fort, les prix sont plus élevés.

Dans ses fiches tarifaires pour la Bretagne et l'Île-de-France, la société YPREMA se contente d'indiquer que pour les livraisons à la tonne, les « tarifs sont établis suivant un distancier ». Pour l'Île-de-France pour les livraisons par benne, les tarifs varient selon la taille du camion, le temps où le camion est mobilisé et la distance (tableau 5).

Sur la base du tableau 5 et d'échanges avec des représentants de la profession des cimentiers, une fourchette allant de 1 à 2 euros a été retenue pour une tonne de granulat transportée pendant 10 kilomètres. Ces prix évoluent en fonction du temps de transport comme le montre le tableau. La fourchette haute serait a priori atteinte pour des distances

courtes qui sont dominantes dans les flux qui ne concernent pas la carbonatation alors que la fourchette basse s'appliquerait sans doute davantage à des distances longues liées au transport vers une cimenterie éloignée des centres urbains.⁶

Tableau 5 : Tarifs de livraison en Ile-de-France – Prix en € HT

	Charge utile	1/3 de journée ou 1 tour isolé entre 10 et 20 km de la centrale	1/4 de journée ou 1 tour isolé à moins de 10 km de la centrale
Camion 8 x 4	16t	240€	180€
Semi	30t	250€	190€

Source : YPREMA, 2020

⁶ Concernant la métropole lyonnaise, Mongeard (2017) indiquait des tarifs de 2 euros par kilomètre (cf. section 2.2).

4 Les cinq scénarios

Dans le cadre du projet, c'est l'idée d'une carbonatation accélérée dans une cimenterie qui a été retenue. Les deux projets démonstrateurs sont testés sur le site VICAT à Créchy dans l'Allier et le site LAFARGE au Val d'Azergues dans le Rhône.

Le coût de cette carbonatation dans une cimenterie (après un recyclage des granulats sur une plateforme de recyclage – scénario D – ou sur le site de déconstruction – scénario E) sera comparé aux coûts de solutions plus traditionnelles telles que le recours à des granulats naturels (scénario A) ou des granulats recyclés. En matière de valorisation, deux voies sont à mettre en parallèle : la sous-couche routière (scénario B) qui correspond toujours à l'usage quasi-exclusif des granulats recyclés à ce jour et le bâtiment (« le béton dans le béton » - scénario C).

Les cinq scénarios examinés sont donc :

- 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 ;
- Scénario D : recours à du granulat de béton recyclé et carbonaté (GBRC) après un recyclage du granulat sur une plateforme de recyclage et une carbonatation sur un site type cimenterie ;
- Scénario E : recours à du GBRC après un recyclage du granulat sur le site de déconstruction et une carbonatation sur un site type cimenterie ;

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

La figure 7 précisent les flux qui contribuent au coût final du granulat livré sur chantier de construction. Comme le prix du granulat recyclé retenu est le prix au départ de la plateforme de recyclage et que le prix du granulat naturel est celui en sortie de carrière, les flux qui interviennent avant ces deux étapes ne seront pas pris en considération pour le calcul du coût final du GBR et du GBRC (les coûts liés étant déjà intégrés dans les prix des granulats). Mais les distances seront mentionnées dans la mesure où elles seront intégrées ultérieurement à l'analyse environnementale. Par rapport à la figure 6, cinq flux supplémentaires sont pris en compte (tableau 6).

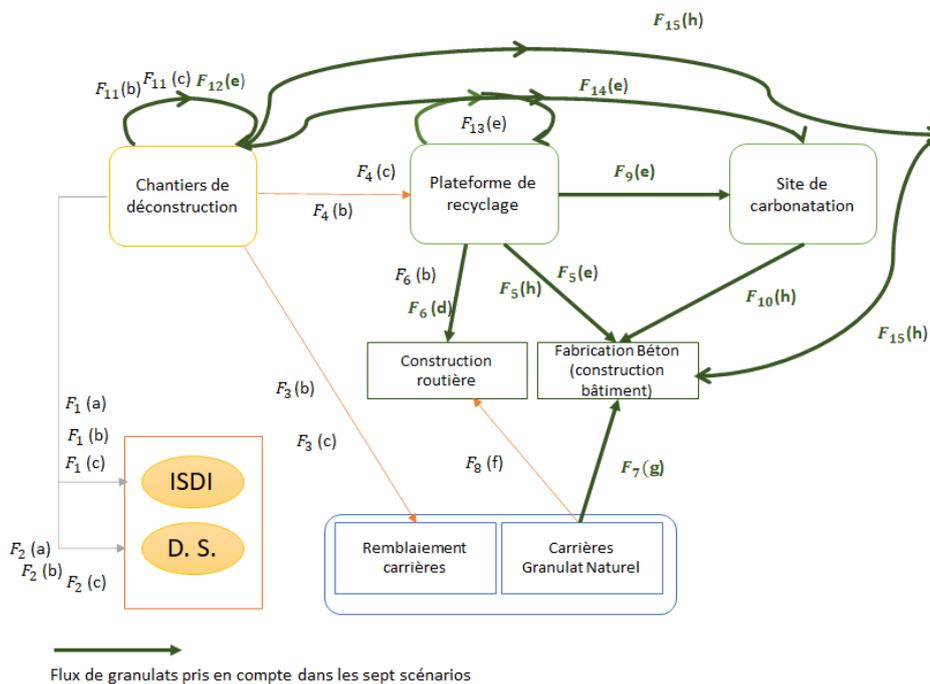
Tableau 6 : Flux logistiques supplémentaires correspondant à des scénarios alternatifs

F ₁₁	Chantier de déconstruction → Chantier de déconstruction (recyclage sur site)	b, c
F ₁₂	Chantier de déconstruction (après recyclage sur site) → Chantier de déconstruction (carbonatation sur site)	e
F ₁₃	Plateforme de recyclage → carbonatation sur plateforme	e
F ₁₄	Chantier de déconstruction après recyclage in situ → site de carbonatation	e
F ₁₅	Chantier de déconstruction après recyclage et carbonatation in situ → fabrication béton	h

Où *b* : inertes valorisables en terrassement ; *c* : déchets de béton ;

e : granulats à béton recyclé qualité « béton » ; *h* : granulés recyclés qualité « béton » carbonatés

Figure 7 : Représentation schématique des flux correspondant aux sept scénarios



Pour chaque scénario, il existe une multitude de configurations possibles liées aux fourchettes hautes et basses des distances retenues. Pour chaque flux, ces hypothèses iront d'une situation très favorable où la distance entre chaque site est minimale à une situation défavorable où la distance est maximale. Entre les deux, un continuum de valeurs est possible.

Le tableau 7 résume les distances parcourus par les camions entre le premier point de chargement du granulat (soit la carrière dans le cas du granulat naturel, soit le site de déconstruction dans le cas du GBR et du GBRC) et le chantier de construction d'un nouveau bâtiment, pour les cinq scénarios examinés.

Dans le cadre d'un bilan environnemental, ce sont les distances qu'il convient de retenir en faisant varier le taux de charge. Néanmoins, dans le cadre d'un bilan économique, dans les quatre scénarios intégrant du granulat recyclé, le premier flux (les distances bleues du tableau 8) n'est pas pris en compte dans les calculs réalisés afin d'éviter un double comptage. Ces flux sont intégrés de fait dans le prix des granulats recyclés donné par les experts qui est le prix de vente de la plateforme de recyclage – cf. tableau 3). Par ailleurs, les hypothèses logistiques liées à la stratégie du double fret (cf. section 3.4) amènent à considérer que le camion qui transportera le granulat recyclé vers le site de construction ou vers la cimenterie, arrive parfois déjà rempli de déchets ou de granulats naturels. Pour prendre en compte cette éventualité, ce n'est donc plus une distance totale minimale de 10 km qui est prise en compte pour le flux plateforme – chantier mais de 7,5 km. Les distances retenues (tableau 8) pour les calculs économiques s'avèrent ainsi inférieures aux distances parcourues par les camions.

Tableau 7 : 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
Scénario E	0	0	15	125	10	100	25	225

Tableau 8 : Les distances retenues dans les cinq 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
Scénario E	0	0	15	125	10	100	17,5	187,5

Dans les scénarios D et E, la carbonatation se déroule dans la cimenterie. Dans les deux cas, la probabilité de se situer vers les valeurs hautes de la fourchette est plus importante. En effet, l'hypothèse basse de ces deux scénarios suppose que la cimenterie se situe à 5 kilomètres de la plateforme de recyclage et à 5 kilomètres du futur chantier de construction. Un tel cas ne sera qu'exceptionnel. A l'inverse 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 sera a priori plus fréquent.

Le scénario E conduit à recycler le granulat sur site de déconstruction. Pour que cette solution soit privilégiée, le site doit être suffisamment grand pour procéder à cette opération de recyclage et le coût plus faible qu'un recyclage sur plateforme. Ce gain est sans aucun doute variable d'un projet à l'autre. Pour ce scénario E, ce gain a été estimé équivalent à celui engendré par l'absence de transport en flux 1. La distance retenue dans le scénario E correspond ainsi à la somme des flux 2 et 3 diminuée du flux 1 des scénarios B, C ou D. Ceci permet de défalquer du prix du granulat recyclé en sortie de plateforme, le gain lié à la baisse de la distance parcourue lors d'un recyclage sur site de déconstruction.

La section suivante applique les scénarios aux démonstrateurs de LAFARGE et VICAT.

5 Les coûts des processus de carbonatation accélérée

5.1 Les coûts d'acquisition, d'installation, de fonctionnement et de maintenance des deux démonstrateurs⁷

Les calculs et les résultats économiques menés pour les deux démonstrateurs ne sont pas strictement comparables. Les données obtenues du groupe VICAT concernent le démonstrateur, installation temporaire testée dans un projet pilote. Celles adressées par le groupe LAFARGE résultent d'un projet pilote similaire. Néanmoins, il a été décidé de procéder à une extrapolation pour un équipement industriel, c'est-à-dire une installation pérenne, dotée d'une capacité de production beaucoup plus importante mais nécessitant aussi des investissements plus conséquents.

5.1.1 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). Le coût d'acquisition s'éleva à 40 000€ et sa remise en état à 20 000€.

Le système retenu permet d'avoir un bon échange entre les gaz. Il convenait de l'installer près d'une source de CO₂. L'idéal aurait été la tour de préchauffage où le CO₂ atteint une concentration de 25%. Mais une telle installation aurait été trop coûteuse. Le positionnement après le broyeur offre un taux de concentration moindre (16%) car l'air vient diluer le taux. Néanmoins, cette solution offrait un raccordement à un coût 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 €.

Photo 1 : Le démonstrateur de la cimenterie VICAT à Créchy dans l'Allier



⁷ Les données exposées dans cette section ont été transmises par les sociétés VICAT et LAFARGE que nous remercions.

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). C'est optimal pour la carbonatation car ce béton n'a jamais été à l'air. 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 granulats en deux heures. Ceci donne une capacité de production annuelle de 10 500 tonnes. La livraison s'effectuant avec des camions de 25 tonnes, cela représente 420 trajets.

Le tableau 9 résume l'ensemble des données nécessaires au calcul du coût de production et d'acheminement d'une tonne de granulats de béton recyclé et carbonaté.

Tableau 9 : Les coûts d'investissement et de fonctionnement du démonstrateur VICAT

Montant de l'investissement initial	150 000
Coûts de main d'œuvre	90 000
Coûts d'entretien	10 000
Coûts de fonctionnement (électricité)	10 500
Durée d'amortissement	5 ans
Capacité de production (tonnes)	10 500
Coût transport (mini) pour une tonne pour 1 km	0,10 €
Coût transport (maxi) pour une tonne pour 1 km	0,20 €
Coût transport (mini) pour un camion pour 1 km (25 tonnes)	2,50 €
Coûts transport (maxi) pour un camion pour 1 km (25 tonnes)	5,00 €
Nombre de trajets annuels envisageables	420
Durée de vie	10 ans

5.1.2 Le cas du démonstrateur LAFARGE

Le démonstrateur mis en œuvre au sein de l'usine LAFARGE de Val d'Azergues (banlieue de Lyon) est un sécheur à lit fluidisé acheté d'occasion dont le coût d'acquisition s'éleva à 180 000€. Sur cette base une extrapolation a été menée par les ingénieurs de LAFARGE dans la perspective d'un investissement industriel. L'enjeu est d'examiner la viabilité économique d'un procédé industriel doté de capacités de production plus importantes. Le coût de cet équipement industriel a été estimé à 3 400 000€ avec une durée d'amortissement de dix ans. Ce coût se répartirait entre 2,5 millions d'euros d'équipement (carbonateur, ventilateur, filtres, etc.), 230 000 euros de branchements électriques, 270 000 euros de main d'œuvre et une provision de 400 000 euros pour couvrir les aléas liés au passage à une production industrielle.

Il est 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 granulats de béton recyclés carbonatés. La livraison s'effectuant avec des camions de 25 tonnes, cela représente 1 252 trajets.

Les coûts de main d'œuvre sont équivalents à ceux liés au démonstrateur VICAT. En revanche les coûts d'entretien annuels sont trois fois supérieurs et ils s'élèvent à 30 000€ par an. A cela

s'ajoute un coût de fonctionnement électrique. La puissance du ventilateur étant de 115kW/h, sa durée de fonctionnement de 12 heures pendant 261 jours, au coût estimé du mégawattheure de 63 euros, le coût de fonctionnement s'établit à 22 691 euros.

Photo 2: Le carbonateur de l'usine LAFARGE



Le coût des granulats naturels fournis localement offrant des propriétés similaires peut varier de 9 à 20€/tonne. Une moyenne de 13 €/tonne a été retenue comme dans le cas de VICAT.

Le tableau 10 résume l'ensemble des données nécessaire au calcul du coût de production et d'acheminement d'une tonne de granulat de béton recyclé et carbonaté.

Tableau 10 Les coûts d'investissement et de fonctionnement du procédé industriel LAFARGE

Montant de l'investissement initial	3 400 000
Coûts de main d'œuvre	90 000
Coûts d'entretien	30 000
Coûts de fonctionnement (électricité)	22 691
Durée d'amortissement	10 ans
Capacité de production (tonnes)	31 300
Coût transport (mini) pour une tonne pour 1 km	0,10 €
Coût transport (maxi) pour une tonne pour 1 km	0,20 €
Coût transport (mini) pour un camion pour 1 km (25 tonnes)	2,50 €
Coûts transport (maxi) pour un camion pour 1 km (25 tonnes)	5,00 €
Nombre de trajets annuels envisageables	1 252

5.2 Les coûts de production et d'acheminement d'une tonne de granulats carbonatés dans les deux cas

L'ensemble des coûts précédemment annoncés ont été compilés et le coût d'une tonne de granulats 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.

On obtient ainsi deux séries de coûts (figure 9). Le tableau 11 expose les coûts minimum et maximum des scénarios D et E, selon des distances croissantes (minimales et maximales du tableau 8).

Figure 8: Coût d'une tonne de granulats de béton carbonaté selon des coûts de transport de 1 et 2€ pour le procédé de carbonatation accélérée LAFARGE

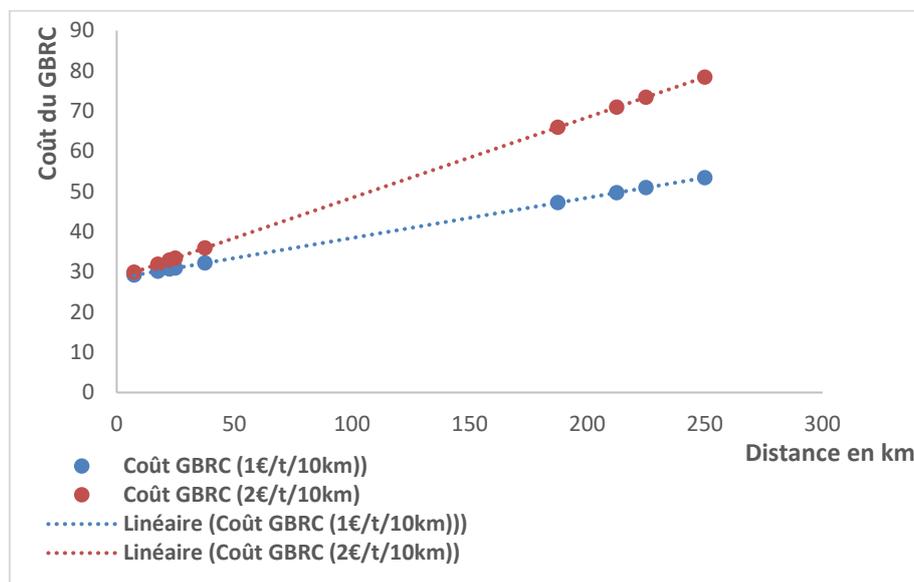


Tableau 11 : Coût d'une tonne de granulats de béton carbonaté selon des coûts de transport de 1 et 2€ pour les procédés de carbonatation accélérés VICAT et LAFARGE

Distance en km	Coût d'une tonne de granulats de béton carbonaté sur la base d'un coût de transport de 1€/t/10 km		Coût d'une tonne de granulats de béton carbonaté sur la base d'un coût de transport de 2€/t/10 km	
	VICAT	LAFARGE	VICAT	LAFARGE
7,5	27,13	29,17	27,88	29,92
17,5	28,13	30,17	29,88	31,92
22,5	28,63	30,67	30,88	32,92
25	28,88	30,92	31,38	33,42
37,5	30,13	32,17	33,88	35,92
187,5	45,13	47,17	63,88	65,92
212,5	47,63	49,67	68,88	70,92
225	48,88	50,92	71,38	73,42
250	51,38	53,42	76,38	78,42

Le tableau 12 permet de comparer les cinq 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.

Tableau 12 : Les cinq scénarios mis en perspective

	Distance totale (km)		Coût d'une tonne de granulat (1€/t/10km)		Coût d'une tonne de granulat (2€/t/10km)					
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi				
Scénario A – Granulat naturel	5	30	13,5	16	14	19				
Scénario B – Granulat recyclé pour sous-couche routière	7,5	37,5	11,7	14,7	12,5	18,5				
Scénario C – Granulat recyclé 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
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
Scénario E – Recyclage site déconstruction et carbonatation cimenterie	17,5	187,5	28,1	45,1	30,2	47,2	29,9	63,9	31,9	65,9

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

Pour un usage bâtiment, le granulat naturel bénéficie d'un avantage compétitif sur le recyclé si les distances de transport sont identiques. Néanmoins, cet avantage disparaît lorsque les distances de transport sont faibles pour le recyclé et maximales pour le granulat 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 granulat naturel tendent à s'éloigner et nécessitent davantage de transport⁸. Pour que cette filière émerge vraiment, il conviendrait cependant 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 granulat recyclé.⁹

En outre, 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

⁸ Un recyclage in situ des granulats s'avérerait encore plus favorable sur le plan économique dans la mesure où elle minimise les coûts liés au transport. Néanmoins, ce recyclage in situ est très dépendant des conditions locales et notamment de l'espace disponible pour stocker les matériaux sur le chantier de déconstruction. Par ailleurs, les habitations riveraines sujettes aux nuisances sonores sont un autre facteur à intégrer. Le bruit lié au concassage et au criblage peut compenser les nuisances liées aux allées et venues des camions transportant les déchets vers la plateforme de recyclage.

⁹ Par exemple, le cimentier EQIOM vient d'ouvrir début 2022, une plateforme qui permet de valoriser 50 000 tonnes de matériaux recyclés par an. 20% des matériaux recyclés sont réintégrés dans les formulations de béton et les 80% restant dédiés à des applications routières.

12€/t pour du sablon.¹⁰ Dans ce cas de figure, le granulats recyclés pour un usage bâtiment présente un fort avantage compétitif.

Les scénarios avec carbonatation dans une cimenterie s'avèrent tous défavorables. Ceci résulte d'une part du processus industriel qui est plus long. L'étape supplémentaire liée à 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, la carbonatation occasionne davantage de transport dès lors qu'elle se déroule sur une cimenterie. 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.

Les gains environnementaux liés à la carbonatation n'ont pas été pris en compte à ce stade. On peut juste craindre que les gains obtenus soient effacés par les émissions de carbone associées au transport vers le site de carbonatation. Ce point sera examiné dans la partie suivante.

La section suivante examine si la prise en compte du prix du carbone permet de nuancer ces conclusions.

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

Le granulats recyclés carbonatés souffrent d'un désavantage compétitif par rapport au granulats naturels et au granulats recyclés 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 granulats.

Pour 1 m³ de béton, le dosage suivant a été retenu :

- Ciment : 250 kg ;
- Gravillons : 1 200 kg ;
- Sable : 800 kg ;
- Eau : 125 litres.

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

1. Prix sur Paris d'un CEM II 42,5 R livré dans une centrale à béton 115-120 €/t
2. 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 Project¹¹ qui indiquait 120€/t pour du ciment gris. Sur cette base, le prix de la tonne de ciment a été considérée égale à 120 euros.

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

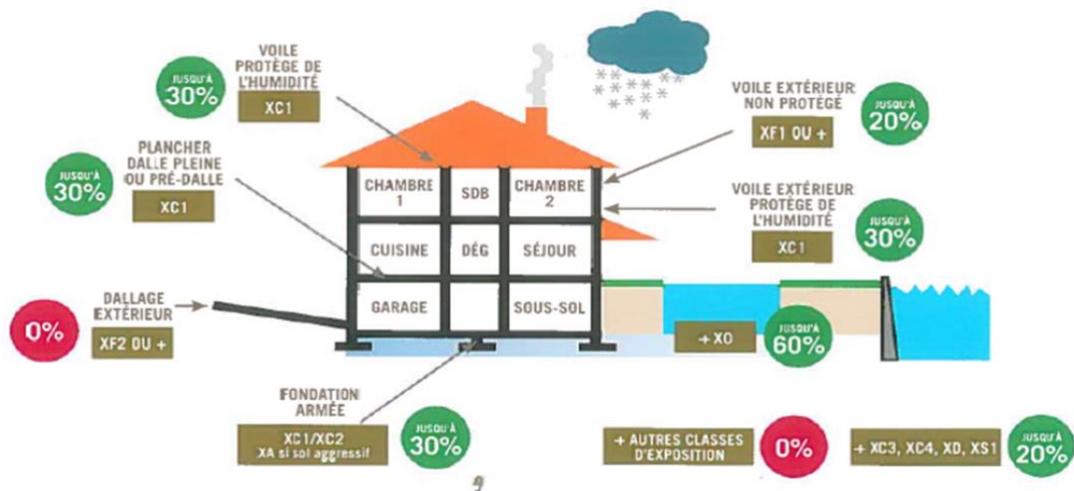
Enfin, différentes hypothèses ont été retenues quant au pourcentage de granulats de béton recyclés et carbonatés à intégrer dans la formule.

Selon la norme NF EN 206 en vigueur en France, le recours à du granulats recyclés reste limité et est fonction de l'exposition. Le graphique ci-dessous correspond à la situation actuelle.

¹⁰ Ces explications ont été apportées par Raoul de PARISOT, président du projet FastCarb. Les prix des granulats pour béton deux autres places de marché étaient les suivants :
Lyon : 14 €/t en moyenne quasi exclusivement en alluvionnaire.
Nancy : Mix formule entre 14 €/t et 16 €/t en fonction du mix alluvionnaire/calcaire concassé.

¹¹ The Shift Project, 2022, *Décarboner la filière ciment-béton dans le cadre du plan de transformation de l'économie française*, Janvier 2022.

Figure 9 : Application du béton à base de granulats recyclés sur différentes parties d'un bâtiment



Néanmoins, à la suite du projet Recybéton, la norme EN206 version française va évoluer dès 2022 sur la partie granulats recyclés. Les taux d'incorporation seront augmentés (cf. tableau 13).

Tableau 13 : Taux d'incorporation des granulats recyclés suite à l'évolution de la norme EN206

Tableau NA.6a — Taux maximum (% massique) de substitution pour les gravillons recyclés de type 1 et le sable recyclé

	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1	XD, XS1	XF2, XD2, XD3	XS2, XS3	XF3, XF4 ^a	XA				
Gravillon recyclé type 1 (m _{1A2})	60	40	60	30	50	20	40	10	30	10	30	0 ^c
Sable recyclé ^b (m _{1A2})	30	10	20	10	20	10	15	10	15	0 ^c	15	0 ^c
Règles de formulation complémentaire		/	E_n/L_{nq} max abaissé de 0,05	/	E_n/L_{nq} max abaissé de 0,05	/	E_n/L_{nq} max abaissé de 0,05	/	E_n/L_{nq} max abaissé de 0,05	/	E_n/L_{nq} max abaissé de 0,05	

^a Granulats non gélifs.
^b Sable recyclé présentant une absorption d'eau inférieure à 10%.
^c A l'exception des granulats récupérés qui restent utilisables dans les conditions du 5.2.3.3 et NA.5.2.3.3.
NOTE Ces taux sont vérifiés en arrondissant le taux de substitution au pourcentage le plus proche.

Au regard de cette évolution, deux cas seront examinés :

Cas 1 : 30% de gravillons recyclés et 10% de sable recyclé et carbonaté (tableau 13) ;

Cas 2 : 60% de gravillons recyclés et 30% de sable recyclé et carbonaté (tableau 14).

Comme les résultats ont montré que la partie gravillons carbonatés n'était pas rentable, seuls des gravillons recyclés ont été considérés dans la formulation d'un m³ de béton. Le sable recyclé et carbonaté a été pris en compte selon les deux cas mentionnés ci-dessus.

Les tableaux 14 et 15 montrent sans surprise que plus la part de sable recyclé et carbonaté est importante, plus le prix du m³ de béton est élevé. Ce n'est que lorsque les distances de transport sont minimales que 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 granulats recyclés soit intégralement du granulats naturels. Néanmoins, 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). La vente de béton incluant du sable recyclé et carbonaté ne semblerait ainsi possible qu'au prix d'une forte réduction des marges des acteurs de la filière.

Tableau 14 : Prix d'un m³ de béton (scénario 30% de gravillons recyclés et 10% de sable recyclé et carbonaté)

		Prix (coût du transport :1€/t/10km)											
		Distance transport mini granulat						Distance transport maxi granulat					
	Quantité pour 1 m ³ béton	VICAT (Scénario D)	VICAT (Scénario E)	LAFARGE (Scénario D)	LAFARGE (Scénario E)	Granulat naturel	Granulat recyclé B	VICAT (Scénario D)	VICAT (Scénario E)	LAFARGE (Scénario D)	LAFARGE (Scénario E)	Granulat naturel	Granulat recyclé B
Ciment	250	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Gravillons	1200	16,27	16,27	16,27	16,27	16,2	16,27	19,452	19,452	19,45	19,45	19,2	19,45
Sable	800	12,01	11,97	12,18	12,14	10,8	10,82	15,328	15,13	15,50	15,30	12,8	12,86
Eau	125	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
		58,80	58,76	58,97	58,93	57,52	57,61	65,30	65,10	65,47	65,27	62,52	62,83

		Prix (coût du transport :2€/t/10km)											
		Distance transport mini granulat						Distance transport maxi granulat					
	Quantité pour 1 m ³ béton	VICAT (Scénario D)	VICAT (Scénario E)	LAFARGE (Scénario D)	LAFARGE (Scénario E)	Granulat naturel	Granulat recyclé B	VICAT (Scénario D)	VICAT (Scénario E)	LAFARGE (Scénario D)	LAFARGE (Scénario E)	Granulat naturel	Granulat recyclé B
Ciment	250	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Gravillons	1200	16,98	16,98	16,98	16,98	16,8	16,98	23,34	23,34	23,34	23,34	22,8	23,34
Sable	800	12,55	12,47	12,712	12,63	11,2	11,24	19,192	18,79	19,352	18,95	15,2	15,32
Eau	125	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
		60,05	59,97	60,21	60,13	58,52	58,74	73,05	72,65	73,21	72,81	68,52	69,18

Tableau 15 : Prix d'un m³ de béton (scénario 60% de gravillons recyclés et 30% de sable recyclé et carbonaté)

		Prix (coût du transport :1€/t/10km)											
		Distance transport mini granulats						Distance transport maxi granulats					
	Quantité pour 1 m ³ béton	VICAT (Scénario D)	VICAT (Scénario E)	LAFARGE (Scénario D)	LAFARGE (Scénario E)	Granulat naturel	Granulat recyclé B	VICAT (Scénario D)	VICAT (Scénario E)	LAFARGE (Scénario D)	LAFARGE (Scénario E)	Granulat naturel	Granulat recyclé B
Ciment	250	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Gravillons	1200	16,34	16,34	16,34	16,34	16,2	16,34	19,70	19,70	19,704	19,70	19,2	19,70
Sable	800	14,42	14,30	14,93	14,81	10,8	10,85	20,38	19,78	20,888	20,29	12,8	12,97
Eau	125	0,51	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,5175	0,52	0,52	0,52
		61,28	61,16	61,79	61,67	57,52	57,71	70,60	70,00	71,11	70,51	62,52	63,19

		Prix (coût du transport :2€/t/10km)											
		Distance transport mini granulats						Distance transport maxi granulats					
	Quantité pour 1 m ³ béton	VICAT (Scénario D)	VICAT (Scénario E)	LAFARGE (Scénario D)	LAFARGE (Scénario E)	Granulat naturel	Granulat recyclé B	VICAT (Scénario D)	VICAT (Scénario E)	LAFARGE (Scénario D)	LAFARGE (Scénario E)	Granulat naturel	Granulat recyclé B
Ciment	250	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Gravillons	1200	17,16	17,16	17,16	17,16	16,8	17,16	23,88	23,88	23,7	23,88	22,8	23,88
Sable	800	15,25	15,01	15,73	15,49	11,2	11,32	27,17	25,97	27,65	26,45	15,2	15,56
Eau	125	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
		62,93	62,69	63,41	63,17	58,52	59,00	81,57	80,37	81,87	80,85	68,52	69,96

La question est désormais de savoir cet écart de prix entre les solutions non carbonatées et les autres pourrait être réduit par la valorisation du gain environnemental associé à la carbonatation.

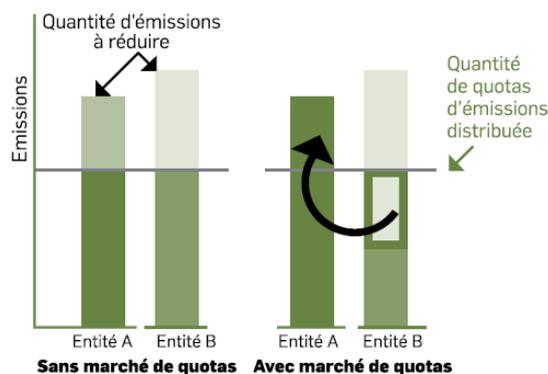
6 L'impact du prix du carbone

6.1 Le principe de fonctionnement du marché

Les cimentiers 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)¹² aussi appelé marché du carbone Européen, mis en place en 2005. Celui-ci permet de contrôler la quantité de CO₂ émise par les entreprises soumises à ce système grâce à un mécanisme de plafonnement des quotas disponibles. 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) (Chevallier, 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 doivent rendre autant de quotas qu'elles ont rejeté de tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Les entreprises émettant moins d'émissions que prévu peuvent vendre leurs quotas excédentaires sur le marché du carbone ou bien les épargner (banking) pour un usage ultérieur. A l'inverse, les entreprises ayant émis plus de CO₂ doivent se procurer des quotas auprès des entreprises excédentaires ou acheter des crédits de compensations¹³. A noter qu'afin d'éviter une double taxation, les secteurs concernés par le marché du carbone européen ne sont pas concernés par la CCE (Contribution Climat Energie aussi appelée « Taxe carbone »).

Figure 10 : Principes des marchés de quotas



Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts

L'objectif à l'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 de structuration de la mise en place du SCEQE qui tendent à réduire progressivement le nombre de permis à polluer disponibles.

Les différentes réformes adoptées pendant ces phases pour contrôler le nombre de quota en circulation ont conduit à diminuer l'allocation à titre gratuite de quotas pour l'industrie manufacturière de 80% en 2013 à 30% en 2020 (Faure, 2020). Depuis 2018, les acteurs anticipent la raréfaction des quotas et réduisent leurs émissions (Julia et Ortholand, 2019).

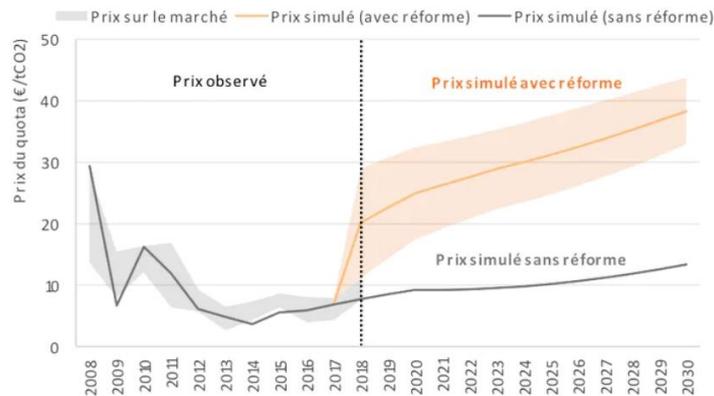
Les seuils d'émissions autorisées fixés par secteur dépendent d'un facteur spécifique à chaque secteur basé sur un benchmark du niveau d'émissions de la moyenne des 10% des

¹² <https://www.ecologie.gouv.fr/marches-du-carbone>.

¹³ Crédits correspondants à des réductions d'émissions pouvant être réalisées dans une autre zone géographique ou dans un autre secteur.

installations les plus performantes et de leur niveau d'activité historique (moyenne glissante des émissions des années n-2 et n-1).

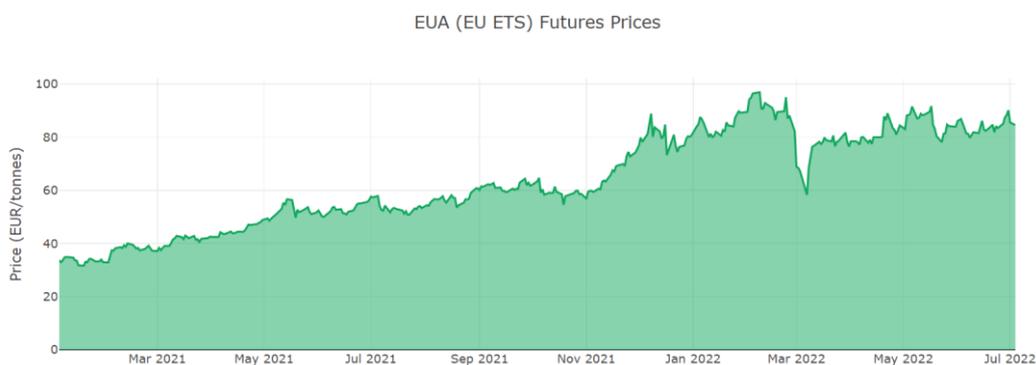
Figure 11 : Evolution du prix du carbone simulé avec et sans réformes. Source : Chaire Economie du Climat, 2018¹⁴



En réponse à un mécanisme d'équilibrage de l'offre et de la demande, cette réduction entraîne une augmentation du prix du quota, ce qui a pour effet d'inciter les entreprises à orienter leurs investissements dans des technologies à faible teneur en carbone ou à améliorer leur processus de production afin de réduire leurs émissions (Aldy et Stavins, 2012).

Ces réductions ont permis une augmentation importante du prix du quota jusqu'à osciller entre 80 et 90€/tonne (figure 12).

Figure 12 : Augmentation du prix du quota carbone - Carbon Viewer (Mars 2022)



Source : Carbon Viewer, 2022.

6.2 Le cas des cimentiers

Les secteurs industriels exposés à un risque important de « fuite du carbone »¹⁵ autrement dit une 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 initialement être supprimé dans la quatrième phase de structuration. Néanmoins, le Parlement européen a finalement voté son maintien le 11 mars 2021. En outre, l'arrêté du 14 décembre 2021 permet aux cimentiers de bénéficier de quotas d'émission affectés à titre gratuit pour la période 2021-2025¹⁶.

¹⁴ Ce graphique a été généré en 2018, les valeurs constatées depuis sont supérieures à ce qui avait été anticipé.

¹⁵ Ce calcul se fait par le biais d'un « Facteur d'Exposition aux fuites du carbone » (Carbon Leakage Exposure Factor).

¹⁶ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000044537579>

La composante carbone est toutefois intégrée à la présente analyse car la réglementation est susceptible d'évoluer dans les prochaines années et les quotas excédentaires ou manquants sont toujours soumis au prix du marché du carbone.

6.3 Analyse du coût carbone des procédés de carbonatation accélérée¹⁷

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. En prenant en considération le prix du quota carbone, la présente analyse vise à faire le bilan économique du coût carbone de chacune des deux solutions.

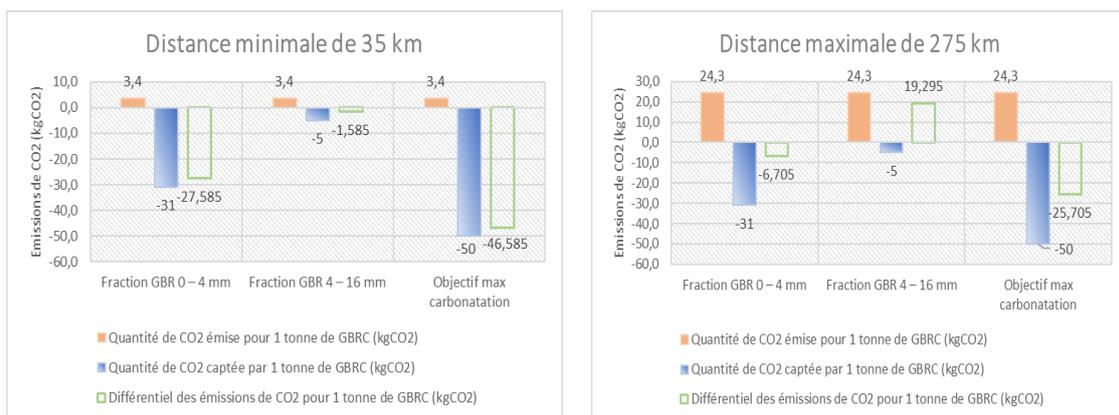
6.3.1 Le démonstrateur de l'usine VICAT

Les économies de quotas 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 recyclés de fraction fine (0 – 4 mm) permet dans le cas de son démonstrateur 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 et VICAT vise un objectif de 5% ce qui correspondrait à 50kg de CO₂ captés par tonne de GBR.

Les émissions générées sont celles liées au concassage, au transport et à la carbonatation de ces GBR. Ces émissions liées au transport jusqu'à la cimenterie sont supportées par les cimentiers puisque ce flux relève directement du processus de carbonatation dans une cimenterie. Le cimentier est le donneur d'ordre. Si les cimentiers développent des solutions innovantes et économes en CO₂ en matière de transport, ceci améliorera le bilan carbone de la carbonatation accélérée en cimenterie.

D'après l'analyse environnementale¹⁸ effectuée en parallèle de l'analyse économique la somme de ces postes engendre l'émission de 3,42 kg de CO₂ pour la carbonatation d'une tonne de GBR transportée sur la distance minimale de 35 km et de 24.30 kg de CO₂ pour une distance de 275 km. La figure 13 représente les émissions captées, générées et le différentiel des deux.

Figure 13 : Emissions captées et générées par la carbonatation dans le cas du démonstrateur VICAT

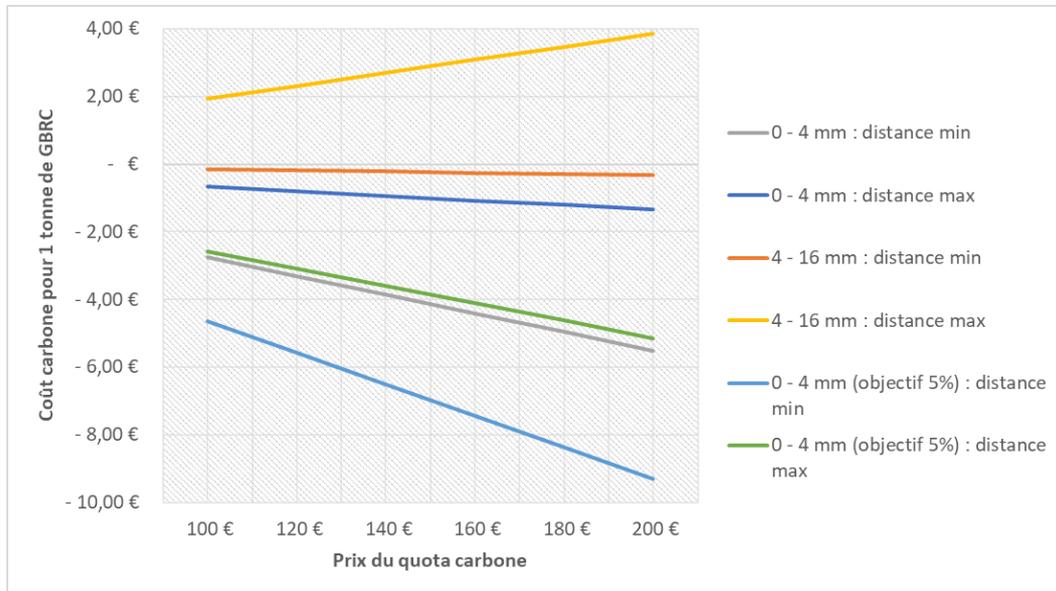


¹⁷ Dans la présentation qui suit les émissions de CO₂ sont liées au concassage, au transport et à la carbonatation des GBR. Parmi les différents flux, c'est le trajet jusqu'à la cimenterie qui est le plus impactant. Ce flux étant directement lié à la carbonatation, les coûts environnementaux et économiques induits par ce transport sont supportés par les cimentiers et calculés à partir du prix du quota carbone. Le transport ne relève en effet pas de l'initiative des opérateurs de transport mais du cimentier qui est le donneur d'ordre. Néanmoins, une autre approche de valorisation du CO₂ semble possible. Elle est présentée en annexe 2.

¹⁸ « ACV de granulats carbonaté – Rapport d'avancement », A. Féraïlle, M. Saadé (2021)

Pour la fraction fine, la quantité de CO₂ captée est supérieure à la quantité de CO₂ émise. Ce différentiel est d'autant plus important en considérant l'objectif fixé de taux maximal de captation. Le gain est également plus important sur des courtes distances, réduisant de fait les émissions liées au transport.

Figure 14 : Sensibilité du prix de la tonne CO₂ à l'évolution du prix du carbone et de la distance parcourue dans le cas du démonstrateur VICAT



La sensibilité du coût carbone de la tonne de GBRC à l'évolution du prix du quota est fortement dépendante des distances de transport et de la quantité de CO₂ captée. Plus les distances sont courtes et le taux de captation de CO₂ important, plus les économies sur les quotas carbone seront intéressantes si le prix vient à augmenter rapidement.

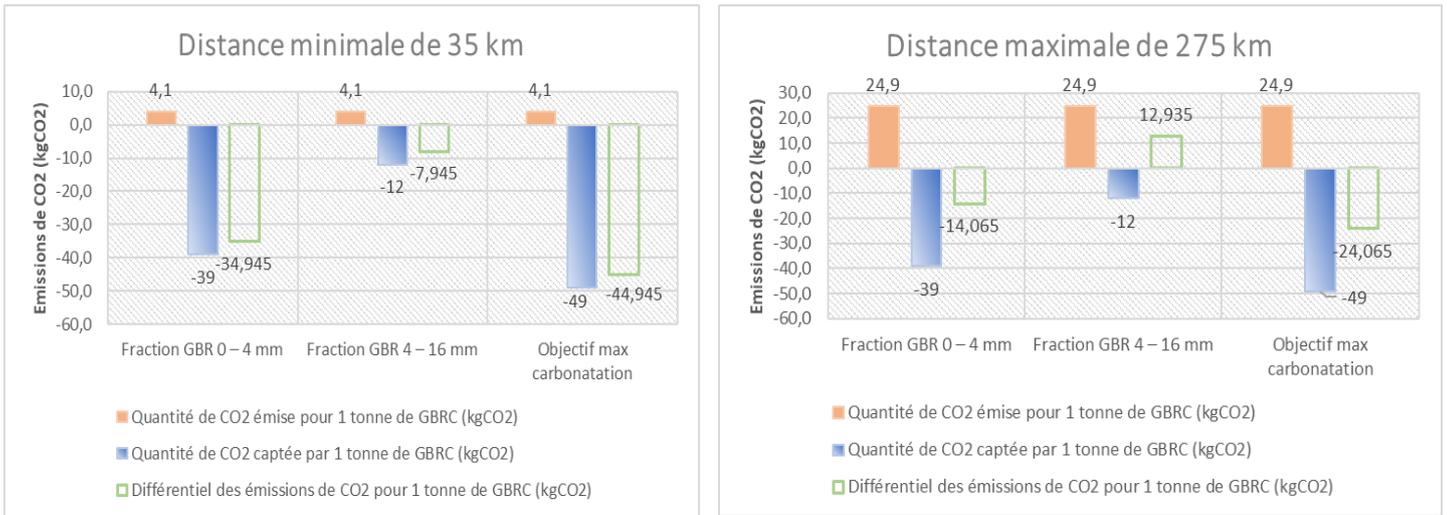
En intégrant ce prix du carbone au coût à la tonne des GBR, la carbonatation de sable transporté sur une distance minimale équivaut à une réduction du coût de la tonne de granulats de béton de 4€ pour un prix du quota à 100€/tonne et à une réduction de 7,20€ pour un quota à 180€/tonne. A contrario, la carbonatation de granulats de fraction grossière transporté sur une distance maximale conduit à un surcoût de la tonne de granulats de 2€ pour un prix du quota à 100€/tonne et à un surcoût de 3,60€ pour un prix du quota à 180€/tonne.

6.3.2 Le procédé industriel LAFARGE

Dans le cas du procédé industriel LAFARGE, la carbonatation d'une tonne de granulats de bétons recyclés 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 le cas de VICAT ces taux ne correspondent pas à une captation optimisée qui serait de l'ordre de 49kg de CO₂ captée pour la fraction fine.

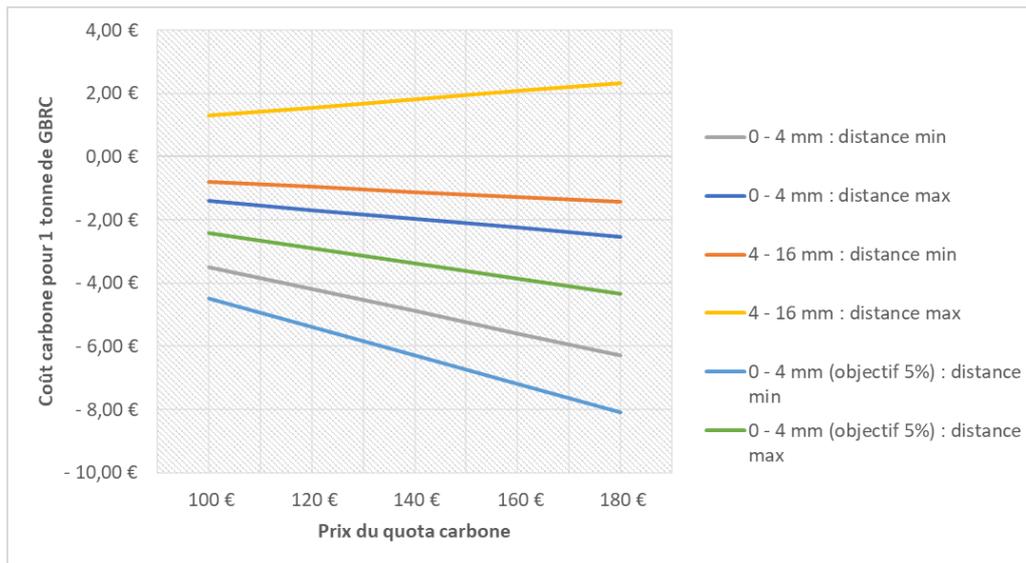
Les émissions liées au concassage, au transport et à la carbonatation de ces GBR sont de 4,1kg de CO₂ pour la carbonatation d'une tonne de GBR transportée sur la distance minimale de 35 km et de 24,94kg de CO₂ pour un transport sur une distance de 275 km maximum. La figure 15 représente les émissions captées, générées et le différentiel des deux.

Figure 15 : Emissions captées et générées par la carbonatation dans le cas du procédé industriel LAFARGE



Comme pour le cas de VICAT, 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.

Figure 16 : Sensibilité du prix de la tonne CO₂ à l'évolution du prix du carbone et de la distance parcourue dans le cas du procédé LAFARGE



Comme dans le cas précédent, les économies et coûts carbone associés aux procédés de carbonatation accéléré sont fortement corrélés au taux de captation du CO₂ et aux distances parcourues.

6.3.3 Bilan économique lié au carbone pour chacun des procédés

Tableau 16 : Bilan du coût du carbone pour chacun des cas de figure

	VICAT				LAFARGE			
	Min		Max		Min		Max	
	100€/t CO2	140€/t CO2	100€/t CO2	140€/t CO2	100€/t CO2	140€/t CO2	100€/t CO2	140€/t CO2
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 €

Le procédé industriel de LAFARGE permet de capter davantage de CO₂ que celui de VICAT. Pour autant et pour la fraction grossière, l'approche ne s'avère pas pertinente. 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 permet pas de compenser le surcoût du process de production (cf. tableau 12). Cette réduction est trop faible et ne permet pas de rendre les GBRC concurrentiels économiquement face aux granulats naturels ou aux granulats recyclés.

7 Conclusion et perspectives

L'analyse précédente a examiné la viabilité économique des procédés de carbonatation accélérée développés par les groupes VICAT et LAFARGE. Les données économiques transmises par VICAT concernaient un démonstrateur raccordé au four de la cimenterie de Créchy (Allier). LAFARGE a effectué des tests dans sa cimenterie du Val d'Azergues (Rhône) mais les données transmises portaient sur une extrapolation à un investissement industriel. L'enjeu était d'examiner la viabilité économique d'un procédé doté de capacités de production plus importantes.

L'analyse économique a intégré les contraintes de transport liées aux granulats qu'ils soient naturels, recyclés ou carbonatés. Les résultats ont montré que la carbonatation accélérée dans une cimenterie renchérit fortement le coût du granulat recyclé quel que soit le procédé adopté. Ceci 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.

L'impact négatif est moindre au niveau d'un m³ de béton qui intègre des gravillons recyclés et et seulement une portion de 10% de sable recyclé et carbonatée. En effet, dans ce scénario, la portion de matière carbonatée reste limitée.

Le gain environnemental lié à la carbonatation dans une cimenterie ne contrebalance pas suffisamment ces résultats pour rendre ce procédé viable sur le plan économique même à un prix du carbone de 100€/t. Pourtant, que ce soit le procédé VICAT ou LAFARGE, la quantité de CO₂ captée par la fraction fine 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).

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. Ceci limite l'intérêt de carbonater le gravillon.

Ces résultats indiquent une fois de plus que l'optimisation des distances de transport est la clé de voute de la compétitivité des fournisseurs de matières premières primaires et secondaires pondérables. Seuls des modes de transport peu émetteurs de gaz à effet de serre ou la piste d'une carbonatation sur un site de déconstruction ou une plateforme de recyclage semble une issue envisageable sur les plans économique et environnemental.

Un procédé mobile de carbonatation sur site de déconstruction serait dans l'absolu le plus favorable. En effet, le recyclage in situ des granulats très favorable sur le plan économique dans la mesure où il minimise les coûts liés au transport. Il en serait de même pour la carbonatation. Néanmoins, ce recyclage in situ est très dépendant des conditions locales et notamment de l'espace disponible pour stocker les matériaux sur le chantier de déconstruction. Par ailleurs, les habitations riveraines sujettes aux nuisances sonores sont un autre facteur à intégrer. Néanmoins, ce bruit lié au concassage et au criblage peut compenser les nuisances liées aux allées et venues des camions transportant les déchets vers la plateforme de recyclage.

Devant ces contraintes de site importantes, un système de carbonatation sur une plateforme de recyclage constituerait a priori une autre approche prometteuse. Cette solution serait sans doute moins complexe à mettre en œuvre qu'une carbonatation mobile sur site de déconstruction. Elle ne serait pas soumise à la contrainte de l'espace disponible qui constitue fréquemment une barrière au recyclage des granulats sur site de déconstruction. En outre, les plateformes 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.

Bibliographie

- Aldy JE, Stavins RN., 2012, « The Promise and Problems of Pricing Carbon: Theory and Experience », *The Journal of Environment & Development*, 21(2), pp. 152-180.
- APUR, 2020, *Les chantiers du Nord-Est du Grand Paris, un exemple pour l'économie circulaire – Gisements, flux et fonciers pour les produits de démolition*, Juin 2020.
- 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.
- Bazzana M., Bougrain F., Brachet A., Doutreleau M., Gully E., Laurenceau S., Louërat M., Mailhac A. et R. Tirado, 2020, « Le recyclage du béton : le cas du Granudem », étude de cas in *BTP Flux Rapport final*, ADEME, CSTB.
- Bodet R. et D. Collonge, 2022, *Evaluation de la ressource potentielle de granulats de béton recyclés*, Projet FastCarb, Octobre 2022.
- Braga A. M., J. D. Silvestre et 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.
- 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.
- Dias A. B., J. N. Pacheco, J. D. Silvestre, I. M. Martins et 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 Juin 2021, Lisbon.
- Faure A., 2020, « Les déterminants structurels des prix du carbone dans l'EU-ETS », *Sciences économiques*. Thèse Université de Nanterre - Paris X.
- Julia A. et J. Ortholand, 2019, « L'Europe fait-elle fuir ses émissions de gaz à effet de serre ? », *Le Grand Continent*, 19 décembre 2019 - <https://legrandcontinent.eu/fr/2019/12/10/leurope-fait-elle-fuir-ses-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/>
- MINERGIE, 2016, *MINERGIE-ECO – Questionnaire et indications pour les nouvelles constructions*, Version 1.3/Janvier 2016 (révisé en mars 2016).
- 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.
- Pin R., 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.
- Région Ile-de-France, 2015, *Plan régional de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers du bâtiment et des travaux publics*, Approuvé par le Conseil régional d'Ile-de-France, Juin 2015.
- Tiefenthaler J., L. Braune, C. Bauer, R. Sacchi et 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.

ANNEXE 1

Tableau 17 : Les cimenteries en France

Raison sociale	Nom du site	Code postal	Ville
VICAT	Cimenterie de Créchy	03150	Créchy
VICAT	Cimenterie de Blausasc	06440	Blausasc
Ciments Calcia	Cimenterie de Cruas	07350	Cruas
Lafarge Ciments	Usine de Port la Nouvelle	11210	Port la Nouvelle
Lafarge Ciments	Usine de la Malle	13320	Bouc Bel Air
Ciments Calcia	Cimenterie de Ranville	14860	Ranville
Ciments Calcia	Cimenterie de Bussac	17210	Bussac Forêt
Ciments Calcia	Cimenterie de Beffes	18320	Beffes
Ciments Calcia	Cimenterie de Beaucaire	30302	Beaucaire
Lafarge Ciments	Usine de Martres	31220	Martres Tolosane
Ciments Calcia	Cimenterie de Villiers-au-Bouin	37330	Villiers-au-Bouin
VICAT	Cimenterie Saint Egrève	38120	Saint Egrève
VICAT	Cimenterie de Montalieu-Vercieu	38390	Montalieu-Vercieu
EQUIOM	Cimenterie de Rochefort-sur-Nenon	39700	Rochefort-sur-Nenon
Ciments Calcia	Cimenterie de Couvrot	51300	Couvrot
VICAT	Cimenterie de Xeuilley	54990	Xeuilley
Ciments Calcia	Usine de Rombas	57360	Amnéville
EQUIOM	Cimenterie de Héming	57830	Héming
EQUIOM	Cimenterie de Lumbres	62380	Lumbres
Lafarge France	Usine d'Altkirch	68131	Altkirch
Lafarge Ciments	Cimenterie du Val d'Azergues	69380	Belmont d'Azergues
Lafarge Ciments	Usine du Havre Saint Vigor	76430	Saint-Vigor-d'Ymonville
Ciments Calcia	Cimenterie de Gargenville	78440	Gargenville
Ciments Calcia	Cimenterie d'Airvault	79600	Airvault

Annexe 2 : la valorisation du CO₂ dans le bilan économique de la carbonatation accélérée des GBR : une autre approche

La carbonatation accélérée des GBR permet de capter du CO₂ issu du process cimentier mais les différentes opérations permettant cette carbonatation sont émettrices de CO₂. Pour faire le bilan environnemental de la carbonatation accélérée des GBR il faut bien soustraire les tonnes de CO₂ émises de celles qui sont captées. Quand on fait le bilan économique de la captation, il faut pondérer ces flux en fonction de leurs valeurs respectives car le CO₂ émis n'a pas la même valeur économique que le CO₂ capté.

La procédure Monitoring, Reporting, Verification (MRV) de la Directive Européenne 2003/87/EC dite Directive ETS, précise que les émissions à déclarer, c'est-à-dire celles qui sont concernées par les quotas de CO₂, sont celles des sources qui sont **possédées ou contrôlées sur le site** dont l'activité figure dans l'Annexe 1 de la Directive, dans le cas présent par la cimenterie.

Les émissions de CO₂ liées à la production des GBR ou leur transport qui se produisent en dehors de la cimenterie n'entrent pas dans le cadre de la Directive ETS. Par contre les carburants utilisés lors de ces opérations supportent la Contribution Climat Energie (CCE) qui fixe un prix au carbone contenu dans ces carburants.

C'est pourquoi l'autre façon de calculer le bilan économique de la carbonatation des GBR consiste à valoriser les tonnes captées à la valeur marché des quotas et les tonnes émises à la valeur de la CCE.