

Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclé quels bénéfices environnementaux ?

P.Guyard, M.Saadé, A.Feraille

Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, 6-8 av Blaise Pascal, 77420 Champs sur Marne

RESUME La question écologique prend une place croissante dans le quotidien et sur la scène politique. La diminution des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES) en fait partie et celle-ci s'applique à tous les secteurs, notamment celui de la construction. Dans cet article sont expliquées les conclusions environnementales du Projet National Fastcarb après un rappel du contexte général et spécifique au secteur de la construction ainsi que de la méthode d'Analyse de Cycle de Vie. Les résultats sont encourageants mais limités et les efforts de réduction des émissions du secteur doivent être poursuivis et décuplés.

Mots-clefs ACV, Changement climatique, bétons, carbonatation

I. INTRODUCTION

La crise écologique que nous vivons menace la vie sur Terre. Une mesure peut être réalisée à l'aide des limites planétaires définies par Rockström et al. 2009. Ces limites, au nombre de neuf, sont des seuils définis pour un certain nombre de processus et systèmes régulant la stabilité et la résilience du système terrestre. Le principe est qu'il est nécessaire d'être en dessous des seuils pour que l'humanité puisse se développer dans un écosystème « sûr ». En 2009, Rockström et al. ont alerté sur le fait que plusieurs limites planétaires avaient déjà été franchies (changement climatique, érosion de la biodiversité, cycle de l'azote, changement d'affectation des sols).

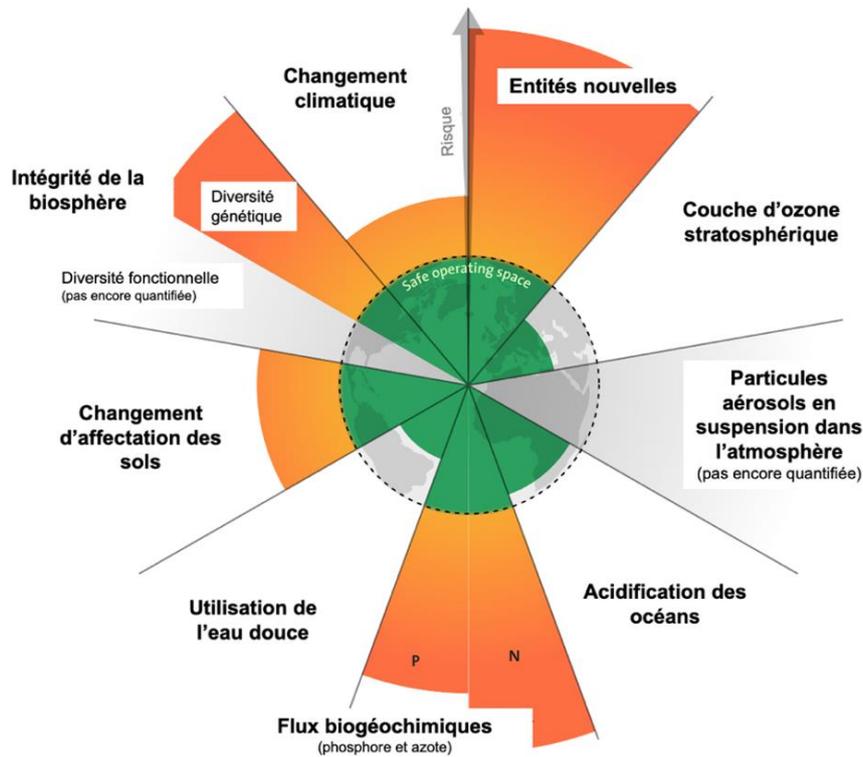


FIGURE 1. Les limites planétaires (Boutaud, Gondran, 2022)

La poursuite du système actuel fondé sur une croissance infinie et une consommation de masse, également appelé « business as usual », amène indéniablement à en dépasser d'autres. Ainsi depuis début 2022 deux nouvelles limites auraient été franchies (nouvelles entités¹ et cycle de l'eau²). La Figure 1 présente une version actualisée de ces limites planétaires par (Boutaud, Gondran, 2022) ; le franchissement de la limite utilisation d'eau douce n'y est pas figurée ayant fait l'objet de travaux très récents.

Le changement climatique est certainement la limite planétaire la plus médiatisée. Pour en limiter l'impact, il faut réduire les émissions de GES rapidement, et donc agir de concert sur tous les secteurs très émetteurs de GES. Le béton, matériau de construction le plus utilisé au monde, et dont la demande ne cesse de croître a un fort impact sur le changement climatique (Feraille et al 2022), lié en grande partie à l'utilisation de clinker³. La consommation d'eau et de sable (autres constituants du béton) sont aussi des problèmes environnementaux à ne pas négliger, tout comme la gestion des déchets issus de la déconstruction d'ouvrages en béton (227,5 millions de tonnes en France en 2014⁴).

Le Projet National Fastcarb fait suite au PN Recybéton. Son objectif est d'étudier et de mettre en place la carbonatation accélérée de Granulats de Béton Recyclé (GBR). Cette carbonatation accélérée doit servir à capturer du CO₂ dans les granulats et donc à réduire les émissions nettes de CO₂ du secteur de la construction, ainsi qu'à améliorer les propriétés mécaniques des granulats recyclés, qui sont moindres

¹ <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/eau-6e-limite-planetaire-vient-etre-franchie-il-nen-reste-plus-3-96153/>

² <https://www.geo.fr/environnement/la-sixieme-limite-planetaire-vient-detre-franchie-209620>

³ https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2022/01/PTEF-Decarboner-lindustrie_-Ciment_-Rapport-final.pdf

⁴ enquête « Déchets et déblais produits par l'activité de construction en 2014 », SOeS

par rapport à celles des granulats naturels et impliquent potentiellement l'utilisation de plus de ciment dans les bétons qui en sont constitués.

Une évaluation environnementale de type Analyse de Cycle de Vie (ACV) a été menée tout au long du projet et en parallèle des travaux sur les propriétés des GBRC et des bétons à base de GBRC incluant les questions de durabilité et de coût économique.

Elle se base sur des données fournies par deux démonstrateurs industriels, le site Vicat de Créchy et le site Lafarge de Val d'Azergues, eux-mêmes mis en place en parallèle d'essais en laboratoire devant déterminer et optimiser les paramètres ayant une influence importante sur la carbonatation.

L'objectif de l'évaluation environnementale est la validation de la pertinence du projet et l'identification des points critiques en vue de minimiser les impacts.

Le travail débute par une rapide présentation de la méthode ACV appliquée ensuite à la tonne de granulat de béton recyclé carbonaté (GBRC) puis au matériau et son transport et enfin au m³ de béton formulé avec ce granulat. Les résultats et perspectives sont enfin discutés.

II. METHODE

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée dont le cadre général et les lignes directrices sont fixés par les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044. Elle permet d'estimer les flux de matières et d'énergies, ainsi que les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service au cours de son cycle de vie et donc de relier les procédés technologiques et leurs effets sur l'environnement (Jolliet et al., 2017), (Feraille et al, 2022).

Elle est ici appliquée aux deux démonstrateurs industriels étudiés dans le projet Fasctarb. Le procédé pris en compte est donné, Fig. 2.

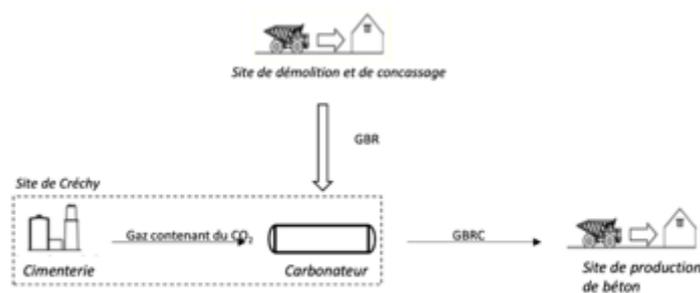


FIGURE 2. Procédé de carbonatation accélérée de GBR

Dans ce travail les frontières du système considérées sont les suivantes, Fig. 3.

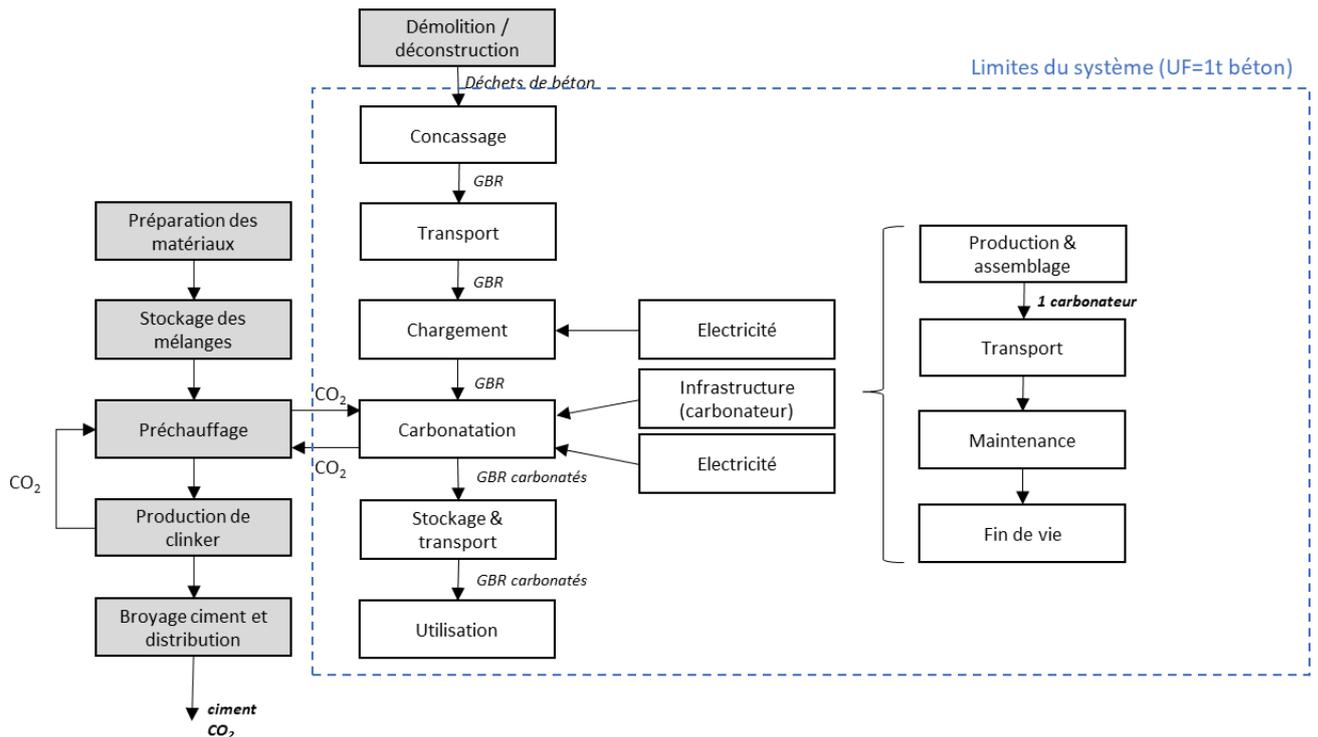


FIGURE 3. Procédé de carbonatation accélérée de GBR

La première unité fonctionnelle choisie est la tonne de granulats de béton recyclé carbonatés. Elle permet ainsi de comparer les impacts environnementaux des GBRC aux granulats naturels ou recyclés non carbonatés.

Par la suite, une évaluation a été réalisée avec pour unité fonctionnelle 1 m³ de béton (d'une classe de résistance donnée) afin de prendre en compte les variations de compositions (quantité de ciment, adjuvants...) entre les bétons constitués de GBRC, de granulats naturels, de GBR ou encore de mix de ces différents types de granulats. Les détails de cette analyse sont disponibles dans le rapport du PN Fastcarb (Saade, Feraille, 2021). Ce travail de modélisation environnementale a été réalisé sur OpenLCA⁵ appuyé sur la base de données Ecoinvent⁶. La méthode de caractérisation des impacts choisie est la méthode de la norme NF/EN 15804+A2.

III. ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES GBRC ET BETONS A BASE DE GBRC

On s'appuie sur les données du projet Fastcarb relatives à la quantité de CO₂ stockée par tonne de granulats de béton recyclé carbonatés. Les granulats de béton recyclé sont issus de bétons de type retours de centrale, déchets de l'industrie du béton prêt à l'emploi (BPE) ; leur composition est ainsi assez homogène et faiblement recarbonatés.. Ils sont fournis en deux granulométries : sable à 0-4 mm ; gravillons à 4-16 mm. Les taux de captage de CO₂ fournis au tableau 1 sont obtenus par

⁵ <https://www.openlca.org/> développé par Green Delta

⁶ <https://ecoinvent.org/>

carbonatation de ces types des granulats de béton recyclé de « bonne qualité ». La carbonatation d'autres types de granulats de béton recyclé (issus de déchet de démolition par exemple) serait à examiner.

Il apparaît un premier résultat important : la quantité de CO₂ captée est bien plus importante pour le sable (0-4mm) que pour le gravillon (4-16mm). Cela s'explique par la quantité de pâte cimentaire plus importante des granulats plus petits, qui permet au CO₂ de carbonater dans une plus grande partie du granulat.

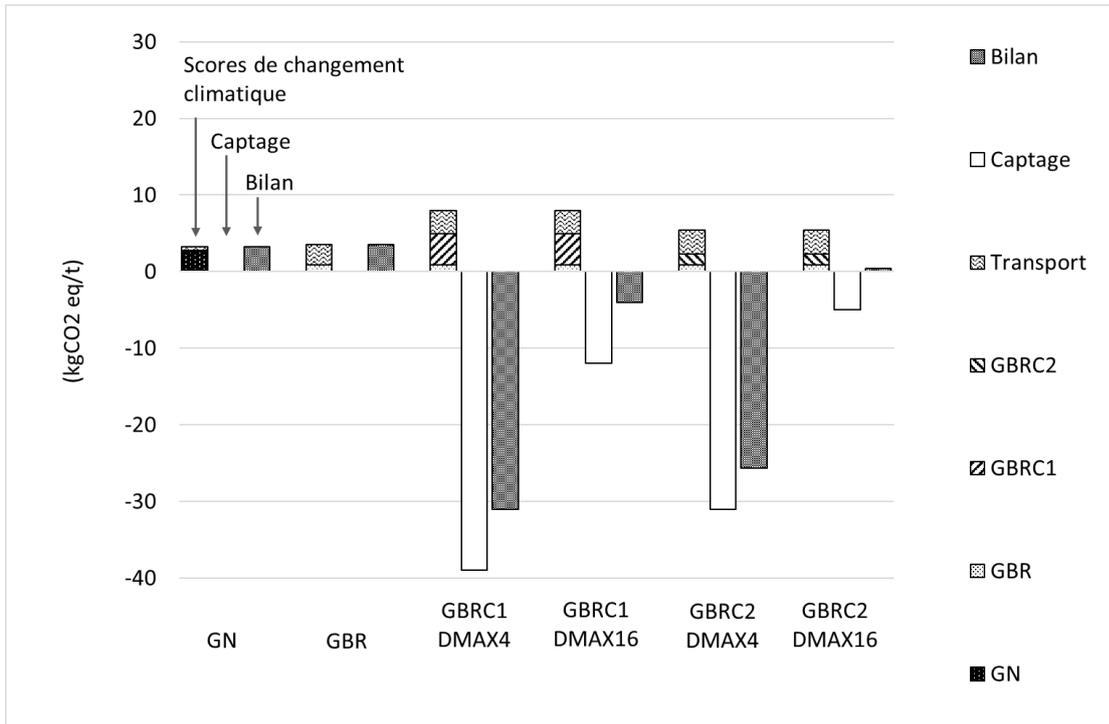
TABLEAU 1. Captage moyen de CO₂ pour chacun des démonstrateurs

	Sable (0-4mm)	Gravillon (4-16mm)
Démonstrateur Lafarge (GBRC1)	39 kgCO ₂ /t	12 kgCO ₂ /t
Démonstrateur Vicat (GBRC2)	31 kgCO ₂ /t	5 kgCO ₂ /t

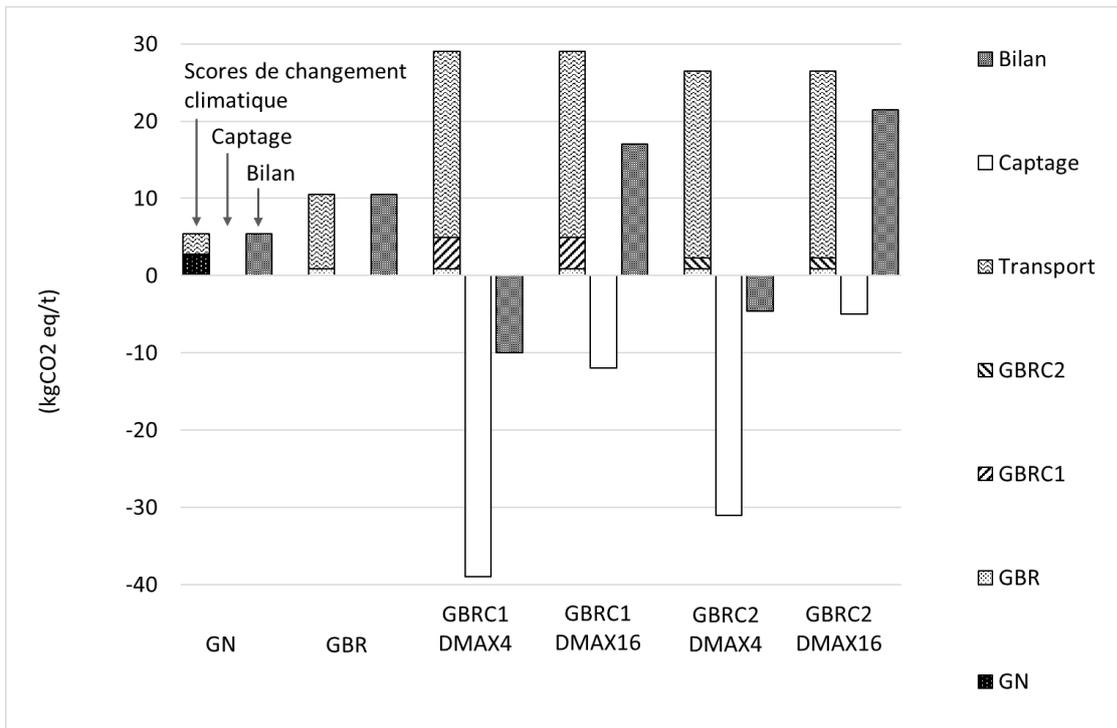
La Figure 4 présente l'indicateur changement climatique pour 1 tonne de granulat en prenant en compte des distances minimale et maximale respectives de 35 et 275kms pour le GBRC et de 5 et 30 kms pour le granulat naturel. L'ACV est réalisée en prenant en compte outre la captation de CO₂, l'impact du procédé en lui-même. On peut noter que les deux procédés étudiés sont des démonstrateurs ainsi leur impact environnemental à ce stade, est probablement majoré.

La distance de 275 kms pour le GBRC, peut sembler importante. Cependant elle correspond aux hypothèses prises pour l'analyse économique (Bougrain, Doutreleau, 2022). Est considéré le fait que la carbonatation a lieu dans une cimenterie éloignée des zones urbaines. Cette hypothèse est pénalisante et devrait être révisée lorsque d'autres sources de CO₂ seront prises en compte.

La comparaison de différentes options de mise à disposition de granulats (granulats naturels issus de carrière GN, granulats de béton recycle GBR, et granulats de béton recyclés carbonatés GBRC, Tab. 1) sans prise en compte d'éventuelles substitutions, montre la prédominance du transport dans l'impact total (Fig. 4). Elle met également en évidence l'importance de la distinction entre gravier (DMAX 16) et sable (DMAX 4) en matière de captage. La différence entre GBRC1 et GBRC2, Tab. 1, est liée à la différence de procédés des démonstrateurs ; il s'agit bien des mêmes GBR, (Barnes-Davin et al, 2021).



a)



b)

FIGURE 4. Comparaison de différents scénarios d’approvisionnement en granulats, a) distance minimum ; b) distance maximum.

Ces résultats montrent deux points d'intérêt : le fait que la carbonatation soit plus intéressante pour le sable que pour le gravillon et le fait que la distance de transport est un facteur clé. Ainsi la suite de ce travail s'intéresse aux distances et moyens de transport.

A) *Analyse de sensibilité des différents moyens de transport : fret ferroviaire, fluvial*

La Figure 5, présente l'impact changement climatique en CO₂ équivalent pour le transport d'une tonne de granulats naturels sur des distances respectives de 35 et 275 kilomètres, en camion (*transport, freight, lorry 16>32 metric ton, EURO5, RER*), barge (*transport, freight, inland waterways, barge, RER*) et train (*transport, freight train, FR, donnée spécifique à la France*)

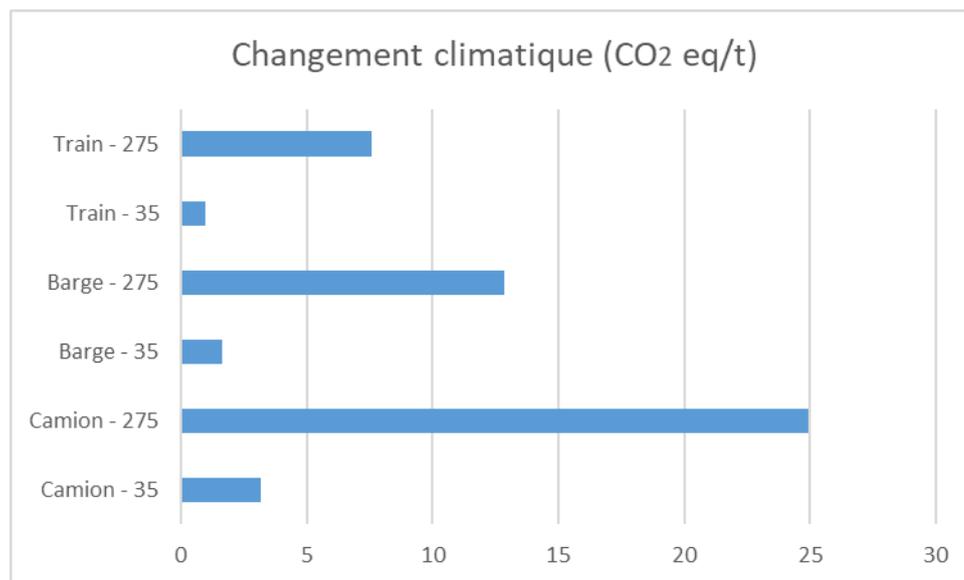


FIGURE 5. Comparaison score changement climatique camion/barge/train pour les distances respectives de 35 et 275 km

Cette analyse montre qu'un transport par barge ou par train est moins impactant, en particulier sur le changement climatique, notamment en raison du fait que l'électricité d'origine nucléaire peu carbonée est majoritaire en France pour le ferroviaire.

On observe que plus la distance est importante, plus l'avantage est grand pour le transport par barge ou par train. En effet, pour des courtes distances la simplicité logistique de l'utilisation de camions (chargement/déchargement en particulier) réduit cet écart.

Aucune donnée n'étant disponibles pour prendre en compte un fret routier électrifié ou à hydrogène, cette hypothèse n'a pu être analysée.

La Fig 6 présente une comparaison des modes de transport de fret réalisés avec la méthode 15804+A2⁷.

⁷ 15804+A2, AFNOR, Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction, avril 2019

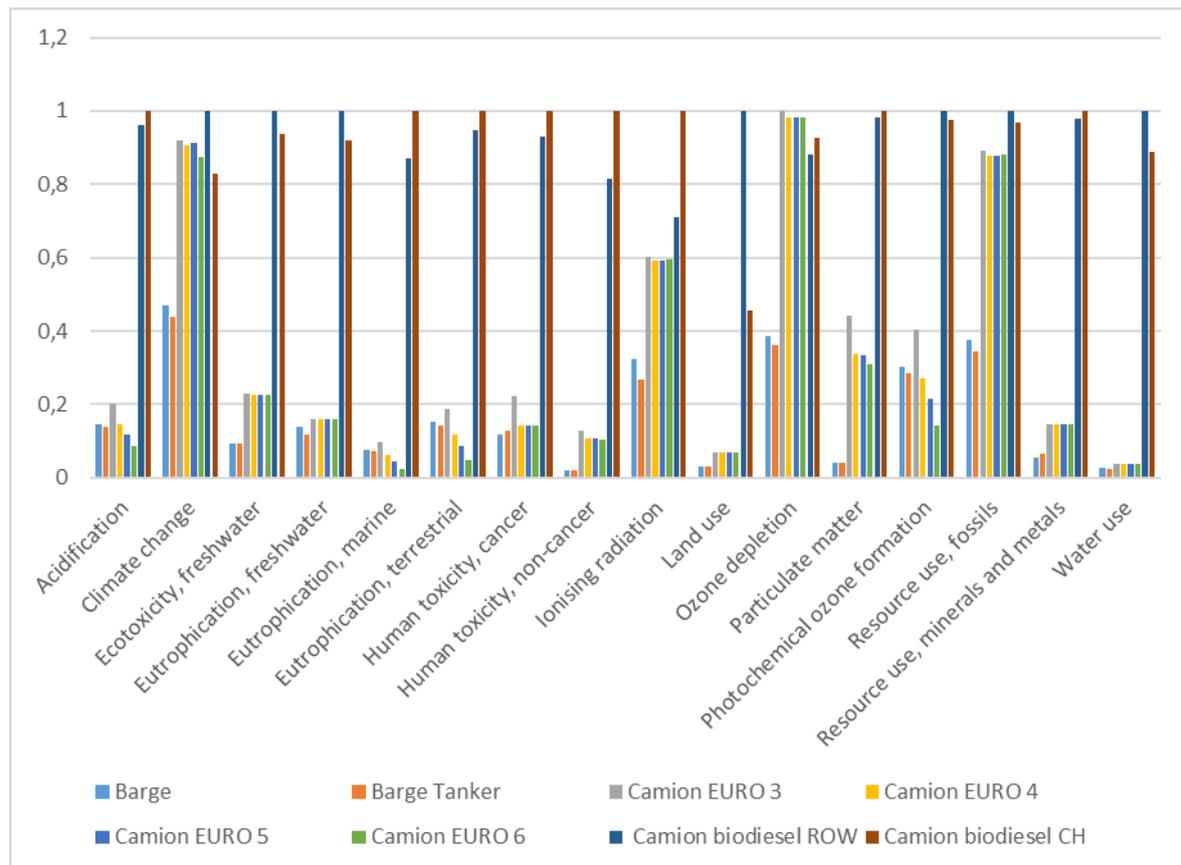


FIGURE 6. Impacts environnementaux comparaison de transport de fret par biodiesel/diesel/barge

Le transport par camion roulant au biodiesel présente des impacts environnementaux plus importants que le transport par camion classique, et, en toute logique, les camions respectant les normes plus récentes (EURO VI) ont des impacts environnementaux globalement moins importants que les autres, Fig 6. Si les GBRC devaient être transportés sur des distances plus élevées que celles des GN, des modes de transport décarbonés devraient être privilégiés afin de maintenir un bilan environnemental intéressant.

B) Contextualisation - sites de région parisienne

Une cartographie des sites industriels émetteurs de CO₂ a été réalisée, et des recherches ont été effectuées pour obtenir les quantités de CO₂ émises ainsi que les concentrations de CO₂.

Sur la Figure 7, les sites industriels émetteurs de CO₂ (liste exhaustive fournie par le site gouvernemental Géorisques⁸) sont indiqués en bleu, tandis que quelques sites de recyclage de granulats sont indiqués en vert et des centrales à béton en rouge foncé.

⁸ <https://www.georisques.gouv.fr/>

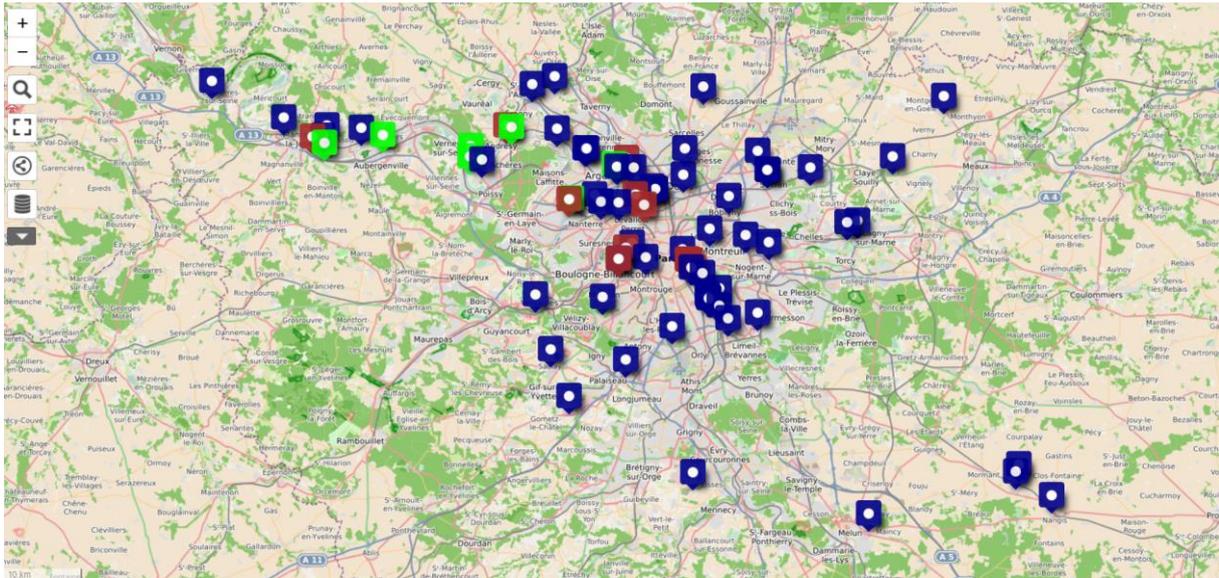


FIGURE 7. Carte Ile-de-France http://umap.openstreetmap.fr/fr/map/carte-sites-emetteurs-co2_752926#10/48.8322/2.2673 (légende : bleu sites industriels émetteurs de CO₂, vert sites de recyclage de granulats, rouge foncé centrales à béton

Les sites retenus suivants :

- La cimenterie Calcia de Gargenville
- Le centre de recyclage Lafarge de Guerville
- La centrale Unibéton de Guerville

Ces sites ont été choisis parce qu'ils donnent lieu à un scénario minimisant les distances de transport. En effet, la distance totale entre les 3 sites est alors de 20kms, et le transport par barge est envisageable puisque chacun de ces 3 sites est situé en bord de Seine, à condition que ces sites disposent d'équipements permettant le transport des granulats par barge.

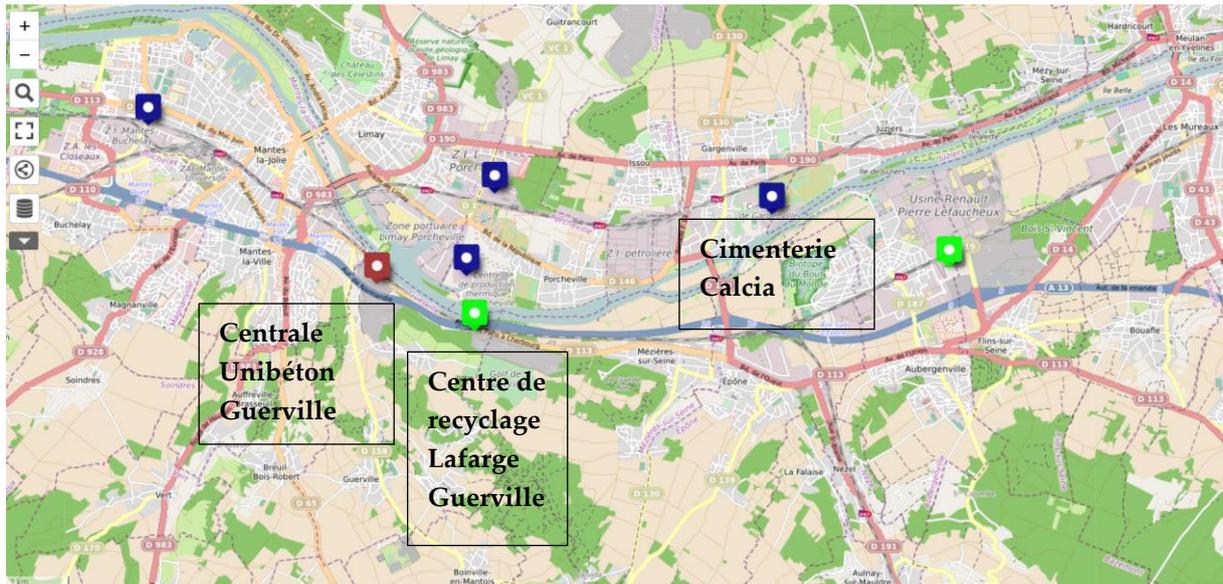


FIGURE 8. Zoom sur les sites retenus http://umap.openstreetmap.fr/fr/map/carte-sites-emetteurs-co2_752926#10/48.8322/2.2673

Comme vu auparavant, Fig 6, le transport par barge est plus intéressant en terme de score de changement climatique. Cela étant, d'autres indicateurs présentent de moins bons résultats pour la barge (Fig.9), ainsi pour une distance aussi courte aucun des deux modes de transport n'apparaît clairement plus intéressant que l'autre. Néanmoins par la suite, le moyen de transport retenu pour ce scénario sera le fret routier parce que c'est ce qui est actuellement le plus pratiqué.

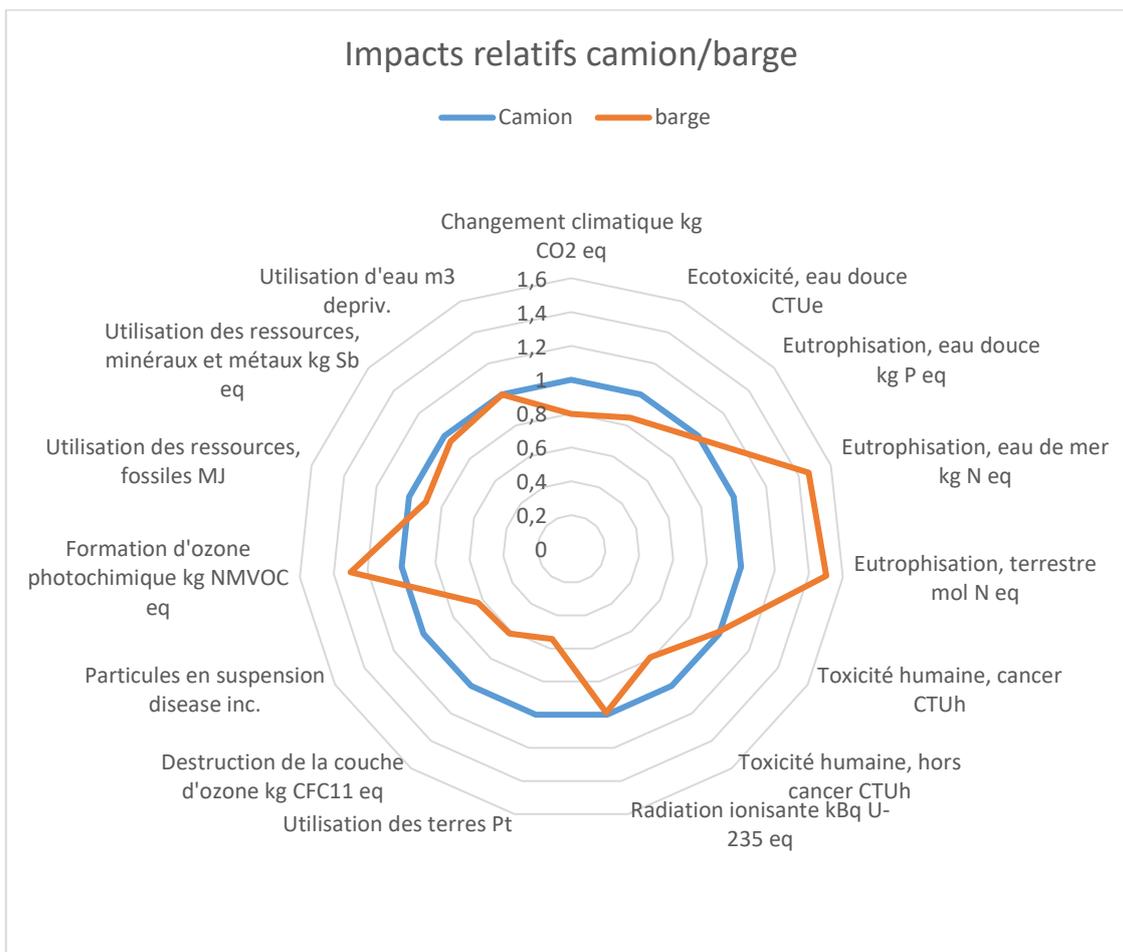


FIGURE 9. Comparaison des indicateurs d'impacts des scénarios barge/camion

En reprenant les valeurs de carbonatation obtenues via le démonstrateur Vicat, soit 31kg de CO₂ capturés par tonne de GBR de fraction fine (<4mm), on obtient avec la distance de 20kms un bilan carbone positif d'environ 27kg/t GBRC de fraction fine.

L'étape suivante est de réaliser le bilan environnemental d'un béton constitué de ces GBRC et ayant des propriétés mécaniques comparables à un béton constitué de granulats naturels. Un autre groupe de travail du PN Fastcarb a en effet mis au point différents bétons aux propriétés mécaniques semblables avec des granulats naturels, des granulats de béton recyclés et des granulats de béton recyclés carbonatés. Ce travail de modélisation environnementale ayant été réalisée en s'appuyant sur la base de données Ecoinvent l'utilisation des données contextualisées (ex les déclarations environnementales de produits – DEP – fournies par le Syndicat Français de l'Industrie Cimentière⁹) n'est pas possible sur le logiciel utilisé mais ceci mériterait d'être développé.

Les compositions des différents bétons de classe de résistance 25/30 MPa sont indiquées ci-dessous, Tableau 2. Ces bétons correspondent aux bétons formulés dans le cadre du PN Fastcarb (GT2.2).

⁹ <https://www.infociments.fr/ciments/ciments-declaration-environnementale-inventaire-analyse-du-cycle-de-vie>

TABLEAU 2. Compositions des différents bétons étudiés

	Unité	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
SN	kg	844	571	607	592	411	444	420
SBR	kg		143			274		
SBRC1	kg			152			296	
SBRC2	kg				148			280
GN 4-11.2	kg	213	107	106	106			
GN 11.2-22.4	kg	731	363	358	358			
GBR	kg		471			870		
GBRC1	kg			464			882	
GBRC2	kg				464			873
CEM II	kg	320	320	320	320	320	320	320
Isoflow 857 (superplastifiant)	%	0.15						
Isoflow 7230 (superplastifiant)	%	0.6	1.20	0.65	0.65	1.20	0.90	0.90
Chryso CHR (retardateur)	%		0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50
G/S		1.12	1.32	1.22	1.25	1.27	1.19	1.25
Eau efficace	kg	177	177	177	177	177	177	177
Eau efficace/ciment		0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55

Par exemple, les impacts sur le changement climatique des différents bétons sont les suivants, Fig 10 :

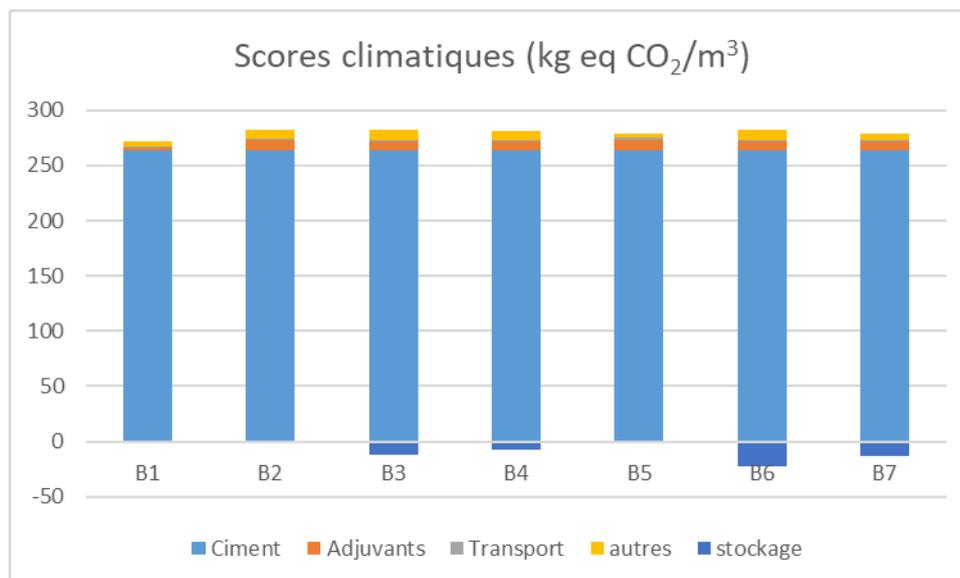


FIGURE 10. Scores de changement climatique pour les 7 compositions de béton du Tableau 2

On observe les plus faibles émissions pour le béton B1, constitué de granulats naturels. Cependant, si l'on soustrait le CO₂ capté par les granulats, on obtient la quantité de CO₂eq la plus faible pour la formulation B6, constitué de 40% de SBRC (Sable de béton recyclé carbonaté) et de 100% de GBRC. La quantité de CO₂ captée se calcule comme suit (on prend l'exemple de la formule B6) :

Dosage en SBRC (ici 0,296 t/m³) x Captage moyen du sable pour le démonstrateur utilisé (ici 31 kg CO₂/t) + Dosage en GBRC (ici 0,882 t/m³) x Captage moyen du sable pour le démonstrateur utilisé (ici 4 kg CO₂/t)

Ainsi la quantité de CO₂ captée dans le cas de la formulation B7 :

$$0.296 \times 31 + 0.882 \times 4 = 12.7 \text{ kgeqCO}_2/\text{m}^3$$

Les émissions de GES sont très largement liées au ciment (263kg/m³) Il serait intéressant de travailler avec des données contextualisées et donc représentatives du contexte territorial (et non pas des données moyennées type ecoinvent qui donnent une fourchette haute des émissions de GES ; ainsi, en considérant la DEP du SFIC pour un CEM II au calcaire, la contribution aux émissions de GES du ciment serait de 216 kg et non 263 kg). De plus le ciment utilisé est un CEM II il existe d'autres types de ciment (ciments aux laitiers) qui sont moins émetteur compte tenu des méthodes d'allocations prises en compte à ce jour.

En dehors de ces éléments, le levier pouvant être utilisé pour améliorer encore l'impact changement climatique des bétons carbonatés est d'augmenter le taux de SBRC qui n'est que de 40% dans le cas présent.

Pour des bétons de classe de résistance plus élevée (C45/55), les compositions proposées au sein du PN ne contiennent pas de SBRC mais uniquement du SN et des GBRC (100%). Le captage étant efficace surtout pour la fraction fine, ceux-ci présentent des bilans environnementaux trop limités, y compris sur l'impact climatique et plus encore pour les autres types d'impacts.

IV. DISCUSSION ET CONCLUSION

La carbonatation accélérée de granulats de béton recyclés permet une réduction de l'impact changement climatique. Elle permet aussi d'utiliser des granulats de béton recyclé plutôt que des granulats naturels et de diminuer la consommation d'eau (le procédé ecoinvent de granulats naturels utilisé prend en compte un lavage des granulats naturels ; une contextualisation au territoire français pourrait s'avérer plus représentative), Fig.11.

Néanmoins, sur les autres aspects environnementaux, les bétons constitués de GBRC sont plus impactants que les bétons constitués de granulats naturels du fait de l'utilisation d'adjuvants, des installations nécessaires pour le recyclage et la carbonatation accélérée des granulats et de distances de transport plus élevées.

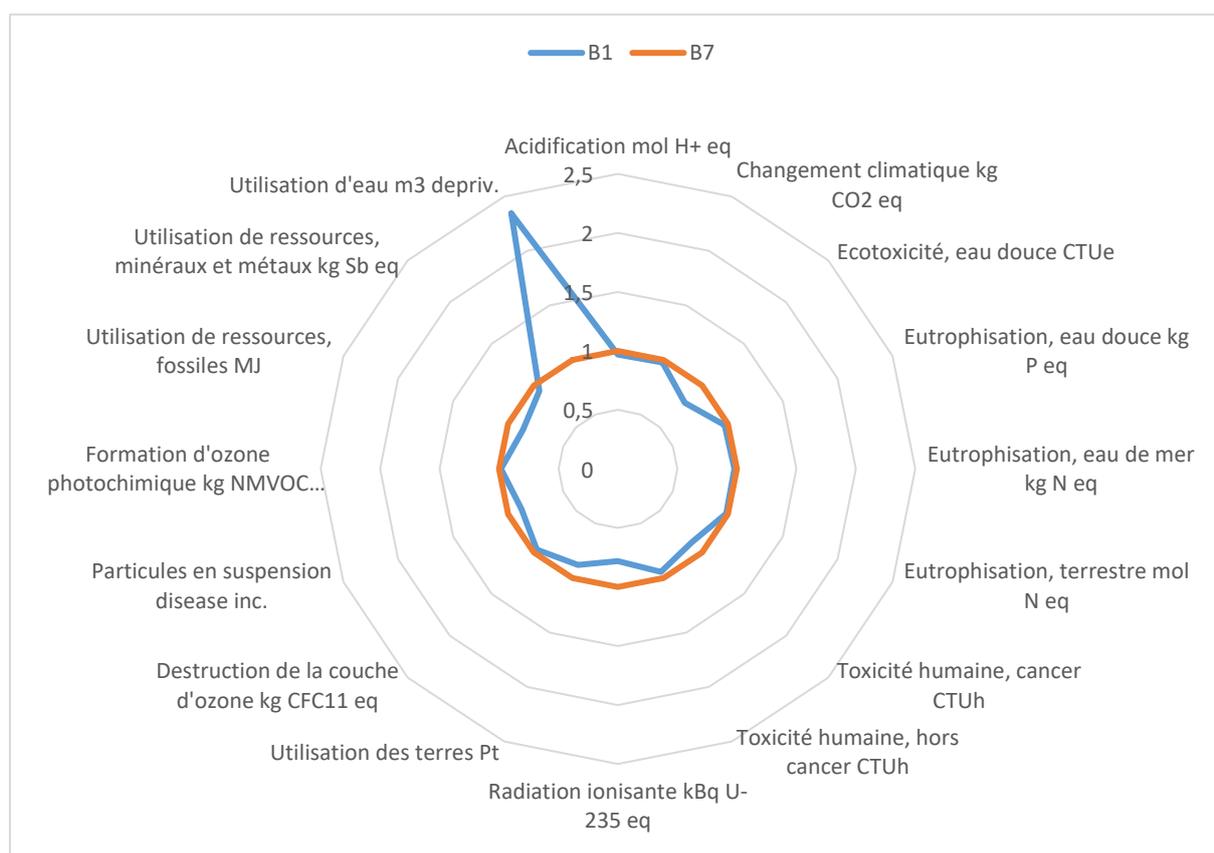


FIGURE 11. Impacts environnementaux B1/B7

La carbonatation accélérée peut donc avoir un rôle à jouer dans la réduction des émissions de GES du secteur de la construction. D'autres facteurs sont à considérer : distances et modes de transport, proximité des acteurs, quantités de CO₂ piégées dans les GBRC, formulation adaptée des bétons,... Cette solution pourrait être plus pertinente dans d'autres applications, par exemple le cas de la préfabrication mériterait d'être étudié.

S'il apparaît que la carbonatation permet d'assurer un certain taux de captage de CO₂ par les granulats de béton recyclés, elle appartient à une famille de solutions techniques qui devront être combinées à des efforts de sobriété qui dépassent la simple échelle du matériau.

REMERCIEMENTS

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

REFERENCES

L. Barnes-Davin L., Guillot X., Izoret L., P.N. FASTCARB - Retours d'expérience des démonstrateurs industriels, GC 21.

Bougrain F., Doutreleau M., Analyse économique des procédés de carbonatation accélérée, PN Fastcard, 2022

Boutaud, A. Gondran N. (2022) Jusqu'à quand pourrions-nous dépasser les limites planétaires ? The conversation

Feraille A., Saadé M., Desbois T. (2022) L'ACV dans le domaine de la construction : le cas du matériau béton, Academic Journal of Civil Engineering, Vol 40 N° 2 : SPECIAL ISSUE: JOURNÉES THÉMATIQUES AUGC - ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Jolliet O., Saadé-Sbeih M., & Crettaz P., Jolliet-Gavin, N., Shaked, S., Analyse du cycle de vie comprendre et réaliser un écobilan, *presses polytechniques et universitaires romandes*, 2017

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>

Saadé M., Feraille A. (2021) ACV de granulats carbonates – Rapport d'avancement. GT2-3 – Evaluations économiques et environnementales, Rapport de recherché, Projet FastCarb, 21 p.