

Projet de recherche et développement



Stockage de CO₂ par carbonatation du béton recyclé

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

ACV de granulats carbonatés Rapport final

Auteur(s) / Organisme(s) :

Myriam Saadé – Univ Eiffel

Adelaïde Feraille - ENPC

Thème de rattachement :

GT2-3 - Evaluations économiques et environnementales

FCARB/R/012

LC/22/FCARB/068

09/02/2023

Site internet : www.fastcarb.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/fastcarb

Président : Raoul de PARISOT

Directeur : Jean-Michel TORRENTI

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

Sommaire	2
Liste des figures	4
Liste des tableaux	6
1 Résumé	7
2 Introduction	8
2.1 Contexte de l'étude	8
2.2 Objectifs de l'étude	8
2.3 Approche	8
2.4 Equipe	11
2.5 Collaboration avec les autres travaux du PN FastCarb	11
2.6 Communication et publication sur l'étude.....	11
3 Rappel méthodologique : l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)	12
3.1 Introduction : l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).....	12
3.2 Démarche	12
3.2.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude	12
3.2.2 Inventaire.....	13
3.2.3 Analyse de l'impact environnemental	14
3.2.4 Interprétation	14
3.3 Limites et potentialités d'une ACV	14
3.4 Bases de données	14
3.5 Standards et cadre normatif.....	15
4 Comparaison de systèmes de carbonatation	16
4.1 Définition des objectifs.....	16
4.2 Description des différents systèmes de carbonatation.....	17
4.2.1 Démonstrateur VICAT (Créchy) : rappel	17
4.2.2 Démonstrateur LAFARGE (Val d'Azergues)	19
4.1.3 Système Neustark	21
4.1.4 Système théorique avec transport de CO ₂ (procédé ecoinvent).....	23
4.2 Comparaison des systèmes de carbonatation	24
4.2.1 Démonstrateurs VICAT et LAFARGE	24
4.2.2 Systèmes impliquant le transport de CO ₂ vers la source de GBR	27
4.2.3 Comparaison des systèmes de carbonatation avec transport de GBR et transport de CO ₂	28
4.2.4 Etude de sensibilité	31
4.4 Conclusion	34

5 Comparaison de différents scénarios d'approvisionnement en granulats (graviers ou sable)	35
5.1 Définition des objectifs et du système	35
5.2 Résultats	36
6 ACV de différentes options d'utilisation de GrBRC et de SBRC	38
6.1 Alternatives à considérer	38
6.2 Valorisation des GBRC dans le béton	38
6.2.1 Définition des objectifs et du système	38
6.2.2 Résultats	43
6.3 Perspectives de recherches complémentaires	45
7 Conclusion et perspectives	46
7.1 Conclusion sur l'ACV détaillée	46
7.2 Perspectives	46
Bibliographie	48
Acronymes	50
Annexes	51
A1. Description mix électriques	51
A2. Démonstrateur LAFARGE : analyse de sensibilité sur les mix électriques	52
A4. Procédés utilisés dans la modélisation	53
A5. Approvisionnement en granulats	54

Liste des figures

Figure 1. Limites des systèmes évalués	10
Figure 2. Phases de l'analyse du cycle de vie, tiré de Jolliet et al. (2017)	12
Figure 2. Limites du système et principales étapes du cycle de vie d'un produit, tiré de Jolliet et al. (2017)	13
Figure 4 : Démonstrateur mis en œuvre sur le site de Créchy par VICAT	17
Figure 5. Limites du système de production des GBRC – démonstrateur VICAT	18
Figure 6. Démonstrateur mis en œuvre par Lafarge sur le site de Val d'Azergues. (Izoret et al (2021))	20
Figure 7. Système de carbonatation mis en œuvre par Neustark. Source : https://www.greaterzuricharea.com/en/news/holcim-drives-forward-start-ups-innovations ©Holcim	21
Figure 8. Modélisation du système mis en œuvre par l'entreprise Neustark, source : https://www.neustark.com/faq	22
Figure 9. Modélisation du système théorique de carbonatation à partir de CO ₂ concentré à partir de gaz industriel (production d'ammoniac)	23
Figure 10. Modélisation du procédé de production de dioxyde de carbone liquide, selon ecoinvent. Le flux de CO ₂ récupéré à partir du gaz généré lors de la production d'ammoniac n'est pas considéré.	24
Figure 11. Comparaison des scores relatifs pour les démonstrateurs VICAT et LAFARGE (impacts environnementaux des procédés de carbonatation uniquement, i.e. sans prise en compte des transports et du captage de CO ₂ , pour une t de GBRC). Méthode d'évaluation de l'impact : EN 15804+A2	25
Figure 12. Comparaison des scores relatifs pour les démonstrateurs VICAT et LAFARGE (procédés de carbonatation uniquement, pour une t de GBRC) – détails ; AC : acidification ; CC : changement climatique ; EcoT : écotoxicité, eau douce ; EED : eutrophisation, eau douce ; EM : eutrophisation, marine ; ET : eutrophisation, terrestre ; ToxCa : toxicité humaine, cancer ; ToxNC : toxicité humaine, non-cancer ; RI : radiation ionisante ; SOL : utilisation des sols ; DOZ : destruction d'ozone ; PAR : particules ; FOP : formation d'ozone photochimique ; RF : ressources, fossiles ; RMM : ressources, minéraux et métaux ; EAU : utilisation de l'eau. Méthode d'évaluation de l'impact : EN 15804+A2	26
Figure 13. Comparaison des scores relatifs pour les démonstrateurs VICAT et LAFARGE (procédés de carbonatation uniquement, pour une t de GBR) - détails	26
Figure 14. Scores d'impact sur le changement climatique pour différents scénarios théoriques de carbonatation des GBR à partir de CO ₂ liquide obtenu par MEA (ecoinvent), pour différents taux de captage et taux de perte de CO ₂ , sans prise en compte du transport et du captage de CO ₂ , comparé au procédé Neustark.	28
Figure 15. Scores d'impact pour les trois scénarios de carbonatation des GBR : système VICAT, système LAFARGE et système théorique à partir de CO ₂ liquide obtenu par MEA (ecoinvent), sans prise en compte du captage de CO ₂	29
Figure 16. Répartition des scores d'impact sur le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone et pour les trois scénarios de carbonatation des GBR (VICAT, LAFARGE et système théorique à partir de CO ₂ liquide obtenu par MEA (ecoinvent), sans prise en compte du captage de CO ₂	30
Figure 17. Répartition des scores d'impact sur le changement climatique	31
Figure 17. Comparaison des scores d'impact relatifs par t.km pour différents modes de transport de fret. Source : ecoinvent	32
Figure 19. Comparaison des scores d'impact relatifs pour le démonstrateur LAFARGE, en considérant différents mix électriques (FR : France ; CH : Suisse ; DE : Allemagne ; US-NPCC : Etats-Unis, Northeast Power Coordinating Council ; US-MRO : Etats-Unis, Midwest Reliability Organization)	33
Figure 20. Comparaison des scores d'impact sur le changement climatique pour le démonstrateur LAFARGE, en considérant différents mix électriques (FR : France ; CH : Suisse ; DE : Allemagne ; US-NPCC : Etats-Unis, Northeast Power Coordinating Council ; US-MRO : Etats-Unis, Midwest Reliability Organization)	34

Figure 21. Comparaison des impacts pour différents scénarios d'approvisionnement en granulats, sans prise en compte du captage de CO ₂ . Scores relatifs pour les indicateurs de la norme EN 15804+A2. GBRC1 correspond aux granulats carbonatés à partir du système de Lafarge. GBRC2 correspond aux granulats carbonatés à partir du système de VICAT.	36
Figure 22. Comparaison des scores de changement climatique pour différents types de granulat, transportés sur des distances minimum et maximum.....	37
Figure 23. Limites du système de production de béton à partir de GBRC.....	41
Figure 24. Comparaison des scores climatiques des bétons B1 à B7.....	43
Figure 24. Comparaison de différents impacts des B1 et B7	44
Figure A26. Scores d'impact relatifs pour les catégories couvertes par la NF EN 15804, pour les scénarios d'approvisionnement en granulats, transport minimum en camion.....	55
Figure A27. Scores d'impact relatifs pour les catégories couvertes par la NF EN 15804, pour les scénarios d'approvisionnement en granulats, transport minimum en camion.....	56

Liste des tableaux

Tableau 1. Principales caractéristiques des systèmes de carbonatation évalués	16
Tableau 2 : Flux de référence relatifs à l'infrastructure mis en œuvre par VICAT (exprimés par unité de carbonateur)	18
Tableau 3. Flux de référence pour le démonstrateur VICAT (exprimés par t de GBRC)	19
Tableau 4. Taux de carbonatation (kgCO ₂ /t GBR)	20
Tableau 5. Flux de référence pour le démonstrateur LAFARGE (exprimés par t de GBRC)	21
Tableau 6. Scores d'impact par kg de CO ₂ liquide produit (procédé ecoinvent)	27
Tableau 7. Hypothèses de distances de transport pour les scénarios de carbonatation des GBR	29
Tableau 8. Scénarios d'approvisionnement de différents types de granulats	35
Tableau 9. Scénarios de bétons C25/30 et C45/55 avec différentes substitutions de sable naturel et de gravillon	40
Tableau 10. Composition des scénarios B1 à B7 formulés dans le cadre du GT2.2.1 du PN FastCarb par m ³ de béton	42
Tableau A11. Composition des mix électriques employés dans les modélisations	51
Tableau A12. Procédés ecoinvent correspondant	51
Tableau A13. Scores d'impact pour les scénarios de carbonatation, démonstrateur mis en œuvre par LAFARGE, étude de sensibilité sur les mix électriques	52
Tableau A14. Procédés considérés dans la modélisation des scénarios de production de béton	53
Tableau A15. Scores d'impact environnemental de différents scénarios d'approvisionnement en granulats	54

1 Résumé

Résumé en français

Le Projet National Fastcarb s'intéresse à la carbonatation accélérée des granulats de bétons recyclés (GBR) pour à terme combiner les avantages de la valorisation des déchets du béton, et du captage et stockage de CO₂. L'objet de ce travail est d'évaluer d'un point de vue environnemental le procédé de carbonatation accéléré en utilisant l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), afin de choisir la technologie la plus performante, y compris au plan environnemental. Un premier travail a porté sur une pré-évaluation simplifiée sur le cycle de vie d'une solution de carbonatation, mise en œuvre par VICAT sur son site de Créchy. En parallèle d'une analyse économique menée par le CSTB, il a mis en évidence l'intérêt de la carbonatation accélérée sur la fraction fine des GBR, ainsi que le poids du transport dans le bilan environnemental, avec la nécessité de favoriser les circuits courts.

Cette deuxième partie d'analyse environnementale est élargie aux autres solutions technologiques, en particulier le démonstrateur mis en œuvre par Lafarge sur le site de la cimenterie de Val-d'Azergues, en comparaison d'autres systèmes basés sur le captage (atmosphérique ou industriel) de CO₂ et son transport sur site de carbonatation. Cette comparaison est ensuite élargie à des scénarios d'approvisionnement de granulats (naturels GN, GBR, et granulats de béton recyclés carbonatés GBRC), puis à des scénarios d'utilisation de ces différents granulats pour la fabrication de béton, en lien avec les travaux du GT2.2.1 du PN FastCarb. Les fractions fine (0-4 mm) et grossières (4-16 mm) sont distinguées. Enfin, la question de l'allocation du CO₂ capté entre filières émettrices et captant du CO₂ est brièvement discuté sur la base d'un cas théorique à l'échelle de la cimenterie.

Abstract

The FastCarb research project addresses the accelerated mineral carbonation of recycled concrete aggregates (RCA). It assesses the possible benefits of mineral carbonation, in terms of both concrete aggregates' recovery and CO₂ capture. The research presented in this report aims to evaluate the environmental impacts of accelerated mineral carbonation processes, based on a life cycle approach. A screening LCA was previously performed on one process, implemented by VICAT. The assessment demonstrated the advantage of mineral carbonation of the small size fraction (diameter < 4 mm). It also shows the important contribution of transport in the total balance and the necessary reduction of transport distances.

This second environmental assessment addresses other RCA mineralization technologies, particularly the prototype implemented by Lafarge and located in Val-d'Azergues, on the site of its cement plant. This solution was compared to systems based on (atmospheric or industrial) CO₂ capture and transportation to the mineralization site. The comparison is widened to evaluate aggregate supply scenarios, ranging from natural aggregate, recycled concrete aggregates and mineralized recycled concrete aggregates. Scenarios of concrete production formulated by the PN FastCarb 2.2.1 Work Package are further compared. Finally, the allocation of captured CO₂ between the emitting and capturing industries is shortly discussed based on a cement-scale case study.

2 Introduction

2.1 Contexte de l'étude

En plus de sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre (GES), le secteur de la construction est fortement consommateur en ressources et producteur de déchets (European Commission 2020). A l'échelle française, 200 millions de tonnes de déchets inertes sont générés par an, dont 17 millions sont issues du béton (Mongear & Dross 2016). La valorisation des déchets du béton est donc promue pour réduire les extractions de matière première, limiter l'enfouissement de déchets inertes et plus généralement lutter contre le changement climatique. Dans une démarche d'économie circulaire, la valorisation des déchets du béton, et plus particulièrement des granulats de béton recyclé (GBR) est considérée comme une voie d'amélioration des performances environnementales du secteur. De précédentes études ont cependant souligné la nécessité de vérifier les conditions pour lesquelles une telle valorisation est performante environnementalement (voir notamment les enseignements du PN Recybéton : Idir et al 2015, Braymand et al 2017).

L'amélioration des performances environnementales des GBR est au cœur du Projet National Fastcarb, qui s'intéresse à la carbonatation accélérée des GBR pour à terme combiner les avantages de la valorisation des déchets du béton, et la réduction de son empreinte carbone par captage et stockage du CO₂. La carbonatation accélérée des GBR pourrait conduire à des bénéfices environnementaux, du fait :

- de la valorisation des matériaux issus de la démolition ou déconstruction d'ouvrages du BTP et d'infrastructures en améliorant leur qualité,
- du stockage du CO₂ émis par différentes industries,
- de la substitution de matériaux construction extrait de l'environnement (gravier, sable).

Il est cependant nécessaire de déterminer les conditions pour lesquelles les systèmes et scénarios de carbonatation accélérée mis en œuvre sont intéressants sur le plan environnemental. Le travail effectué dans le cadre du GT2.3 du PN FastCarb porte sur ces enjeux. Il s'agit de quantifier les impacts environnementaux de la carbonatation accélérée et de les comparer aux bénéfices attendus. Ici encore, le principe est de regarder attentivement les effets sur le changement climatique, mais également de prendre en considération d'autres effets environnementaux pour éviter des transferts d'impact.

2.2 Objectifs de l'étude

Ce travail vise à évaluer d'un point de vue environnemental le procédé de carbonatation accélérée en utilisant l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'objectif à termes est d'informer sur la technologie la plus performante et sur les conditions d'utilisation des produits de la carbonatation accélérée favorables pour l'environnement. Après une première ACV simplifiée portant sur le système démonstrateur mis en œuvre par VICAT sur son site de Créchy, cette deuxième partie élargit l'évaluation à d'autres systèmes de carbonatation, scénarios d'approvisionnement de granulats et de leur utilisation.

2.3 Approche

L'approche adoptée pour évaluer les impacts environnementaux de la carbonatation accélérée des GBR est itérative. Une première partie a porté sur une ACV préliminaire (*screening*) visant à évaluer de manière rapide et simplifiée un système de carbonatation particulier. Puis une ACV détaillée, visant à comparer des scénarios de complexité croissante définis sur la base de l'ACV préliminaire, a été effectuée.

L'ACV préliminaire a porté sur le démonstrateur VICAT situé sur le site de la cimenterie de Créchy et a fait l'objet d'un rapport d'avancement (Saadé & Feraille 2021). Les tâches réalisées pour ce procédé ont été :

- la collecte de données spécifiques sur le procédé en lien avec les partenaires du projet pour avoir les données directes du site industriel concerné, lors d'une visite de site, le 12 octobre 2020 ;
- la définition et la délimitation du système technologique ;
- un calcul simplifié de bilan énergétique et d'émissions de CO₂ afin d'estimer les ordres de grandeur et identifier les paramètres clés.

L'analyse environnementale est ensuite élargie aux autres solutions technologiques, en particulier le démonstrateur mis en œuvre par Lafarge sur le site de la cimenterie de Val-d'Azergues, en comparaison d'autres systèmes basés sur le captage (atmosphérique ou industriel) de CO₂ et son transport sur site de carbonatation.

Les procédés de carbonatation sont ensuite intégrés à des scénarios d'approvisionnement de granulats (naturels GN, GBR, et granulats de béton recyclés carbonatés GBRC), puis à des scénarios d'utilisation de ces différents granulats pour la fabrication de béton, en lien avec les travaux du GT2.2.1 du PN FastCarb. Les fractions fine (0-4 mm) et grossières (4-16 mm) sont distinguées. Enfin, la question de l'allocation du CO₂ capté entre filières émettrices et captant du CO₂ est brièvement discuté sur la base d'un cas théorique à l'échelle de la cimenterie.

Pour ce faire, les tâches suivantes ont été réalisées :

- la collecte des données spécifiques sur le démonstrateur Lafarge (inventaire des flux en lien avec les partenaires du projet pour avoir les données directes des sites industriels), lors d'une visite virtuelle du site le 23 juin 2021 ;
- la collecte des données sur le système Neustark, sur la base des informations disponibles sur le site internet de l'entreprise et d'une revue rapide de la littérature sur les systèmes de captage du CO₂ atmosphérique et biogénique. Certaines données complémentaires, provenant de la méthodologie développée par Gold Standard pour Neustark en mars 2022 n'ont pas été intégrées ;
- l'examen des données existantes dans ecoinvent sur le captage de CO₂ industriel ;
- le développement dans OpenLCA de modèles de carbonatation correspondant aux démonstrateurs et systèmes décrits ci-dessus ;
- la modélisation dans OpenLCA de scénarios d'approvisionnement des granulats ;
- la modélisation dans OpenLCA de scénarios d'utilisation des granulats ;
- la modélisation dans OpenLCA d'un système cimenterie + carbonatation accélérée ;
- le calcul des scores d'impacts sur l'environnement ;
- l'interprétation des résultats ;
- des analyses de sensibilité sur les paramètres clés.

C'est cette seconde partie qui fait l'objet du présent rapport. La Figure 1 illustre les périmètres considérés (Chapitre 4 : UF 1 tonne de GBRC, Chapitre 5 : UF 1t de granulats, Chapitre 6 UF : 1m₃ de béton)

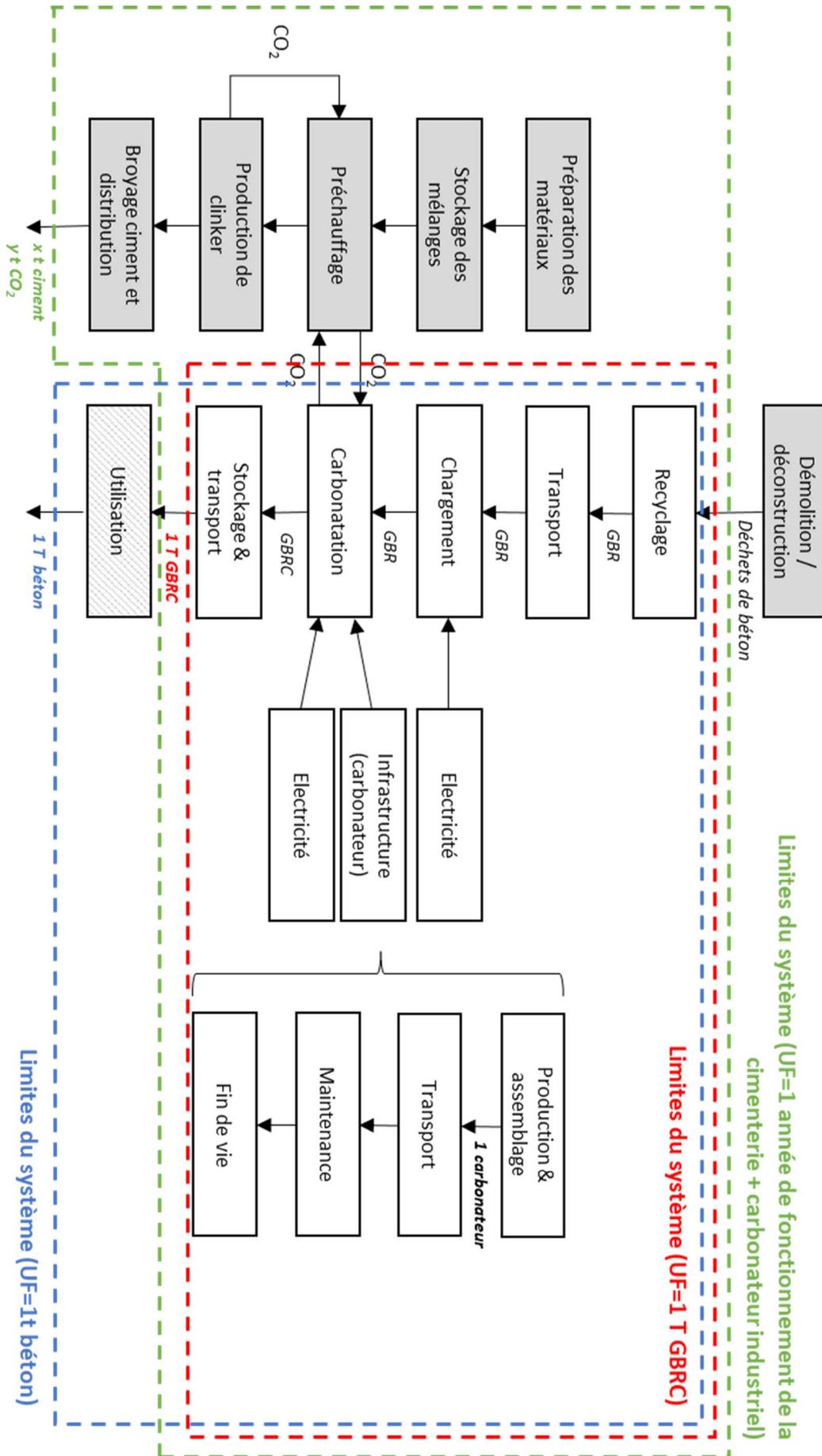


Figure 1. Limites des systèmes évalués

Le rapport s'organise de la manière suivante. Après un rappel de la méthodologie au Chapitre 3, il aborde l'évaluation des systèmes de carbonatation (Chapitre 4) reposant sur le transport de granulats (démonstrateurs VICAT et LAFARGE) ou le transport de CO₂ (système Neustark ou système théorique par MEA). Le Chapitre 5 traite ensuite de l'évaluation de scénarios d'approvisionnement de granulats (GN, GBR et GBRC), ensuite intégrés dans des scénarios d'utilisation des granulats dans du béton (Chapitre 6). Enfin le Chapitre 7 conclut le rapport.

2.4 Equipe

Cette recherche est pilotée par Adélaïde Feraille (ENPC), correspondante de l'étude auprès du PN FastCarb et responsable du GT2.3, et réalisée par Myriam Saadé (Univ Eiffel). Par ailleurs Paul Guyard a réalisé un stage sur ce sujet de mars à juillet 2022.

2.5 Collaboration avec les autres travaux du PN FastCarb

Le travail d'évaluation environnementale s'est fait en lien avec l'étude économique menée au CSTB par Frédéric Bougrain et Mathilde Doutréleau dans le cadre du GT2.3. Les visites des démonstrateurs VICAT et Lafarge, respectivement en présentiel à l'automne 2020 et à distance en juin 2021, ont été conjointes. De même, les scénarios évalués et en particulier les distances de transport, ont été élaborés en concertation.

La partie sur l'évaluation environnementale des scénarios d'utilisation de GBRC s'est faite sur la base de discussions avec les membres du GT2.2., en particulier Laurent Poulizac (CEMEX) responsable du GT2.2.1 et Patrick Rougeau (CERIB). Les données du GT2.2.1 ont été utilisées pour construire les scénarios de production de béton à partir de différentes compositions de granulats (GN, GBR et GBRC).

2.6 Communication et publication sur l'étude

Une communication a été effectuée dans le cadre des journées GC'2021 de l'AFGC, des 8 et 9 juin 2021 (Saadé et al 2021). Un article AJCE a également été publié (Guyard et al, 2022).

3 Rappel méthodologique : l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

3.1 Introduction : l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

L'ACV est une méthode fonctionnelle, multicritère et multi-étape d'évaluation de l'impact environnemental (Brochard et al 2020). Elle a pour objectif de quantifier et rendre comparables les dommages causés par les activités humaines (Jolliet et al. 2017). C'est un outil analytique dont la fonction est l'amélioration des processus productifs dans une démarche d'éco-conception. Son principe repose sur la définition d'une unité fonctionnelle, représentant la fonction du système modélisé, et à laquelle tous les flux de matière, d'énergie et les impacts sont rapportés (phase de définition des objectifs et du système). Pour différents scénarios de production d'un bien ou d'un service, les flux de matière et d'énergie émis vers et extrait de l'environnement sont estimés au cours de l'inventaire. Sur la base de ces flux, les impacts sont évalués pour différentes catégories ou domaines à protéger (le climat, la santé humaine, les écosystèmes...) lors de l'étape d'analyse de l'impact sur le cycle de vie. A chaque phase de l'analyse, l'interprétation permet de discuter les hypothèses et les résultats, d'expliquer les limites de l'étude et de proposer des recommandations (Figure 1).

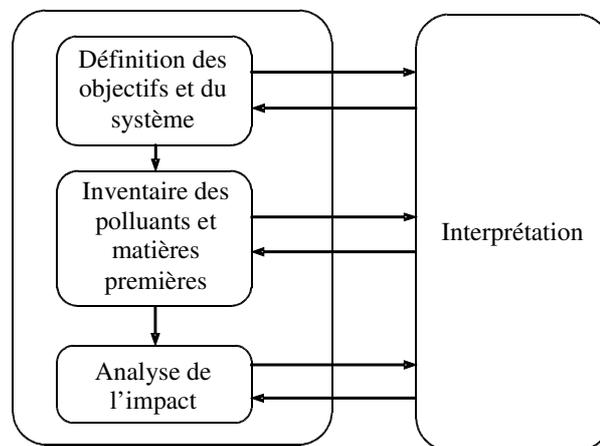


Figure 2. Phases de l'analyse du cycle de vie, tiré de Jolliet et al. (2017)

En plus de son ambition holistique, son originalité vis-à-vis d'autres méthodes d'évaluation repose sur l'estimation des flux de matière et de leurs impacts potentiels sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit, afin d'éviter la proposition d'améliorations du système productif menant à des déplacements d'impact d'une catégorie à une autre, ou d'une étape du cycle de vie à une autre.

3.2 Démarche

Les différentes phases de l'ACV sont décrites à la suite.

3.2.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude

3.2.1.1 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle est la grandeur quantifiant la fonction du système, sur la base de laquelle les scénarios évalués sont comparés. Pour une unité fonctionnelle donnée, on quantifie pour chaque scénario les **flux de référence**, à savoir les quantités de produits requises et achetées pour remplir cette fonction. Le choix de l'unité fonctionnelle est crucial car il influe sur le résultat de l'étude. L'unité fonctionnelle doit ainsi être définie en cohérence avec les objectifs de l'étude. Elle est une grandeur qui doit être *mesurable* et *additive*.

3.2.1.2 Modélisation et frontière du système

Les flux de référence sont calculés pour un système de production donné, modélisé selon une approche systémique. Le système modélisé est subdivisé en processus unitaires, assurant chacun une activité unique ou un groupe d'activités. Les processus unitaires sont ensuite reliés les uns aux autres par des flux de produits. Les processus unitaires sont reliés à l'environnement par des flux élémentaires (entrant ou sortant). Le niveau de détail de la modélisation d'un processus unitaire dépend des objectifs de l'étude, et des données à disposition pour le renseigner.

La modélisation du système de production requiert également de déterminer les processus à inclure et à exclure. Les limites du système incluent théoriquement tous les processus économiques requis pour réaliser sa fonction. En pratique, l'ACV nécessite généralement de fixer la **frontière du système** et d'exclure certains processus, en respectant des règles de cohérence.

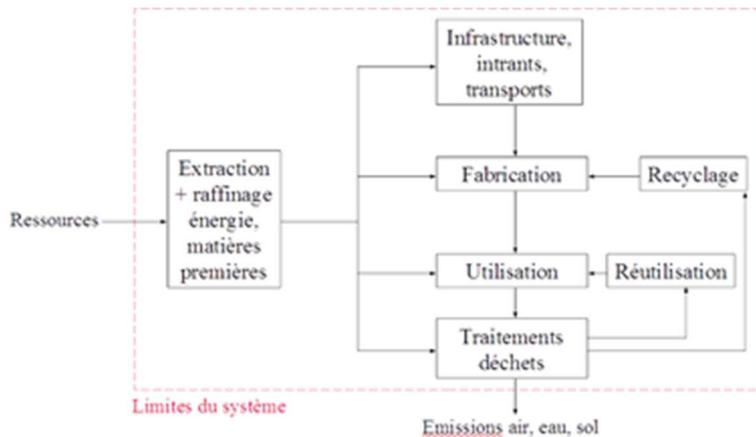


Figure 3. Limites du système et principales étapes du cycle de vie d'un produit, tiré de Jolliet et al. (2017)

La modélisation du système prend généralement en considération les processus impliqués dans les différentes étapes du cycle de vie du produit ou du service. Ces étapes sont les suivantes (Figure 2) :

- extraction des matières premières et de l'énergie
- mise à disposition des infrastructures, des machines et des infrastructures, transports
- production
- utilisation et entretien
- fin de vie, qu'il s'agisse du traitement des déchets ou de leur mise en valeur (réutilisation, recyclage ou valorisation énergétique)

3.2.2 Inventaire

L'inventaire du cycle de vie détermine les flux de matière et d'énergie extraites ainsi que les émissions polluantes dans l'eau, l'air et le sol. Il consiste à quantifier les flux de matière et d'énergie entrant et sortant du système, rapportés à l'unité fonctionnelle définie précédemment. L'inventaire s'effectue sur la base des flux de référence estimés précédemment, multipliés par des facteurs d'émission et d'extraction. Ces facteurs d'émission et d'extraction proviennent de bases de données d'inventaire telles que la base de données ecoinvent. Ces facteurs fournissent, pour chaque unité de matière et d'énergie consommée par unité fonctionnelle, la quantité de chaque substance émise vers ou extraite de l'environnement.

Si le calcul de l'inventaire est relativement aisé dans le cas d'un système générant un produit, il se complique sensiblement dans le cas d'un système à produits multiples. L'ACV ne s'intéresse généralement qu'à un seul de ces produits. Dans ce cas, il est nécessaire d'**allouer**

certaines flux de matière et d'énergie ainsi que certains impacts entre le produit analysé et les autres coproduits.

3.2.3 Analyse de l'impact environnemental

L'analyse de l'impact environnemental permet de mettre en équivalence les différents flux de matière et d'énergie, en les rapportant à différentes catégories d'impact environnemental. Cette phase du cycle de vie consiste d'abord à catégoriser les émissions et les extractions de substance dans différentes catégories d'impact (par exemple, changement climatique, effets sur la santé humaine...), puis de caractériser le potentiel de ces substances à causer un ou plusieurs impacts environnementaux. Cette caractérisation s'effectue en appliquant une ou plusieurs méthodes d'analyse de l'impact (par exemple, RECIPE ou IMPACT World+).

3.2.4 Interprétation

L'interprétation a pour objectif d'identifier les étapes du cycle de vie sur lesquelles intervenir pour réduire des résultats d'une ACV porte sur chaque phase de l'ACV. Elle vise également à déterminer les paramètres clés, à tester la robustesse des résultats de l'analyse ainsi qu'à estimer les incertitudes.

3.3 Limites et potentialités d'une ACV

En tant qu'outil d'évaluation environnementale, l'ACV est une méthode holistique permettant de comparer des scénarios entre eux. La méthode est transparente tant que les hypothèses sous-tendant l'analyse sont clairement spécifiées et testées dans le cadre d'études de sensibilité. En particulier les choix effectués lors de la délimitation du système, en matière d'allocation, les valeurs des paramètres clés doivent être explicités.

La dimension multicritère, très intéressante en terme analytique, peut se révéler complexe lorsqu'il s'agit de traduire l'évaluation à l'échelle décisionnelle, qui favorise un transfert d'information succincte. Cette simplification de l'information repose également souvent sur des pondérations qu'il est nécessaire de préciser.

L'ACV est une méthode en plein développement, tout particulièrement en matière de bases de données d'inventaire et de méthode d'évaluation de l'impact environnemental. Cela implique des innovations constantes d'indicateurs d'impact, de prise en compte des variabilités spatiales et temporelles, de territorialisation des flux ou des facteurs de caractérisation, entraînant des mises à jour fréquentes.

Enfin, les aspects économiques et sociaux ne sont pas évalués et peuvent faire l'objet d'une analyse complémentaire, sous réserve d'une démarche cohérente avec l'évaluation environnementale. L'analyse du cycle des coûts (Rebizer 2002) et l'analyse sociale du cycle de vie (UNEP 2009) peuvent être utilisées.

3.4 Bases de données

L'ACV est également une méthode qui requiert une grande quantité de données pour pouvoir calculer d'une part les flux de matière extraites de l'environnement, puis de substances émises vers l'environnement, et d'autre part les impacts environnementaux. Ces calculs reposent en grande partie sur des bases de données d'inventaire et des bases de données dites « filles ».

- Les bases de données d'inventaire fournissent des facteurs d'émission de polluants et d'extraction de ressources pour certains produits, matériaux et procédés industriels. La base de données d'inventaire de référence est ecoinvent, fournissant des données pour des procédés génériques à l'échelle mondiale ou nationale. Des bases de

données d'inventaire spécifiques ont été développées dans certains secteurs, par exemple LCA food dans l'agroalimentaire.

- Les bases de données « filles » fournissent des scores d'impact par produit, matériaux et procédés. Elles reposent sur les bases de données d'inventaire, souvent ecoinvent, mais ne fournissent pas le détail de l'inventaire des émissions et des extractions. En France, INIES est la base de données de référence pour les produits de construction. DIOGEN fournit quant à elle des données par matériaux.

3.5 Standards et cadre normatif

L'ACV est une méthode d'évaluation normalisée, et ce à différentes échelles. A l'international, sa pratique est encadrée par deux normes ISO, la 14'040 et la 14'044, publiées initialement au milieu des années 1990 puis mises à jour en 2006.

En Europe, l'application de l'ACV se réfère à la norme EN 15'804. La norme prédéfinit les étapes du cycle de vie à considérer lors de la réalisation d'une ACV, et fixe les indicateurs de flux et d'impact à prendre en compte.

Point sur la prise en compte de la carbonatation (naturelle ou accélérée) des granulats recyclés en ACV

- thèse Ta, V.T. (2017), A novel approach for environmental and durable design of reinforced concrete structures altered by carbonation
- CEN/TC 104 (2019) Carbonatation et absorption du CO₂ dans le béton
- CEN/TC 229 (2021) Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Product Category Rules for concrete and concrete elements

4 Comparaison de systèmes de carbonatation

4.1 Définition des objectifs

Sur la base de l'évaluation préliminaire (Saadé & Feraille 2021), une comparaison de différents systèmes de carbonatation est présentée. L'objectif est de comparer les différents systèmes de carbonatation ; dans un premier temps sans prise en compte du transport, pour évaluer uniquement les procédés, identifier les manques (en données par exemple) ou les besoins en termes de recherche complémentaire ; dans un second temps en tenant compte du transport. Les caractéristiques des différents systèmes de carbonatation considérés sont détaillées au Tableau 1.

L'unité fonctionnelle considérée est la tonne de GBR carbonatée (GBRC).

Les deux premiers systèmes de carbonatation correspondent aux démonstrateurs mis en œuvre par VICAT et LAFARGE, respectivement sur les sites de Créchy et de Val d'Azergues. Les seconds correspondent aux systèmes de carbonatation avec transport de la source de CO₂ proposé par Neustark ou construit théoriquement à partir des données disponibles dans ecoinvent.

Tableau 1. Principales caractéristiques des systèmes de carbonatation évalués

	Tambour rotatif (VICAT)	Lit fluidisé (LAFARGE)	Transport CO ₂ (Neustark)	Transport CO ₂ (process ecoinvent)
Source CO ₂	Fixe (cimenterie)	Fixe (cimenterie)	Mobile (AirLiquide ou autre)	Mobile
Type gaz	CO ₂ industriel	CO ₂ industriel	CO ₂ atmosphérique concentré	CO ₂ industriel (ammoniac)
Température CO ₂ entrée	50°C	80-90°C	Température ambiante (?)	Température ambiante (?)
Concentration CO ₂ entrée	15%	18%	90-100% (?)	90-100% (?)
Quantité carbonatée	1,5 t/h	1 T/h	20 T/h	(?)
Captage DMAX=4 (kg/T)	31	39 (max 49)	10 (?)	(?)
Captage DMAX=16 (kg/T)	5	12 (max 32)	10 (?)	(?)
Source données	Données spécifiques VICAT	Données spécifiques LAFARGE	Données site internet Neustark	Données ecoinvent
Incertitudes	Moyenne (effet prototype)	Moyenne (effet prototype)	Forte	Très forte

(?) : informations à vérifier source non explicite et donc interprétée

4.2 Description des différents systèmes de carbonatation

4.2.1 Démonstrateur VICAT (Créchy) : rappel

Cette partie reprend les éléments fournis dans le premier rapport d'avancement, qui portait spécifiquement sur le démonstrateur VICAT. Le démonstrateur mis en œuvre sur le site de la cimenterie de VICAT à Créchy est un tambour rotatif utilisé précédemment comme sécheur pour la fabrication d'enrobés, modifié pour pouvoir remplir sa fonction de carbonatation (Figure 4). Il se situe à côté du broyeur cru et récupère les gaz industriels concentrés en CO₂ en provenance de la tour de préchauffage. La température du gaz à l'entrée du carbonateur est de 50°C, avec une concentration de CO₂ de 15%

(Tableau 1). Le gaz est dépoussiéré par un cyclone puis par un système de filtres à manche. Il est ensuite injecté dans le démonstrateur, puis rejeté dans la gaine principale reliant la tour de préchauffage et le broyeur cru.

Les GBR sont issus d'une plateforme de réception et de traitement des déchets inertes de démolition situé à Saint Fons (Rhône) où ils sont concassés. Il s'agit de matériaux de bonne qualité, des bétons de type retours de centrale exempts d'indésirables liés à la démolition de bâtiments. Ils sont fournis en deux granulométries : sable à 0-4 mm ; gravillons à 4-16 mm. Ils sont ensuite transportés par camion jusqu'à la cimenterie de Créchy, sur une distance de 250 km, où ils sont stockés. Les GBR sont ensuite chargés dans le démonstrateur par une trémie qui fonctionne en batch de 3 tonnes, 20 minutes par batch. Le démonstrateur comporte 4 moteurs fonctionnant 2 minutes toutes les quinze minutes pendant la durée de la carbonatation afin de ralentir le déplacement des granulats vers la sortie du tambour. Pour un temps de séjour optimum d'1h avec une humidité de 10%, les taux de carbonatation obtenus sont de 3,1% pour le sable et 0,5% pour le gravier (

Tableau 1), avec l'objectif d'atteindre un taux de carbonatation de 5%.



Figure 4 : Démonstrateur mis en œuvre sur le site de Créchy par VICAT.

Tableau 2 : Flux de référence relatifs à l'infrastructure mis en œuvre par VICAT (exprimés par unité de carbonateur)

	Unité	Flux de référence
Production et assemblage		
Acier	kg	18000
Cables (électronique)	kg	nd
Tuyaux	kg	nd
Transport		
Transport par camion	t.km	4500
Maintenance		
Acier (relevés)	kg	5000
Acier (blindage)	kg	
Huiles (graissage)	kg	
Fin de vie		
Mise en décharge de l'acier	kg	23000

En considérant la carbonatation de 1,5 tonnes de GBR par heure, il est estimé que le démonstrateur pourrait être utilisé au moins 7000 h/an sur 10 ans. Dans le cas d'un système industriel, l'installation pourrait fonctionner en poste si la demande est importante. Les GBRC sont ensuite stockés sur site, puis transportés pour être utilisés.

Les limites du système (Figure 5) incluent ainsi les différentes étapes du cycle de vie de la carbonatation des GBR, du recyclage au niveau de la plateforme jusqu'au site d'utilisation (excluant l'utilisation, par exemple la production de béton en centrale).

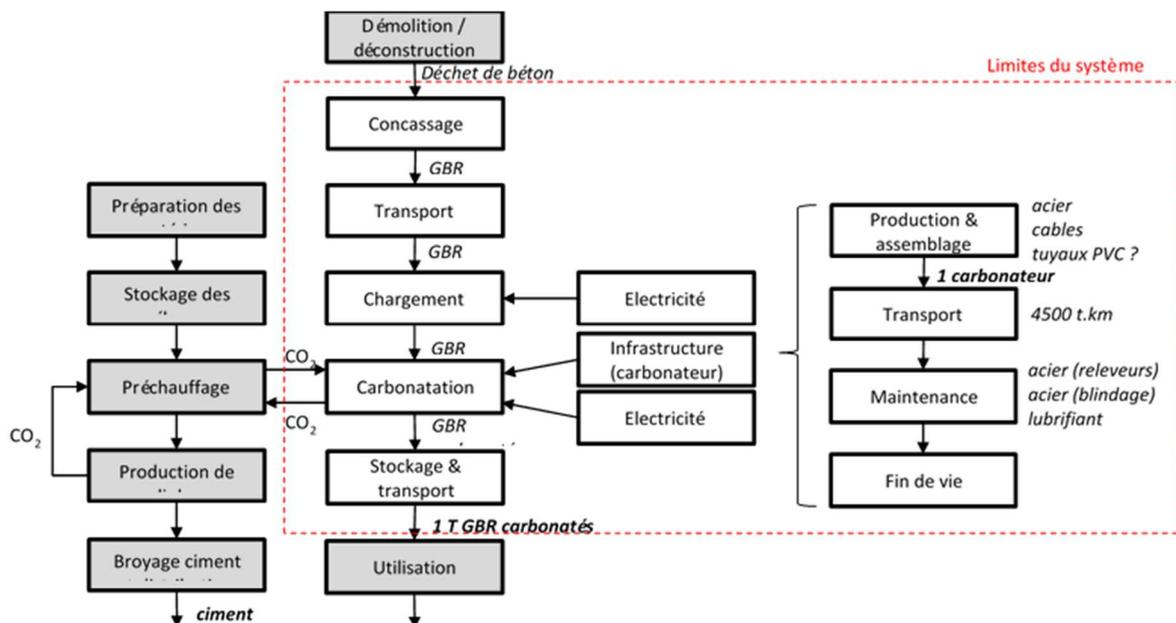


Figure 5. Limites du système de production des GBRC – démonstrateur VICAT

En matière d'allocations, on considère ici les ressources secondaires que sont les déchets de béton et le CO₂ comme « gratuites », c'est-à-dire que les impacts liés à leur mise à disposition sont alloués entièrement aux cycles de vie des processus les ayant générés comme déchets (approche cut-off). L'évitement des impacts liés au transport et au traitement des déchets de béton n'est donc pas considéré. Par contre, tout procédé de traitement de ces déchets après

leur génération (le recyclage) est inclus dans le système. Ceci doit permettre une comparaison avec un système d'approvisionnement de matériaux primaires (sable ou granulats naturels).

Les flux de référence ont été estimés à partir des données fournies par VICAT lors de la visite de site du 12 octobre 2020. Ils sont répertoriés dans les Tableaux 2 et 3, respectivement pour le système démonstrateur (infrastructure) et pour la carbonatation des GBR.

Tableau 3. Flux de référence pour le démonstrateur VICAT (exprimés par t de GBRC)

	Unité	Flux de référence
Carbonatation		
Infrastructure (tambour)	Unité	9,52E-06
Electricité (chargement)	kWh	0,222
Electricité (moteurs)	kWh	3,91
Electricité (ventilation)	kWh	4
Electricité (dépoussiérage)	kWh	0,67

4.2.2 Démonstrateur LAFARGE (Val d'Azergues)

Le démonstrateur mis en œuvre sur le site de la cimenterie de Val d'Azergues par Lafarge est un sécheur à lit fluidisé (Figure 6), initialement utilisé dans l'industrie agro-alimentaire. Des conduites métalliques récupèrent le gaz à la cheminée principale de l'usine, au niveau du filtre principal. Le gaz est ensuite soufflé sous le carbonateur, puis filtré en sortie pour éviter le dégagement de poussière, avant d'être réinjecté dans la cheminée. Les granulats sont chargés par une trémie, avancent par gravité sur un tapis vibrant, où les gaz traversent la couche de granulats, puis sont récupérés carbonatés dans des big-bags. Les GBR utilisés sont les mêmes que ceux utilisés par le système élaboré par VICAT.

Les taux de CO₂ captés sont de 39 kgCO₂/t de GBRC pour la fraction 0-4 mm (avec un maximum de 49), et de 12 kgCO₂/t de GBRC pour la fraction 4-16 mm (avec un maximum de 32), comme mentionné au

Tableau 14.

Les limites du système et les choix en matière d'allocation sont similaires au système démonstrateur de VICAT (Figure 6).



Figure 6. Démonstrateur mis en œuvre par Lafarge sur le site de Val d'Azergues. (Izoret et al (2021))

Les puissances des différents éléments du système sont les suivantes : 11 kW pour le ventilateur, 18 kW pour le ventilateur aspirant, 3 kW pour le moteur vibrant. Les consommations électriques sont calculées en considérant que le ventilateur, le ventilateur aspirant et le moteur vibrant fonctionnent 1h pour la carbonation d'1 t de GBR.

Pour les données manquantes, nous prenons les hypothèses suivantes :

- Bande convoyeuse de puissance 2 kW, utilisée 10 minutes par tonne de GBR
- Caractéristiques du démonstrateur similaire à celles du démonstrateur VICAT (masse et composition), à savoir un système composé de 18 t d'acier transporté sur 250 km depuis le site de fabrication, avec une maintenance nécessitant le changement de pièces (5 t annuellement sur 10 ans à 7000 h/an).

Les GBR sont transportés par camion benne roulant au gasoil (>32 t), sur une distance comprise entre 23 et 52 km entre la plateforme de recyclage et la cimenterie ; puis les GBRC sont acheminés vers les centrales à béton, situées entre 14 et 57 km de la cimenterie.

Tableau 4. Taux de carbonatation (kgCO₂/t GBR)

Fraction 0-4 mm	Fraction 4-16 mm	Objectif
39 (max 49)	12 (max 32)	50

Les flux de référence du système de carbonatation des GBR ont été estimés à partir des données fournies par Lafarge lors de la visite virtuelle du démonstrateur le 23 juin 2021. Ils sont répertoriés dans le Tableau 5,

Tableau 5. Flux de référence pour le démonstrateur LAFARGE (exprimés par t de GBRC)

	Unité	Flux de référence
Carbonatation		
Infrastructure (sècheur)*	Unité	1,43E-05
Electricité (chargement)	kWh	0,222
Electricité (ventilation)	kWh	11
Electricité (ventilateur aspirant)	kWh	18
Electricité (moteur vibrant)	kWh	3

* Hypothèse : le carbonateur mis en œuvre par LAFARGE est similaire au carbonateur mis en place par VICAT

4.1.3 Système Neustark

A notre connaissance, il existe différents systèmes de carbonatation accélérée des GBR plus ou moins opérationnels impliquant un transport de CO₂ (et donc l'utilisation de gaz purifié/concentré). Citons par exemple le système mis en œuvre par Clamens¹. Nous ne disposons cependant pas de données détaillées et procéderont donc par hypothèse afin de dégager des ordres de grandeur. Le travail repose sur les données collectées à partir du site de l'entreprise Neustark. Le système modélisé sur cette base est schématisé à la Figure 7. N'ayant pas de données plus précises, il s'agit donc de prendre des précautions dans l'interprétation des résultats.



Figure 7. Système de carbonatation mis en œuvre par Neustark. Source : <https://www.greaterzuricharea.com/en/news/holcim-drives-forward-start-ups-innovations> ©Holcim

¹ <https://www.acpresse.fr/klamens-tester-carbonatation-forcee-betons-demolition/>

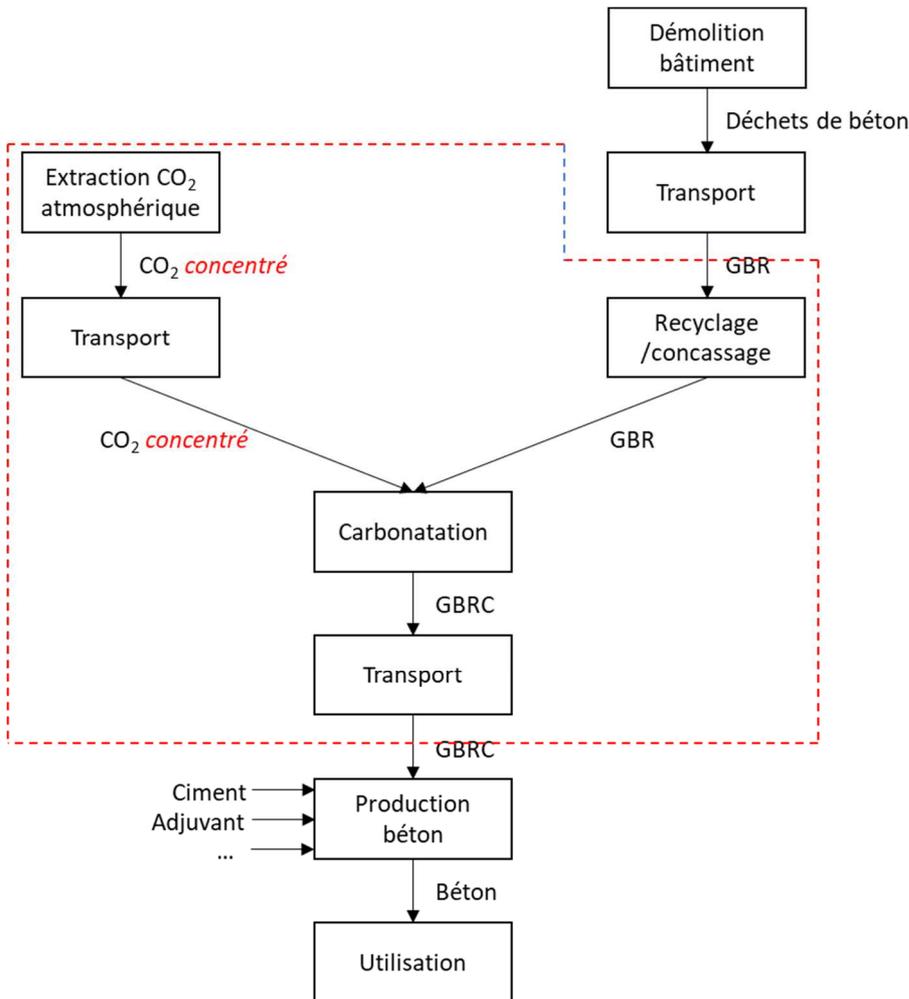


Figure 8. Modélisation du système mis en œuvre par l'entreprise Neustark, source : <https://www.neustark.com/faq>

Le système Neustark repose sur la carbonatation de GBR issus de chantiers de démolition, transportés sur une plateforme de recyclage. Les GBR sont ensuite soumis à un flux de gaz concentré en CO_2 (probablement de l'ordre de 90-100%), fourni sur site par camion roulant au bioqaz. Le CO_2 purifié/concentré est de source atmosphérique, récupéré soit par captage direct d'air (Direct Air Capture DAC), soit par procédé biogénique. Le détail de ces procédés n'est pas fourni. Neustark estime le captage de CO_2 lors de la carbonatation à 10 kg de CO_2 /t GBR, pour des émissions de l'ordre de 50kg CO_2 par tonne de CO_2 captée, soit des émissions de 0,5 kg CO_2 /t GBR. Les caractéristiques des GBR, en particulier le DMAX, ne sont cependant pas précisées. Ces émissions sont très faibles comparées à ce qui a été calculé pour les démonstrateurs VICAT et LAFARGE (respectivement 1,4 et 4,0 kg CO_2 eq/t GBR). Les limites du système considérées pour le calcul de ces émissions ne sont pas précisées (prise en compte de l'approvisionnement en CO_2 concentré, du transport de gaz et de granulat, du procédé de carbonatation...).

Compte tenu des données lacunaires disponibles pour le procédé Neustark, il n'a pas été possible de reconstituer le modèle correspondant et d'effectuer une ACV préliminaire sur le procédé. Les valeurs fournies par Neustark, en particulier les émissions de CO_2 par tonne de CO_2 captée, seront utilisés à la suite en comparaison du score de changement climatique estimé pour le scénario théorique fondé sur les données ecoinvent.

4.1.4 Système théorique avec transport de CO₂ (procédé ecoinvent)

On considère ici un système de carbonatation des granulats de béton recyclé à partir de CO₂ généré lors du procédé de production de l'ammoniac et capté par absorption chimique par monoéthanolamine (MEA).

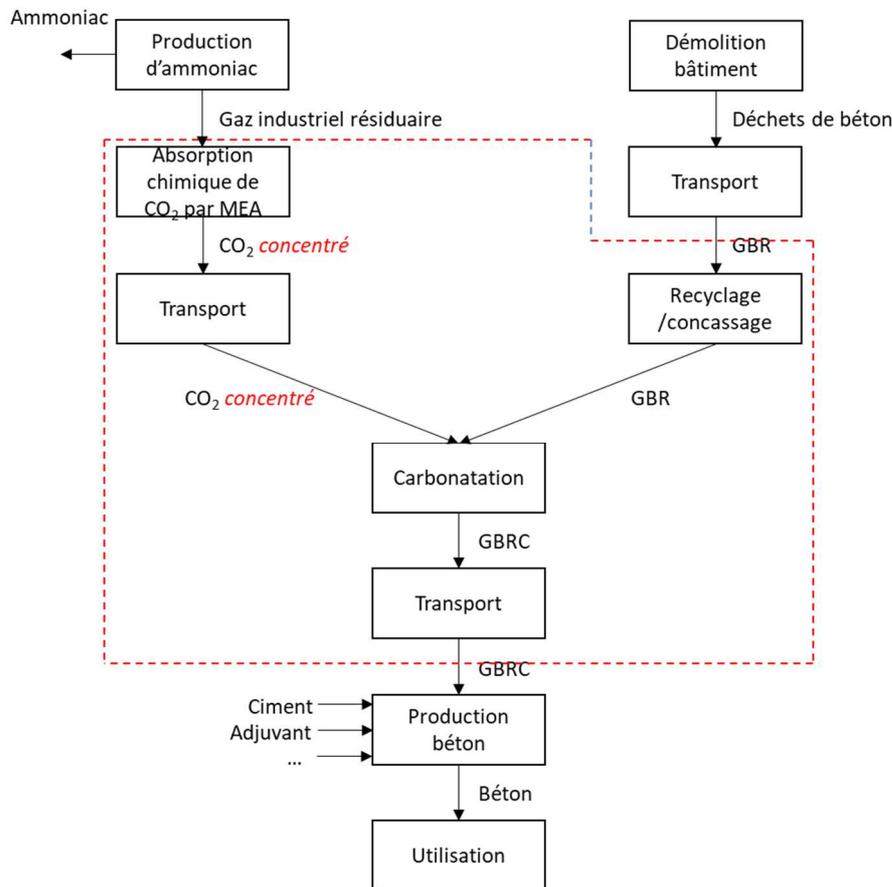


Figure 9. Modélisation du système théorique de carbonatation à partir de CO₂ concentré à partir de gaz industriel (production d'ammoniac)

ecoinvent dispose d'un procédé de production de CO₂ liquide, le procédé *carbon dioxide production, liquid | carbon dioxide, liquid | Cutoff, U* (Althaus et al 2007). Ce procédé considère l'extraction et la purification de CO₂ à partir de gaz industriels générés lors de la production d'ammoniac (Frischknecht 1999). Dans ce procédé, toutes les émissions du processus industriel sont attribuées à la production d'ammoniac. Ce point d'allocation devrait être discuté entre la filière de production de l'ammoniac et la filière de production de GBRC, voire de la filière béton, dans le cas où du CO₂ liquide capté par MEA serait stocké par carbonatation accélérée de GBR.

Un scénario théorique de carbonatation des GBR a été construit sur la base du procédé ecoinvent (Figure 10) : il comprend notamment le procédé de production de CO₂ liquide et un procédé de carbonatation. Compte tenu de l'absence de données détaillées sur le procédé de carbonatation à partir de CO₂ concentré, nous prenons les systèmes démonstrateurs de VICAT et LAFARGE comme procédés de carbonatation.

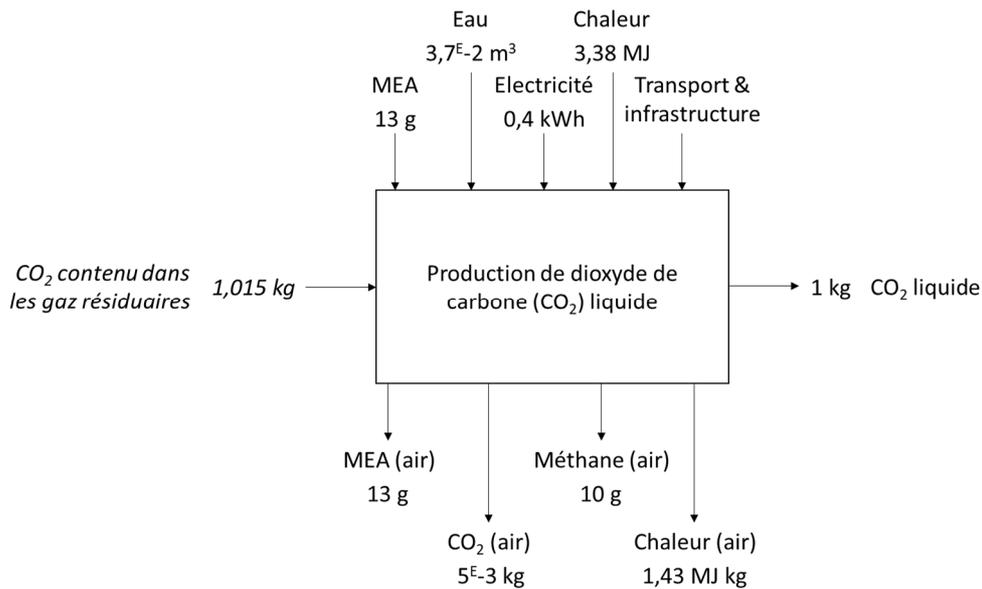


Figure 10. Modélisation du procédé de production de dioxyde de carbone liquide, selon ecoinvent. Le flux de CO₂ récupéré à partir du gaz généré lors de la production d'ammoniac n'est pas considéré.

4.2 Comparaison des systèmes de carbonatation

4.2.1 Démonstrateurs VICAT et LAFARGE

A la suite sont présentés les résultats de la comparaison des impacts environnementaux des démonstrateurs VICAT et LAFARGE, impliquant le transport des GBR vers la source de CO₂, ici une cimenterie.

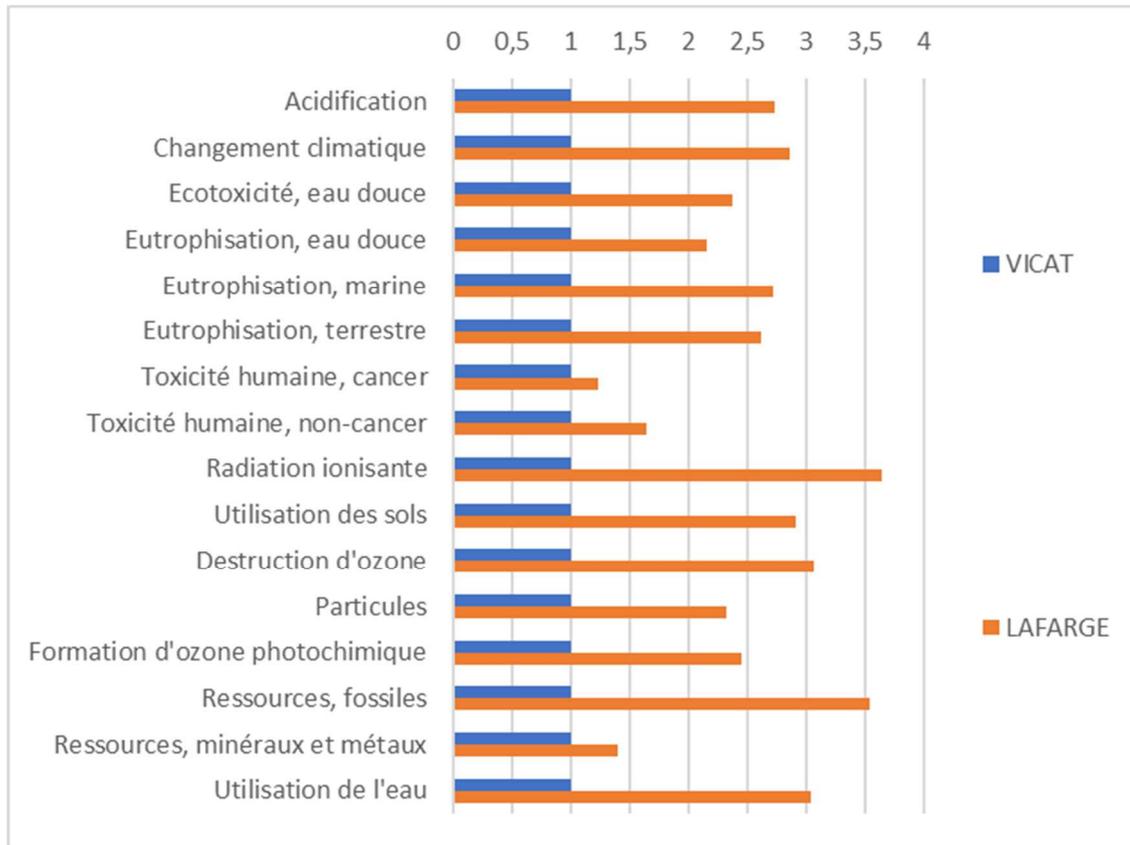


Figure 11. Comparaison des scores relatifs pour les démonstrateurs VICAT et LAFARGE (impacts environnementaux des procédés de carbonatation uniquement, i.e. sans prise en compte des transports et du captage de CO₂, pour une t de GBRC). Méthode d'évaluation de l'impact : EN 15804+A2

Sur la base d'une tonne de GBRC, et en ne considérant pas les transports et le captage de CO₂, il apparaît que le démonstrateur mis en place par VICAT génère des impacts plus faibles que le démonstrateur mis en œuvre par LAFARGE. Par exemple, pour le changement climatique, la carbonatation d'1 tonne de GBR émet 1,4 kg CO₂eq pour le procédé VICAT contre 4,0 kg CO₂eq pour le procédé LAFARGE. Ceci s'explique, d'une part, du fait d'une plus grande consommation d'électricité du démonstrateur de Val d'Azergues (32 kWh contre 9 kWh pour le démonstrateur de Créchy), et d'autre part d'un rendement en t GBRC plus faible. Le démonstrateur sur site de Créchy présente un rendement de 1,5 t/h contre 1 t/h sur site de Val d'Azergues. Puisqu'il s'agit de démonstrateurs, il faudrait estimer les augmentations possibles de capacité de carbonatation par heure.

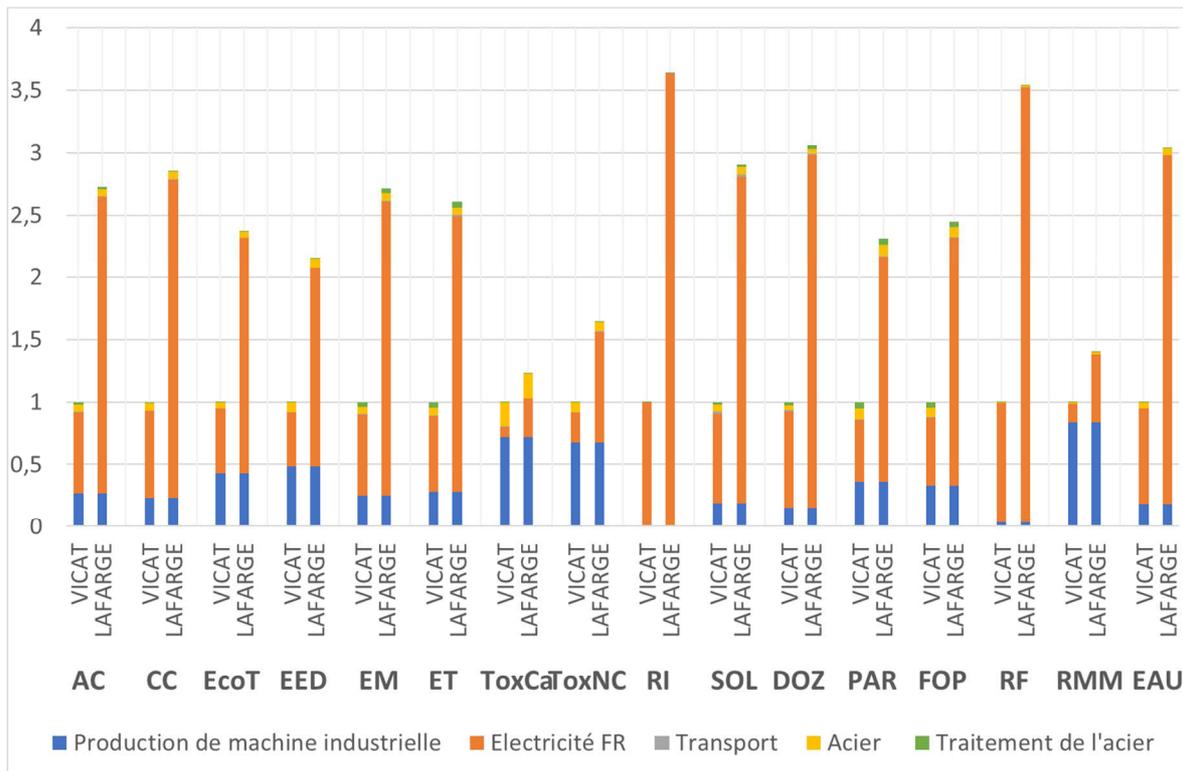


Figure 12. Comparaison des scores relatifs pour les démonstrateurs VICAT et LAFARGE (procédés de carbonatation uniquement, pour une t de GBRC) – détails ; AC : acidification ; CC : changement climatique ; EcoT : écotoxicité, eau douce ; EED : eutrophisation, eau douce ; EM : eutrophisation, marine ; ET : eutrophisation, terrestre ; ToxCa : toxicité humaine, cancer ; ToxNC : toxicité humaine, non-cancer ; RI : radiation ionisante ; SOL : utilisation des sols ; DOZ : destruction d'ozone ; PAR : particules ; FOP : formation d'ozone photochimique ; RF : ressources, fossiles ; RMM : ressources, minéraux et métaux ; EAU : utilisation de l'eau. Méthode d'évaluation de l'impact : EN 15804+A2

La figure 13 montre la réduction théorique des scores de changement climatique en fonction de l'augmentation de capacité de carbonatation horaire, en faisant l'hypothèse que les systèmes de carbonatation actuels n'ont pas besoin d'être modifiés (puissance installée etc).

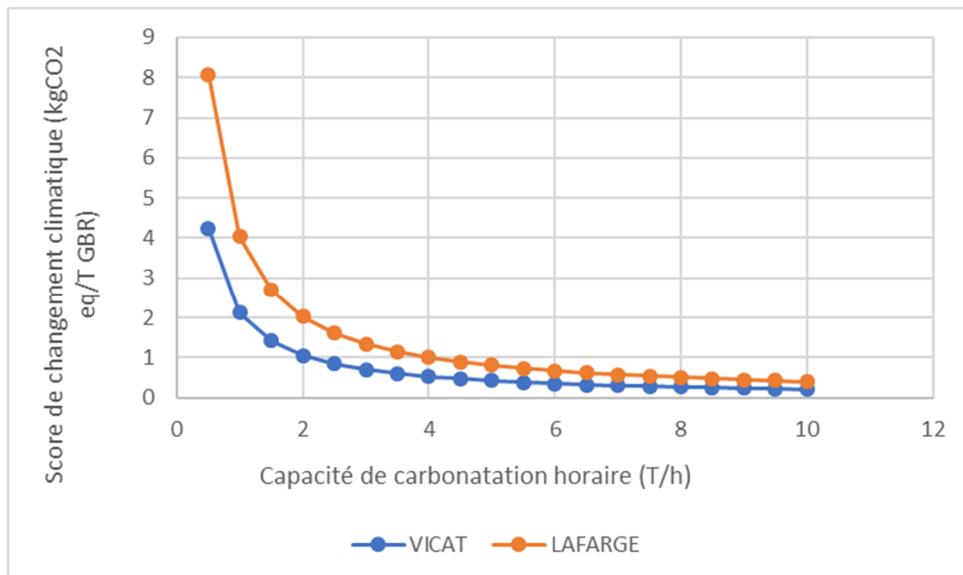


Figure 13. Comparaison des scores relatifs pour les démonstrateurs VICAT et LAFARGE (procédés de carbonatation uniquement, pour une t de GBR) - détails

4.2.2 Systèmes impliquant le transport de CO₂ vers la source de GBR

Une évaluation portant uniquement sur le procédé ecoinvent de production de CO₂ liquide donne les résultats présentés au Tableau 6. Le procédé de production de CO₂ liquide par MEA présente un score d'impact sur le changement climatique de 0,829 kg CO₂/kg CO₂ capté, soit 829 kgCO₂/t CO₂ capté, très largement supérieur aux 50 kgCO₂ émis par t CO₂ capté estimés par Neustark pour leur procédé de carbonatation.

Tableau 6. Scores d'impact par kg de CO₂ liquide produit (procédé ecoinvent)

Impact category	Reference unit	Result
Acidification	mol H+ eq	0,0019
Climate change	kg CO ₂ eq	0,828882
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	8,490734
Eutrophication, freshwater	kg P eq	0,000248
Eutrophication, marine	kg N eq	0,000462
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	0,003525
Human toxicity, cancer	CTUh	4,49E-10
Human toxicity, non-cancer	CTUh	2,85E-08
Ionising radiation	kBq U-235 eq	0,106129
Land use	Pt	1,595966
Ozone depletion	kg CFC11 eq	3,75E-08
Particulate matter	disease inc.	1,07E-08
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	0,001079
Resource use, fossils	MJ	7,746927
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,4E-05
Water use	m3 depriv.	0,241418

Source : ecoinvent, méthode d'évaluation EN 15804+A2

Pour tenter de comparer les deux procédés de carbonatation, le score de changement climatique a été calculé pour chacun d'entre eux :

- en faisant l'hypothèse, pour le procédé Neustark, que les 50 kgCO₂ eq/t CO₂ capté sont estimés pour un système comprenant le captage, la purification et la concentration de CO₂ ; le recyclage des granulats ; le procédé de carbonatation sur plateforme de recyclage des granulats ;
- en considérant, pour le scénario théorique ecoinvent, le procédé de production de CO₂ liquide, le recyclage de granulats (Mousavi et al. 2020) et deux procédés de carbonatation correspondant aux démonstrateurs VICAT et LAFARGE ;
- en considérant des distances de transport pour l'approvisionnement en CO₂ et en GBRC équivalent, permettant d'exclure le transport de l'analyse à ce stade.

Nous prenons également des hypothèses en matière de taux de captage du CO₂ (entre 5 et 50 kgCO₂/tGBR) et de taux de perte, allant de 0% à 20% de CO₂ lors du procédé de carbonatation (Figure 13).

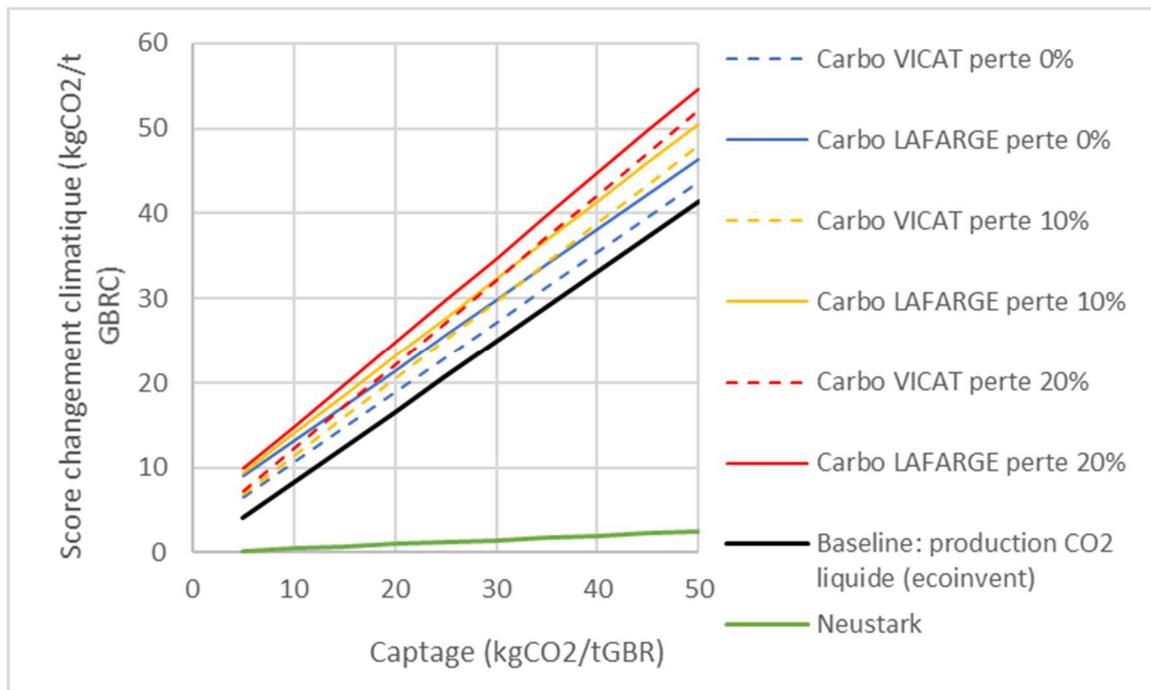


Figure 14. Scores d'impact sur le changement climatique pour différents scénarios théoriques de carbonatation des GBR à partir de CO₂ liquide obtenu par MEA (ecoinvent), pour différents taux de captage et taux de perte de CO₂, sans prise en compte du transport et du captage de CO₂, comparé au procédé Neustark.

Sur la base de cette analyse, il apparaît que les scores de changement climatique estimés diffèrent très fortement entre le scénario Neustark et les scénarios théoriques basés sur le procédé de production de CO₂ liquide ecoinvent. Pour un taux de captage de 30 kgCO₂/tGBR, le score de changement climatique est estimé à 1,5 kgCO₂eq/tGBRC pour Neustark, et est compris entre 27 et 35 kgCO₂eq/tGBRC pour le scénario théorique. Sans information supplémentaire sur le procédé Neustark, il est difficile d'expliquer une telle différence. Rappelons également les très fortes incertitudes sur le procédé ecoinvent.

Il apparaît ainsi différents paramètres clés influant sur les performances environnementales des scénarios de carbonatation à partir de CO₂ capté et concentré :

- le choix du procédé de récupération/concentration/purification de CO₂
- le taux de perte de CO₂ lors du procédé de carbonatation (ou l'efficacité du procédé en termes de captage de CO₂)
- le système de carbonatation mis en œuvre (dépendant lui-même de différents paramètres, voir à la suite)

4.2.3 Comparaison des systèmes de carbonatation avec transport de GBR et transport de CO₂

L'objectif de cette partie est de regarder l'intérêt des différents systèmes de carbonatation au regard du transport de GBR, GBRC et CO₂. L'unité fonctionnelle reste la tonne de GBRC. Les limites du système incluent :

- le transport de déchet de béton jusqu'à la plateforme de recyclage,
- le transport des GBR jusqu'au site de carbonatation dans le cadre des scénarios à source de CO₂ fixe (VICAT et LAFARGE),
- le transport de CO₂ jusqu'à la plateforme de recyclage pour le scénario théorique ecoinvent

- le transport des GBRC entre site de carbonatation et site d'utilisation

Les hypothèses de distance de transport sont données au Tableau 7. Pour le système de carbonatation théorique, on fait l'hypothèse d'un taux de captage de CO₂ de 30 kg/t GBR, d'un taux de perte de 10%, et d'un procédé de carbonatation semblable au procédé mis en place par LAFARGE.

Tableau 7. Hypothèses de distances de transport pour les scénarios de carbonatation des GBR

Scénario		Distance min	Distance max
VICAT	Transport de GBR et GBRC	35	275
LAFARGE	Transport de GBR et GBRC	35	275
ecoinvent	Transport de CO ₂	50	300
	Transport de GBR et GBRC	20	100

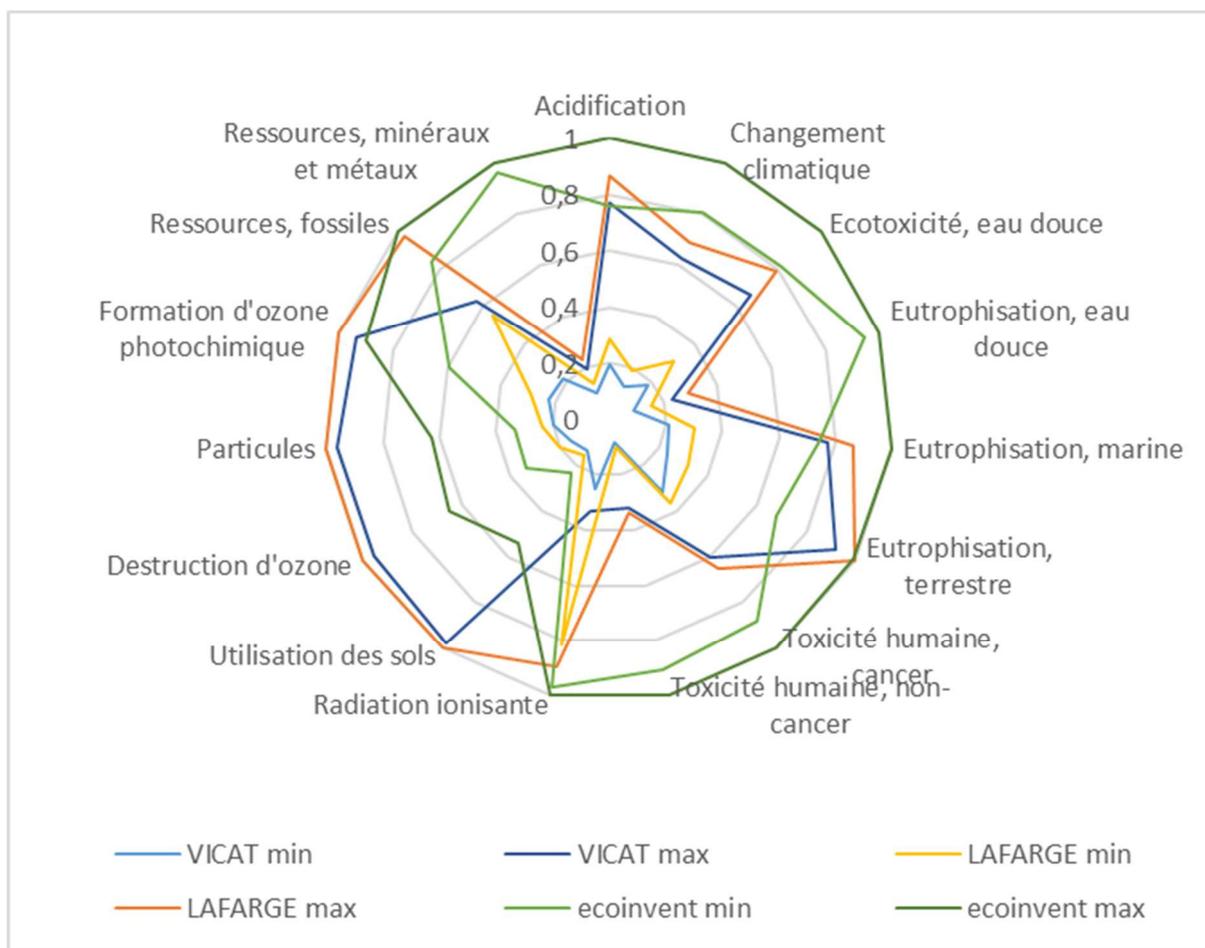


Figure 15. Scores d'impact pour les trois scénarios de carbonatation des GBR : système VICAT, système LAFARGE et système théorique à partir de CO₂ liquide obtenu par MEA (ecoinvent), sans prise en compte du captage de CO₂.

L'évaluation environnementale montre que les scénarios de carbonatation avec transport du CO₂ permettent de réduire les impacts liés au transport, du fait des masses transportées beaucoup plus faibles. Mais ces scénarios peuvent potentiellement entraîner une augmentation des impacts liés au procédé de production de CO₂ liquide (Figure 15 et Figure 16). C'est le cas des catégories changement climatique ou toxicité humaine (non cancérigène).

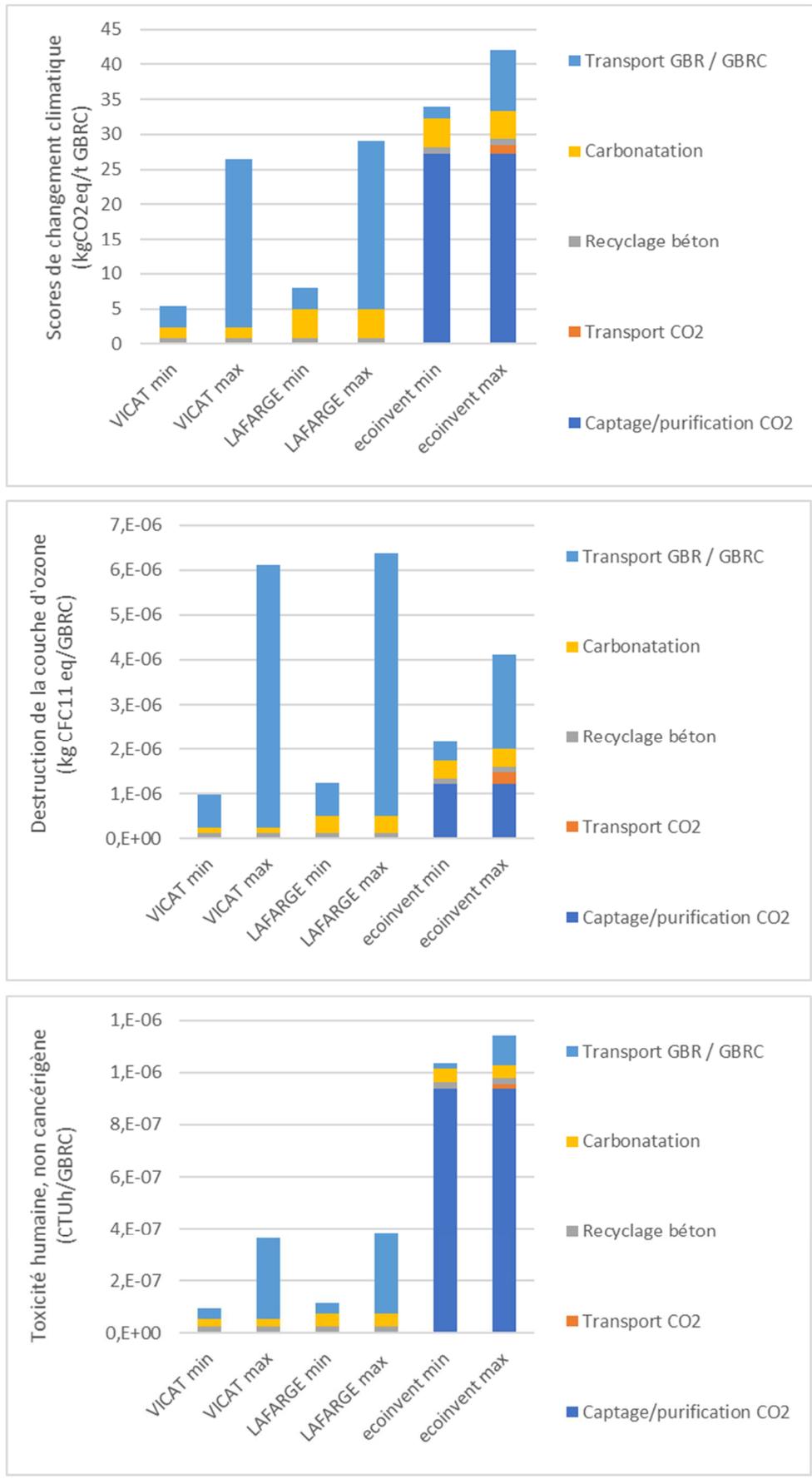


Figure 16. Répartition des scores d'impact sur le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone et pour les trois scénarios de carbonatation des GBR (VICAT, LAFARGE et système théorique à partir de CO₂ liquide obtenu par MEA (ecoinvent), sans prise en compte du captage de CO₂.

En considérant les différents taux de captage de CO₂ (Figure 17), présentés de manière désagrégée des scores d'impact, il apparaît toujours que la carbonatation de la fraction fine (0-4 mm) est plus intéressante que la fraction grossière (4-16 mm) en matière de score de changement climatique puisque la quantité captée, pour les deux scénarios, reste supérieure à la quantité émise avec des hypothèses de transport défavorables (transport maximum sur 275 km en camion diesel). Pour le scénario théorique proposé (30 kgCO₂ capté par t GBR avec 10% de perte), le CO₂ capté ne compense pas les émissions de GES pour l'ensemble du système. Encore une fois, rappelons que ce scénario repose sur des hypothèses grossières et des données très incertaines pour ce qui est de la production de CO₂ liquide.

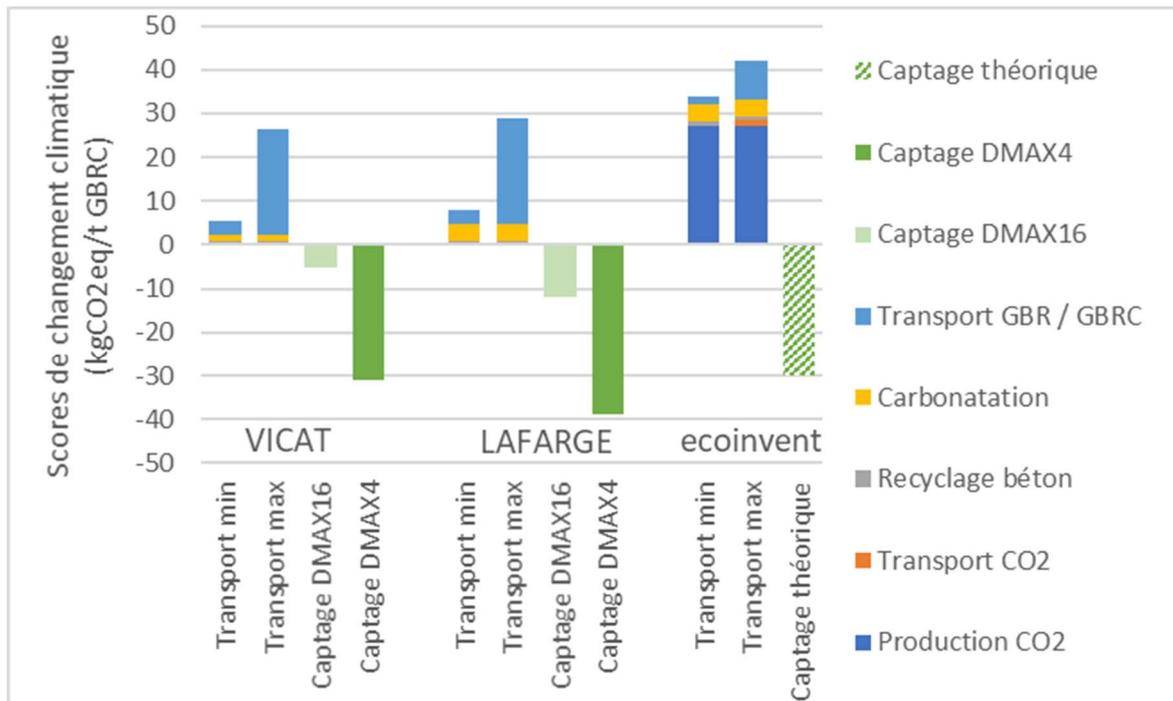


Figure 17. Répartition des scores d'impact sur le changement climatique

4.2.4 Etude de sensibilité

Compte tenu des résultats précédents (importance du transport des granulats et de la consommation électrique pour le procédé LAFARGE), des études de sensibilité ont été effectuées et portent sur :

- Les modes de transport :
 - Transport fluvial
 - Autre type de carburant (biodiesel)
- Les mix électriques

Notons qu'actuellement dans la base de données ecoinvent nous n'avons pas de données relatives au camion électrique.

4.1.1.1 Modes de transport :

Nous comparons différents modes de transport sur la base d'1 t.km, disponibles dans la base de données ecoinvent, à savoir le transport par camion diesel > 32t, par camion 28t roulant au biodiesel, et par barge. Le double-flux et le taux de charge des véhicules ne sont pas considérés à ce stade.

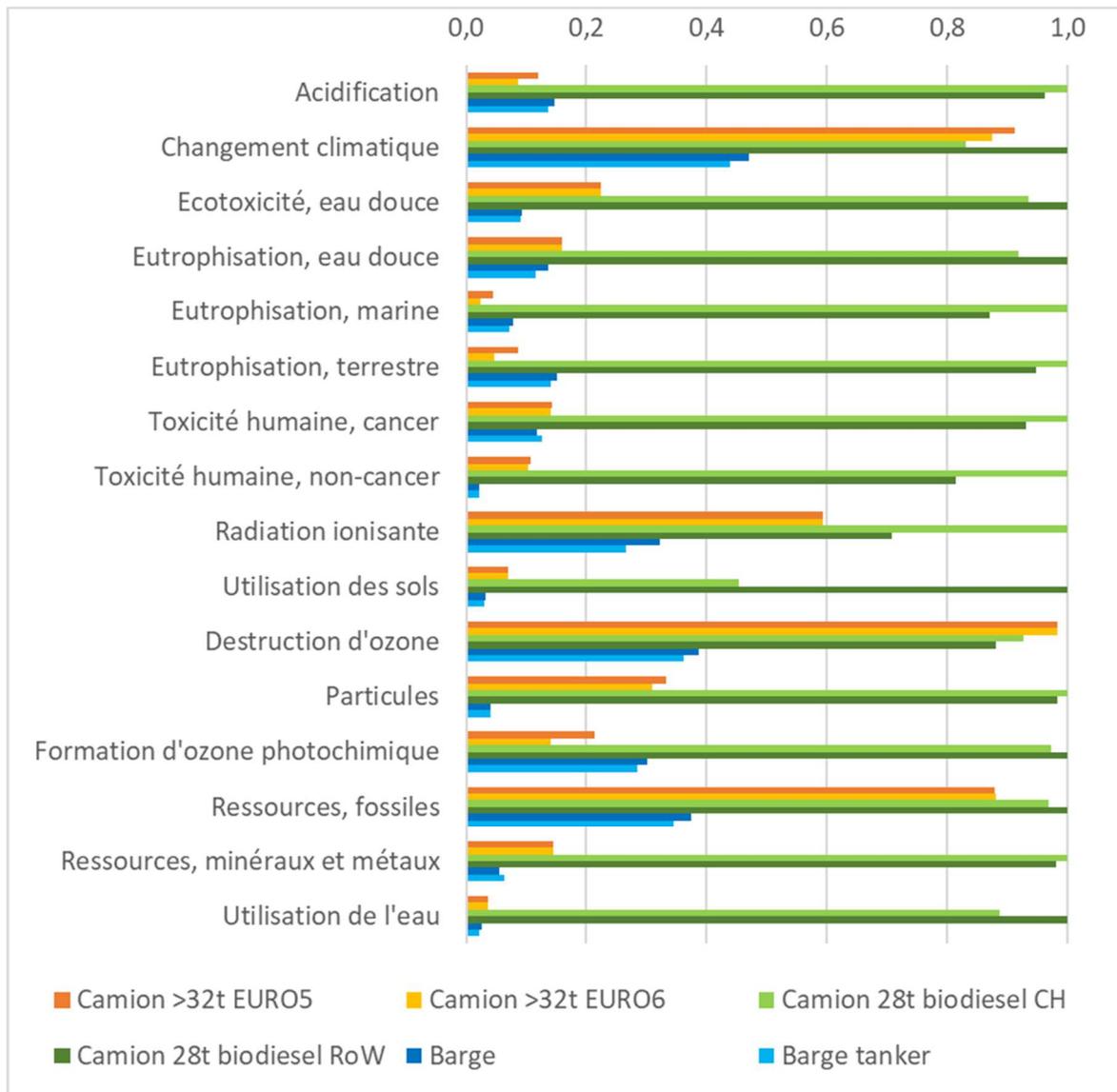


Figure 18. Comparaison des scores d'impact relatifs par t.km pour différents modes de transport de fret. Source : ecoinvent

Le procédé ecoinvent pour le véhicule roulant au biodiesel correspond à un camion de 28t roulant avec de l'ester méthylique d'huile végétale, produit par estérification d'huile de colza. Il prend en compte le captage de CO₂ biogénique par photosynthèse et son émission par combustion lors de l'étape d'utilisation du véhicule. Les émissions de carbone fossile proviennent du procédé d'estérification, des différents procédés de production du colza (labour...) et de fabrication de certains produits utilisés dans des procédés amont (ammoniac et acide nitrique, probablement pour les engrais).

Par t.km, les scores d'impact pour un camion 28t roulant au biodiesel sont largement supérieurs aux scores d'impact d'un camion 32t roulant au diesel ou une barge, pour une majorité de catégories d'impact (acidification, écotoxicité, eutrophisation, toxicité humaine, occupation du territoire, formation de particules, formation d'ozone photochimique, utilisation de ressources minérales et de métaux, utilisation de l'eau). Le transport à partir de biodiesel permet une légère amélioration du score de changement climatique en condition suisse par rapport à un véhicule roulant au diesel, mais augmente les émissions de CO₂eq de 10% selon les données fournies pour le reste du monde (camion 28t biodiesel RoW). Les scores d'impact sur la diminution de la couche d'ozone sont 10% inférieurs pour les véhicules roulant au biodiesel par rapport aux véhicules roulant au diesel, ce qui correspond à la marge d'incertitude.

Le transport fluvial est intéressant par t.km puisqu'il réduit les scores d'impact sur le changement climatique de moitié au minimum par rapport à du transport en camion (diesel ou biodiesel). Il est également intéressant sur d'autres catégories d'impact telles que l'écotoxicité, les radiations ionisantes, la destruction d'ozone, les effets des particules et la diminution des ressources. Il est par contre moins favorable pour certaines catégories d'impact comme l'eutrophisation (marine/terrestre) ou la formation d'ozone photochimique.

Cette analyse rapide met en évidence l'intérêt limité du biodiesel pour le transport de matériaux, contrairement au transport fluvial généralement plus performant que le transport routier. Or le raisonnement est effectué sur la base de la t.km. Il serait intéressant de comparer des variantes de transport réalistes en spécifiant les distances transportées selon les différents modes, dans une démarche combinant métabolisme territorial et ACV.

4.1.1.2 Mix électriques

Assez classiquement, une analyse de sensibilité est effectuée sur le procédé de carbonatation mis en œuvre par LAFARGE, en modifiant le mix électrique (Figure 19).

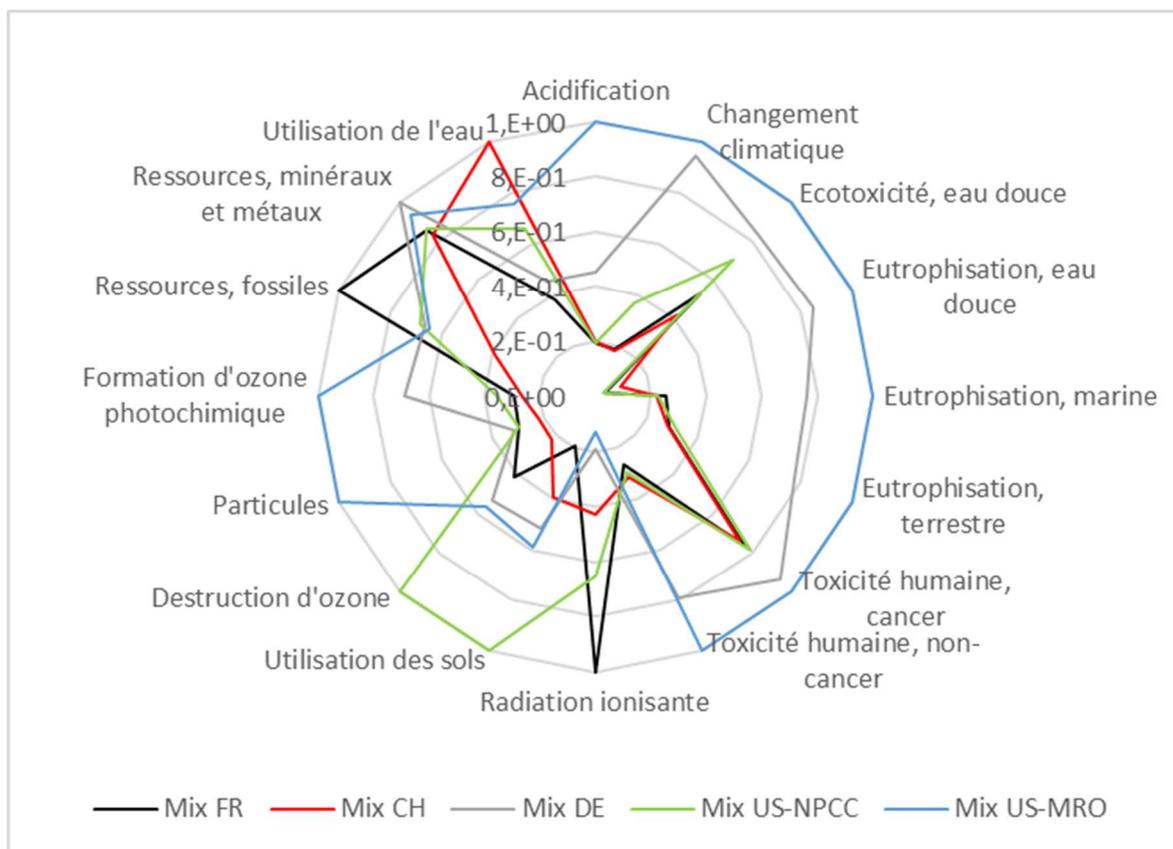


Figure 19. Comparaison des scores d'impact relatifs pour le démonstrateur LAFARGE, en considérant différents mix électriques (FR : France ; CH : Suisse ; DE : Allemagne ; US-NPCC : Etats-Unis, Northeast Power Coordinating Council ; US-MRO : Etats-Unis, Midwest Reliability Organization)

Le choix du mix électrique influe fortement sur les scores d'impact. Du fait de la part importante de nucléaire dans le mix français, le scénario FR est généralement performant sur le changement climatique, mais moins performant sur les catégories radiations ionisantes et l'utilisation de ressources fossiles (voir Figure 20 et annexe). Il apparaît que l'impact de la carbonatation augmente très fortement lorsque le mix électrique utilisé est peu décarboné (à 20,7 kgCO₂eq/t GBRC avec le mix électrique allemand, et à 21,9 kgCO₂eq/t GBRC avec le mix électrique US-MRO). Pour ces deux mix, et en considérant des hypothèses de transport défavorables, les émissions de GES ne sont pas compensées par captage, que ce soit par la fraction DMAX16 ou DMAX4.

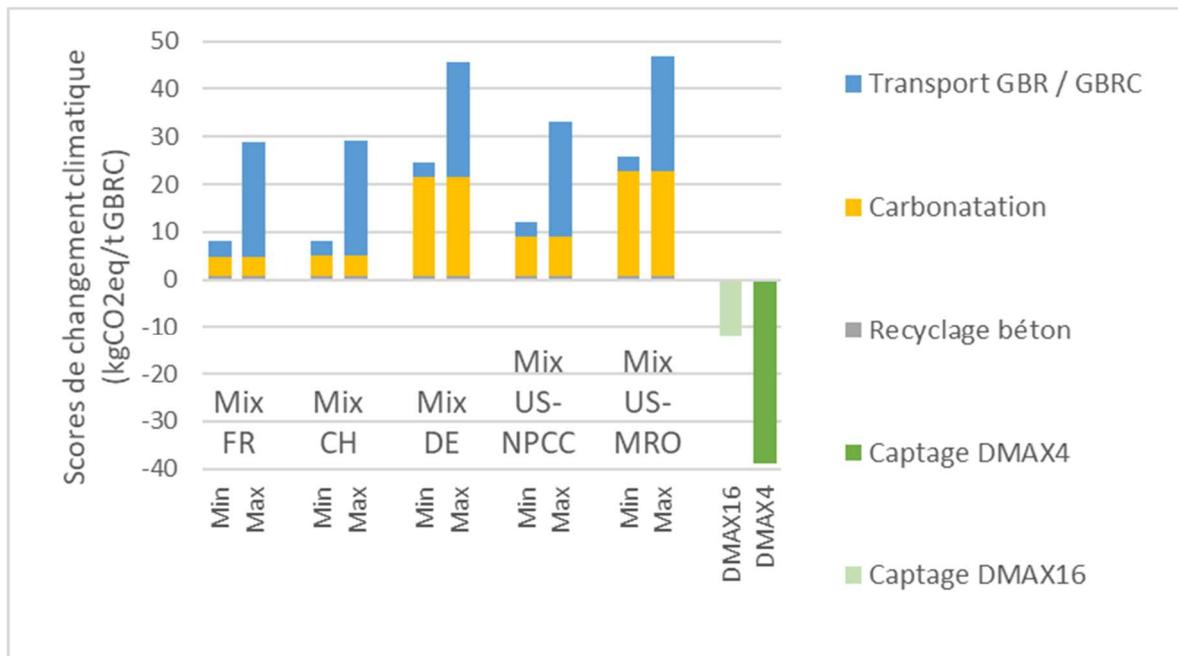


Figure 20. Comparaison des scores d'impact sur le changement climatique pour le démonstrateur LAFARGE, en considérant différents mix électriques (FR : France ; CH : Suisse ; DE : Allemagne ; US-NPCC : Etats-Unis, Northeast Power Coordinating Council ; US-MRO : Etats-Unis, Midwest Reliability Organization)

4.4 Conclusion

Sur la base d'une part des démonstrateurs mis en œuvre par VICAT et LAFARGE, et d'autre part des hypothèses prises pour le système Neustark et un scénario théorique, il apparaît que les performances environnementales dépendent d'un certain nombre de paramètres clés, influençant d'une part le taux de captage (type de matériau carbonaté, conditions de carbonatation : température et humidité), et d'autre part les impacts environnementaux (distances transportées, types de transport, capacité de carbonatation horaire, consommation électrique du système de carbonatation, mix électriques, taux de perte de CO₂ lorsqu'il est produit).

Compte tenu du caractère pilote des systèmes ayant fourni les données, les résultats doivent être interprétés avec précaution pour intégrer l'effet prototype. D'autre part, pour les systèmes de carbonatation à partir de CO₂ purifié et transporté (Neustark et système théorique fondé sur l'unique procédé existant dans ecoinvent de production de CO₂), les données sont lacunaires puisque nous n'avons pas eu accès aux informations sur les technologies concernées. Une prise de contact avec Neustark serait intéressante pour approfondir ce point. D'autre part, il n'existe à ce jour pas d'étude détaillée et exhaustive publiée sur les différents systèmes de captage de CO₂ atmosphérique ou industriel pouvant approvisionner un éventuel procédé de carbonatation des GBR. A l'exception du procédé ecoinvent de production de CO₂ liquide, reposant sur le procédé d'absorption chimique par monoéthanolamine (MEA), et qualifié par les personnes ayant compilé les informations d'approximation, il n'existe pas de procédé satisfaisant. Dans ce sens, il serait intéressant, d'une part d'approfondir la littérature scientifique sur le sujet (von der Assen et al 2016 ; Deutz et al 2021 ; de Jonge et al 2019 ; Deutz & Bardow 2021 ; Terlouw et al submitted) de se rapprocher d'AirLiquide afin de modéliser leur(s) procédé(s) de production de CO₂ (par exemple, Cryocap™).

5 Comparaison de différents scénarios d'approvisionnement en granulats (graviers ou sable)

Sur la base des systèmes de carbonatation évalués à la section 4, différents scénarios d'approvisionnement de granulats sont examinés à la suite. Les scénarios portent sur le type de granulats et sur les distances de transport considérées. Le système de carbonatation pris en compte ne concerne que les systèmes reposant sur le transport de granulats, les systèmes de transport du CO₂ étant trop incertains par manque de données.

5.1 Définition des objectifs et du système

L'unité fonctionnelle (UF) choisie est la suivante : 1 t de granulats (GN, SN, GBR ou GBRC) mis à disposition pour être utilisé (par exemple sur site de centrale à béton...). Le système comprend :

- l'extraction des matériaux naturels et leur transport jusqu'au site d'utilisation (GN et SN)
- le transport de déchet de béton jusqu'à la plateforme de recyclage,
- le transport des GBR jusqu'au site de carbonatation dans le cadre des scénarios à source de CO₂ fixe (VICAT et LAFARGE),
- le transport de CO₂ jusqu'à la plateforme de recyclage pour le scénario théorique ecoinvent
- le transport des GBRC entre site de carbonatation et site d'utilisation

Les scénarios définis sont décrits au Tableau 8, précisant les distances totales parcourues (définis en cohérence avec Bougrain et Doutreleau 2021). Les différences de qualité ne sont pas prises en compte.

Tableau 8. Scénarios d'approvisionnement de différents types de granulats

Scénario		Distance min	Distance max
GN	Granulat naturel issu de carrière	5	30
SN	Sable naturel, issu de carrière	5	30
GBR	Granulat de béton recyclé	20	100
GBRC	Granulat de béton recyclé carbonaté, faction 0-4 mm	35	275

Les procédés de mise à disposition des GN, des SN et les GBR ont été construits sur la base des procédés de production de GN, SN et GBR, provenant de la base de données ecoinvent (adaptés au contexte français, voir Mousavi et al 2020). Les modules d'information environnementale fournis par l'UNPG (2017a, b, c) ne sont pas utilisés car ne fournissent pas l'information nécessaire pour modéliser les scénarios dans OpenLCA (flux de référence ou inventaire des émissions et des extractions ICV). Le procédé de mise à disposition des GBRC provient du travail présenté au chapitre 4.

5.2 Résultats

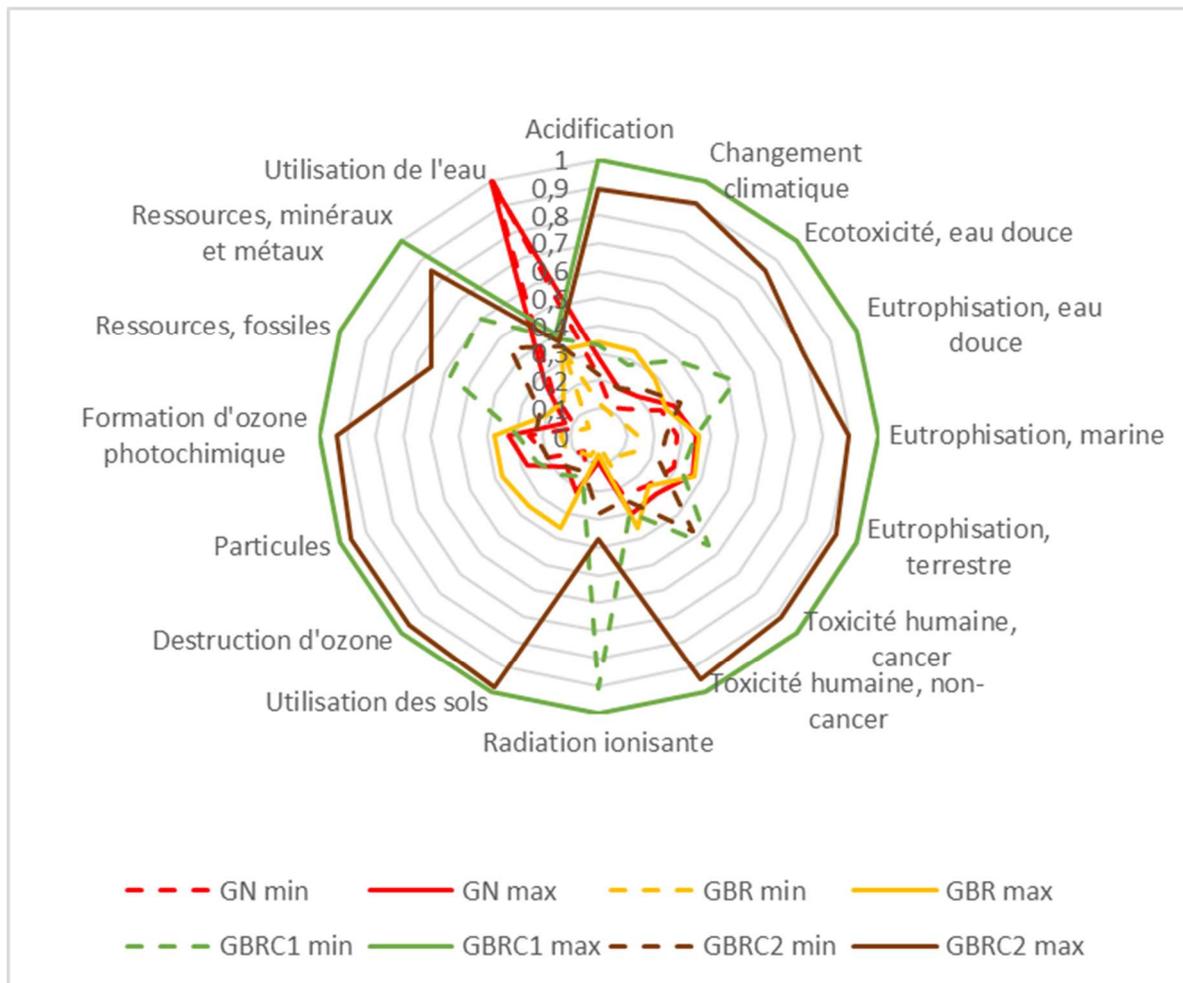
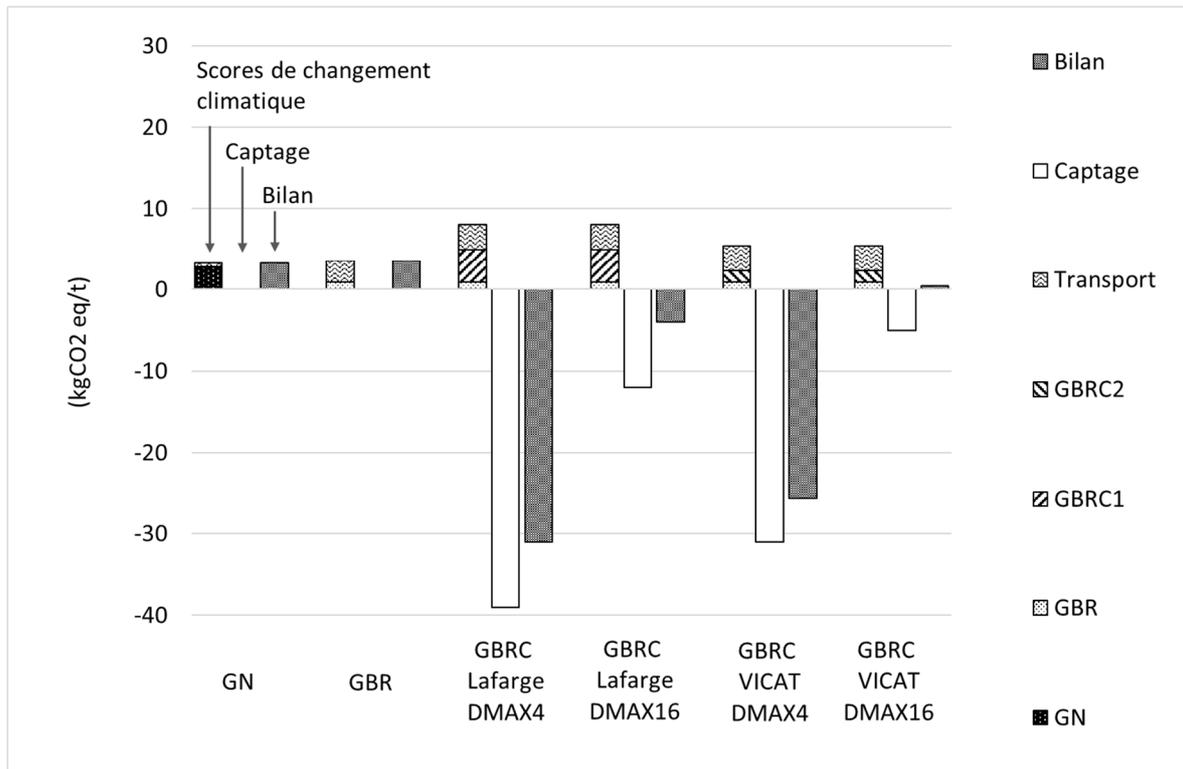


Figure 21. Comparaison des impacts pour différents scénarios d'approvisionnement en granulats, sans prise en compte du captage de CO₂. Scores relatifs pour les indicateurs de la norme EN 15804+A2. GBRC1 correspond aux granulats carbonatés à partir du système de Lafarge. GBRC2 correspond aux granulats carbonatés à partir du système de VICAT.

De manière générale, les scénarios d'approvisionnement en GBRC présentent les impacts les plus importants lorsque les distances de transport sont maximales par camion (Figure 21). Le scénario GBRC1 présente les scores d'impact les plus importants dans la catégorie « radiation ionisante », quelle que soit la distance parcourue, du fait d'une consommation électrique importante du procédé de carbonatation, alimenté par le mix électrique français, décarboné mais basé sur l'énergie nucléaire.

Les scénarios d'approvisionnement en GN ont généralement des impacts plus faibles, pour la plupart des catégories environnementales, à l'exception de l'utilisation des ressources en eau. Cela s'explique en partie par les plus faibles distances transportées (Figure 22).

Transport : distance minimum



Transport : distance maximum

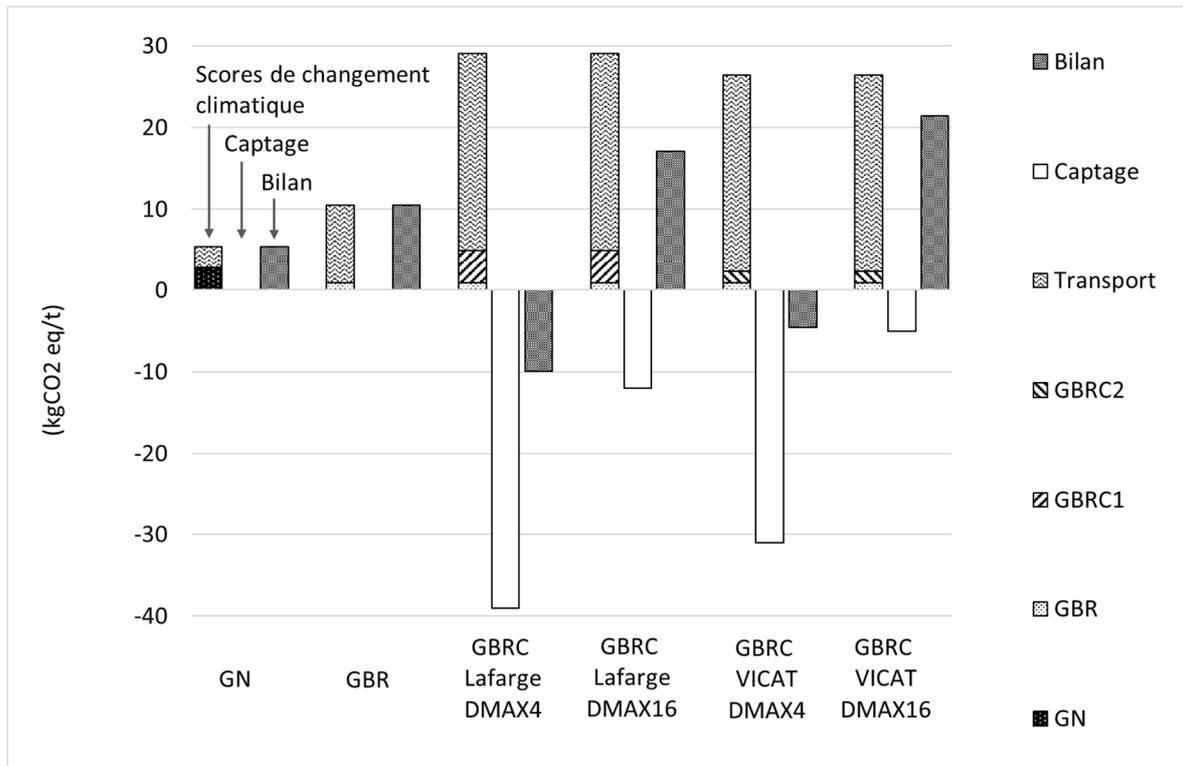


Figure 22. Comparaison des scores de changement climatique pour différents types de granulat, transportés sur des distances minimum et maximum.

6 ACV de différentes options d'utilisation de GrBRC et de SBRC

Cette partie porte sur l'évaluation de différents scénarios d'utilisation des GBRC. Ici nous distinguons entre les GrBRC, graviers de béton recyclés carbonatés (fraction 4-16 mm) et SBRC, sables de béton recyclés carbonatés (fraction 0-4 mm).

6.1 Alternatives à considérer

Sur la base de l'évaluation préliminaire, après discussion avec l'équipe du CSTB en charge de l'analyse économique et du retour des partenaires du PN FastCarb, plusieurs alternatives sont envisageables en fonction d'hypothèses sur :

- le type de granulats :
 - Granulats naturels GN
 - Granulats de béton recyclés non carbonatés GBR
 - Granulats de béton recyclés carbonatés GBRC
- le système de carbonatation impliquant :
 - le transport de granulats recyclés (démonstrateurs VICAT et Lafarge Holcim)
 - le transport de CO₂ (démonstrateur Clamens ou système Neustark)
- le type de valorisation des granulats :
 - Béton dans le béton
 - Eléments préfabriqués
 - Sous-couche routière

Concernant les types de valorisation, seule la fabrication de béton à partir de matériaux carbonatés est détaillée à la suite. La valorisation de ces matériaux en préfabrication et en sous-couche routière devrait faire l'objet d'études complémentaires. Les systèmes de carbonatation considérés sont les démonstrateurs VICAT et LAFARGE, compte tenu des données lacunaires et des incertitudes fortes sur les procédés de carbonatation à partir de CO₂ transporté.

6.2 Valorisation des GBRC dans le béton

6.2.1 Définition des objectifs et du système

Objectifs

Dans cette partie, il s'agira d'effectuer une évaluation environnementale de la production de béton à partir de GrBRC et SBRC. Elle se base sur des scénarios de formulations de béton testées dans le cadre du GT2.2.1, et fournie par Laurent Poulizac (CEMEX).

Fonction du système et unité fonctionnelle

La fonction principale du système étudié est de produire du béton de qualité équivalente. L'unité fonctionnelle (UF) choisie est la suivante : **1 m³ de béton de classe de résistance équivalente produit à partir de granulats de béton recyclé carbonaté (GrBRC et SBRC)**. L'UF est précisée pour les scénarios présentés à la suite.

Scénarios

Les scénarios étudiés correspondent aux bétons dont les formulations sont testées dans le cadre de GT2.2.1, décrites ci-dessous et récapitulées au

Tableau 9:

- 7 bétons C25/30 pour une résistance de 33-38 MPa à 28 jours :
 - B1 : formule de référence avec uniquement du sable et du gravillon naturel ;
 - B2, B3 et B4 : trio de formules avec substitution de GR, GRC Vicat et GRC Lafarge, à 20% pour le sable, 50% pour le gravillon ;
 - B5, B6 et B7 : trio de formule avec substitution de 40% de sable et 100% de gravillon recyclé ou recyclé carbonaté.
- 7 bétons haute performance C45/55, pour une résistance de 53-60 MPa à 28 jours, avec uniquement de la substitution sur les gravillons. Il n'y a pas de substitution de sable naturel, du fait du coefficient d'absorption trop élevé pour le sable carbonaté :
 - B8 : formule de référence avec du sable et du gravillon naturel ;
 - B9, B10 et B11 : trio de formules avec substitution de GR, GRC Vicat et GRC Lafarge, à 50% de gravillon ;
 - B12, B13 et B14 : trio de formule avec 100% de gravillon recyclé ou recyclé carbonaté.

Les formulations n'ont pas été testées dans Recybéton. Pour les bétons de résistance équivalente (respectivement C25/30 et C45/55), elles présentent un rapport E/C équivalent, et un type d'adjuvantation équivalent. En matière d'intrants, les quantités de CEM II et d'eau ne varient pas. L'adjuvantation est ajustée en fonction de la réaction des granulats. Les granulats recyclés absorbant plus d'eau, une adjuvantation supplémentaire est nécessaire pour les formulations contenant plus de GR et GRC. La modification du squelette granulaire impliquée par les différentes formulations ne change a priori pas le type d'usage pour les scénarios de résistance équivalente.

Tableau 9. Scénarios de bétons C25/30 et C45/55 avec différentes substitutions de sable naturel et de gravillon

Nom	Formulation	SN	SBR	SBRC1	SBRC2	GrN	GrBR	GrBRC1	GrBRC2
B1	C25/30 Snc/0-Gnc/0	100				100			
B2	C25/30 Snc/20-Gnc/50	80	20			50	50		
B3	C25/30 Sc1/20-Gc1/50	80		20		50		50	
B4	C25/30 Sc2/20-Gc2/50	80			20	50			50
B5	C25/30 Snc/40-Gnc/100	60	40				100		
B6	C25/30 Sc1/40-Gc1/100	60		40				100	
B7	C25/30 Sc2/40-Gc2/100	60			40				100
B8	C45/55 Snc/0-Gnc/0	100				100			
B9	C45/55 Snc/0-Gnc/50	100				50	50		
B10	C45/55 Snc/0-Gc1/50	100				50		50	
B11	C45/55 Snc/0-Gc2/50	100				50			50
B12	C45/55 Snc/0-Gnc/100	100					100		
B13	C45/55 Snc/0-Gc1/100	100						100	
B14	C45/55 Snc/0-Gc2/100	100							100

Source : données du GT2.2.1 PN FastCarb fournies par L. Poulizac (CEMEX). Les SBRC1 et GrBRC1 proviennent du démonstrateur de Lafarge ; les SBRC2 et GrBRC2 proviennent de VICAT.

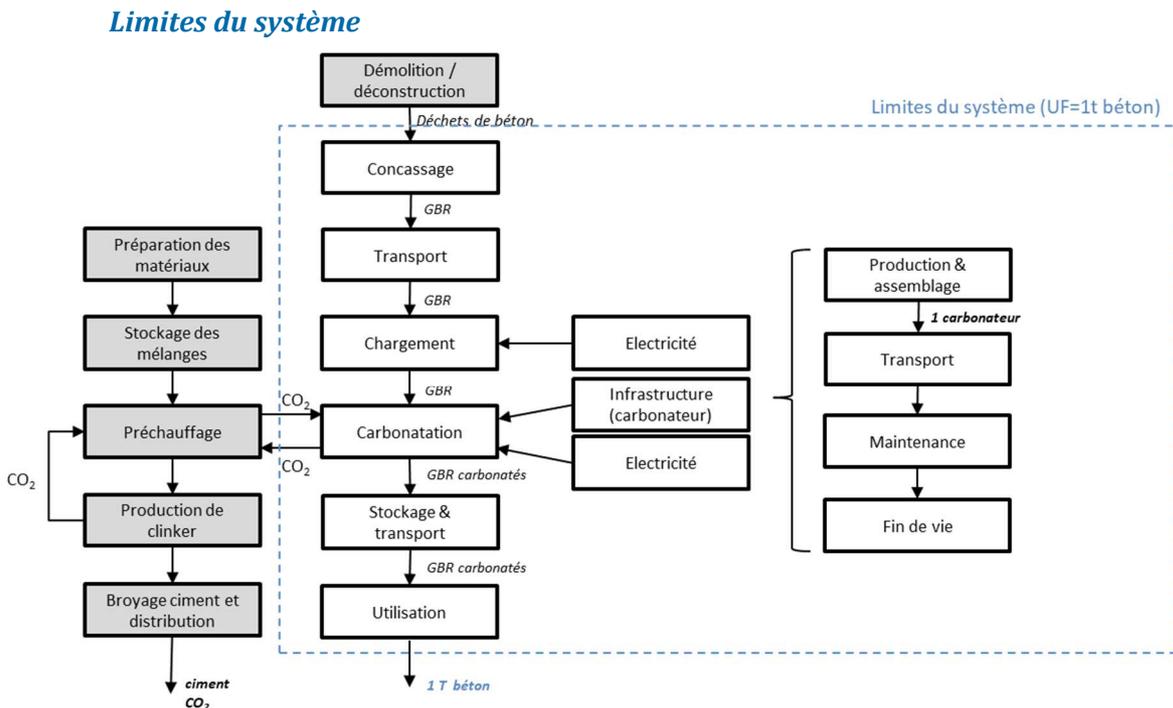


Figure 23. Limites du système de production de béton à partir de GBRC

L'ACV effectuée est une ACV du berceau à la centrale à béton. Pour les différents scénarios, le système considère la production en granulats, qu'il s'agisse de granulats naturels, de granulats de béton recyclés ou de granulats de béton recyclés carbonatés – impliquant la carbonatation des GBR. Pour chaque mode d'approvisionnement des granulats, le transport est pris en compte, selon les valeurs minimum et maximum définies au chapitre 5 (Tableau 5. Flux de référence pour le démonstrateur LAFARGE (exprimés par t de GBRC)). Le système inclut également le transport des matériaux granulaires jusqu'à la centrale à béton. Le système intègre enfin les autres intrants nécessaires à la fabrication : ciment, adjuvants et eau. Le procédé de fabrication des bétons en centrale (malaxage) n'est pas considéré, partant de l'hypothèse qu'il est le même pour tous les scénarios.

Données

Les données sont issues des formulations calées dans le cadre du GT2.2.1.

Tableau 10. Composition des scénarios B1 à B7 formulés dans le cadre du GT2.2.1 du PN FastCarb par m3 de béton

	Unité	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
SN – Saint Bonnet de Mure	kg	844	571	607	592	411	444	420
SBR – Saint Fons	kg		143			274		
SBRC1 – Saint Fons	kg			152			296	
SBRC2 – Saint Fons	kg				148			280
4-11.2 – Saint Bonnet de Mure	kg	213	107	106	106			
11.2-22.4 – Saint Bonnet de Mure	kg	731	363	358	358			
GrBR – Saint Fons	kg		471			870		
GrBRC1 – Saint Fons	kg			464			882	
GrBRC2 – Saint Fons	kg				464			873
CEM II/A-LL 42,5R Val d'Azergues	kg	320	320	320	320	320	320	320
Isoflow 857	%	0,15%						
Isoflow 7230	%	0,60%	1,20%	0,65%	0,65%	1,20%	0,90%	0,90%
Chryso CHR	%		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

Pour l'approvisionnement en GN (GrN ou SN), les procédés considérés proviennent de la base de données ecoinvent correspondant à des conditions suisses (voir également chapitre 5). Il serait intéressant de prendre en compte des procédés contextualisés à la France. Malheureusement, les modules d'information environnementale (MIE) publiés par l'UNPG fournissent les scores d'impact calculés pour le set d'indicateurs préconisés par la NF EN

15804+A1 et non pas les modèles avec les flux de référence ou l'inventaire des émissions et des extractions. Ceci a déjà été discuté précédemment.

L'approvisionnement en GBR (GrBR ou SBR) provient des travaux de Mousavi et al (2020) et correspond à un procédé contextualisé du recyclage du béton. Les données sur les GBRC, distinguant le procédé mis en œuvre par LAFARGE de celui développé par VICAT, proviennent du travail effectué dans le cadre du GT2.3 du PN FastCarb.

Les données relatives au transport proviennent, pour les distances parcourues en fonction du type de granulats, des hypothèses posées au chapitre 5 (Tableau 8). Les procédés de transport considérés proviennent de la base de données ecoinvent.

Il n'existe pas de FDES ou de processus ecoinvent spécifique pour les adjuvants Isoflow 857, Isoflow 7230 et Chryso CHR (retardateur de prise) utilisés. Cependant, un premier calcul sera effectué sur la base des substances actives contenues dans ces adjuvants : polyol pour le Chryso CHR, polycarboxylate-ether pour l'Isoflow. Pour ce qui est des transports, l'usine de fabrication du Chryso CHR est située dans le Cher. L'Isoflow est fabriqué en Allemagne.

6.2.2 Résultats

On peut noter que la quantité d'adjuvants et les distances de transport plus élevées alourdissent le bilan environnemental et notamment climatique des bétons à base de granulats recyclés (carbonatés ou non).

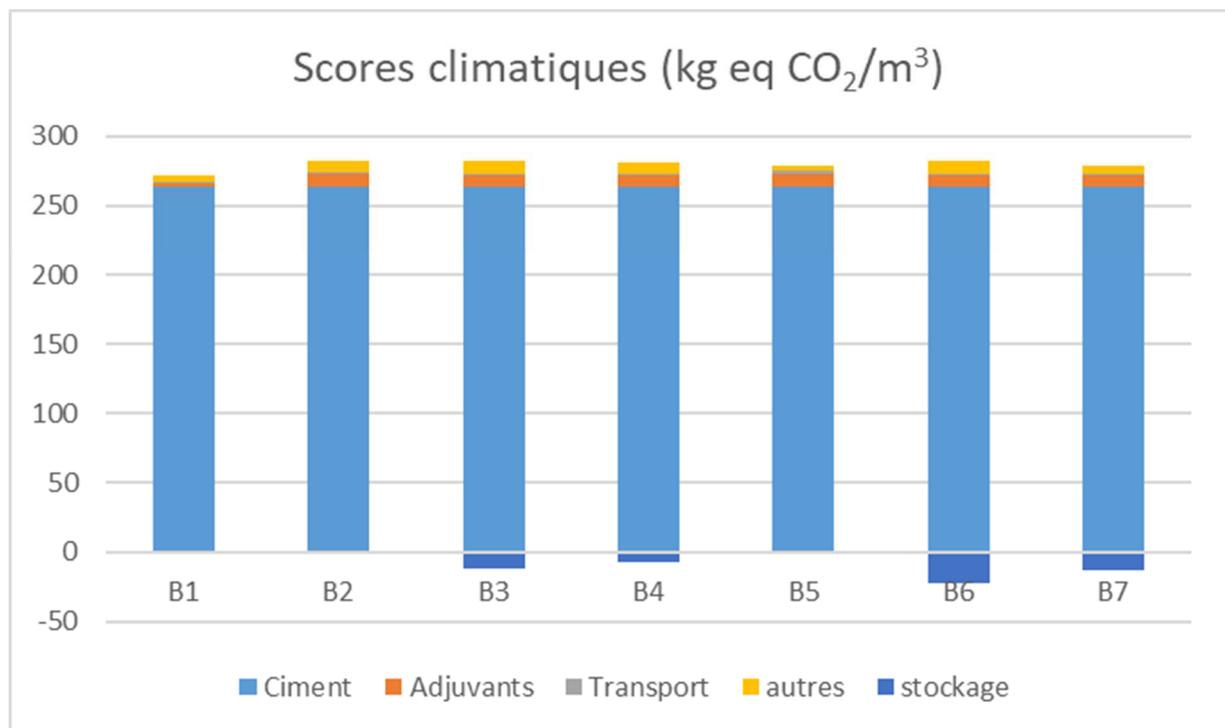


Figure 24. Comparaison des scores climatiques des bétons B1 à B7

Hors stockage, et comme attendu, la formulation B1 (composée de granulats naturels) présente le meilleur score de changement climatique. En effet, il nécessite moins d'adjuvants et évite l'énergie dépensée pour le recyclage ou la carbonatation des granulats.

Cependant, lorsque l'on prend en compte le stockage de CO₂ les formulations B6 et B7 présentent les meilleurs scores de changement climatique. Ce sont les bétons contenant les plus grandes quantités de GBRC, et donc la plus grande quantité de CO₂ stockée.

On s'intéressera plus particulièrement au B7, qui du fait d'une carbonatation moins énergivore est plus avantageux sur les autres types d'impacts.

Pour ce béton, le score climatique final est le suivant : $278.83 - 0.280 \cdot 31 - 0.873 \cdot 5 = 265,78$ kgCO_2/m^3

Soit environ $6\text{kgCO}_2/\text{m}^3$ de moins que le B1, ou une diminution de 2%.

On observe que dans ce cas en région parisienne avec des distances de transport courtes, la part du transport est très limitée dans l'impact final du béton. Le ciment est de loin le composant le plus impactant ($263\text{kgCO}_2/\text{m}^3$), devant les adjuvants ($8\text{kgCO}_2/\text{m}^3$ pour le B7).

Cela montre l'efficacité du travail de contextualisation géographique qui a été mené : l'impact du transport est minimisé.

La principale piste d'amélioration est donc l'augmentation du taux de SBRC dans les bétons. En effet, elle est dans les compositions ci-dessus limitée à 40%, or c'est bien cette partie fine qui permet de stocker le plus de CO_2 . En considérant un taux de 100% de SBRC, on peut envisager une diminution maximale de $13\text{kgCO}_2/\text{m}^3$ (limite purement théorique) en utilisant la même composition en dehors des SBRC. Or pour maintenir la même classe de résistance il faudrait dans ce cas augmenter les quantités d'adjuvants et/ou de ciment, réduisant ainsi les gains.

Si l'on compare maintenant les bétons B1 et B7, voici ce qui en ressort :

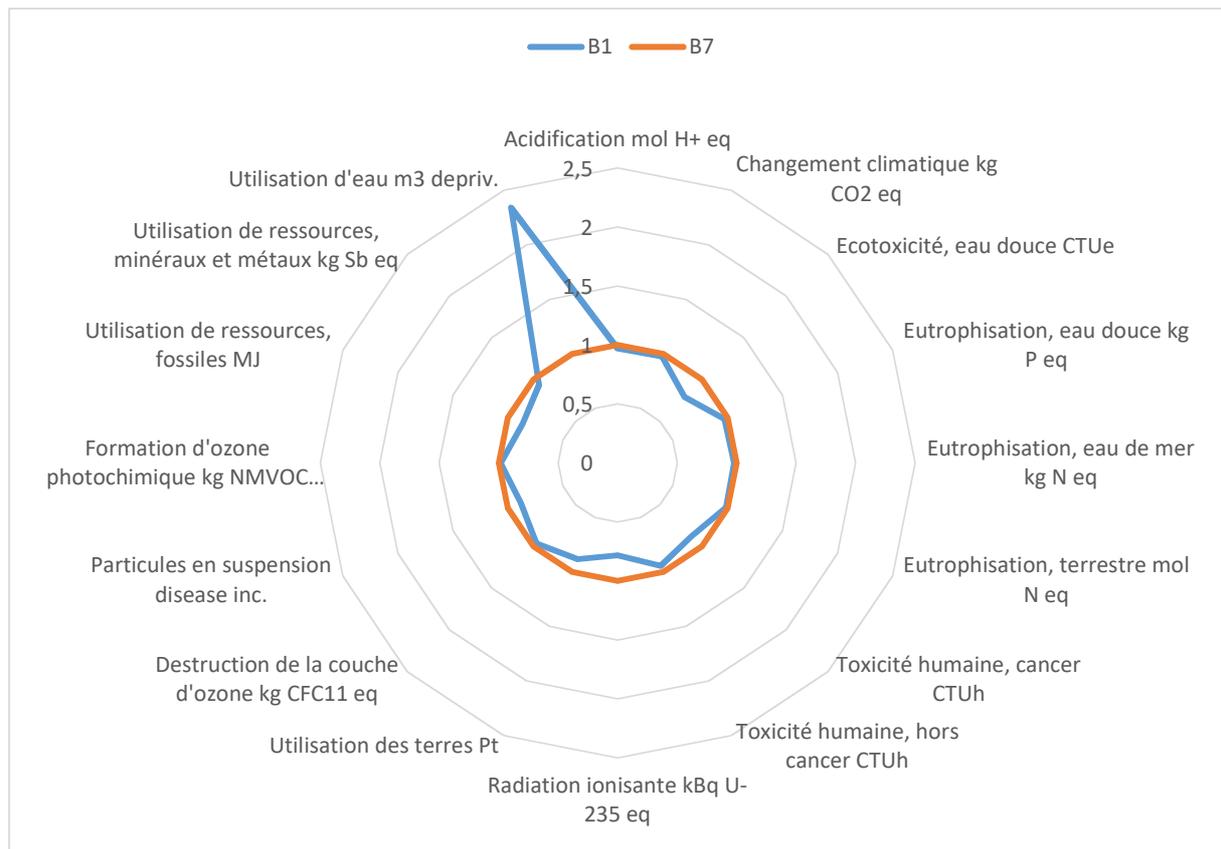


Figure 25. Comparaison de différents impacts des B1 et B7

Premier élément, l'utilisation d'eau est très largement supérieure pour le B1. Cela est dû au lavage des granulats naturels, et des données spécifiques à la France ne sont pas disponibles. Cette valeur est donc à nuancer, du fait de consommation d'eau très variable selon les techniques utilisées pour le lavage des granulats.

Les autres indicateurs sont tous favorables au B1, en dehors du changement climatique comme vu précédemment. Ce résultat n'est pas surprenant puisque la carbonatation n'a d'effet bénéfique que sur les émissions nettes de CO_2 . Pour le reste, la carbonatation en elle-

même ainsi que les distances de transport rallongées et l'utilisation d'adjuvants en plus grande quantité grèvent le bilan environnemental du B7. On remarque que si le gain sur le score climatique est de l'ordre de 2%, pour d'autres impacts comme écotoxicité, la toxicité humaine, les particules en suspension ou encore les radiations ionisantes les écarts sont plutôt de l'ordre de 10 à 20%, en faveur du B1.

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 :

$$0.296*31 + 0882*4= 12.7 \text{ kgeqCO}_2/\text{m}^3$$

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 émetteurs compte tenu des méthodes d'allocations prises en compte à ce jour.

6.3 Perspectives de recherches complémentaires

A ce stade le travail a été réalisé pour un usage des sables et granulats de bétons recyclés carbonatés dans le béton. Un travail complémentaire d'analyse paramétrique de la production de bétons à partir de GBRC apporterait d'autres éléments de discussion. A ce stade les paramètres influençant la carbonatation accélérée des GBR ne sont pas pris en compte. On pourrait par exemple regarder le taux et la qualité des GBR et des GBRC ainsi que le taux de CO₂ capté par carbonatation accélérée. L'adjuvantation peut également être étudiée plus finement, notamment au travers de la prise en compte de données plus adaptées au contexte ; à ce jour dans les bases de données environnementales les adjuvants disponibles sont très sommaires et très peu représentatifs de la réalité. Ces adjuvants étant de plus en plus utilisés, la contextualisation de la donnée environnementale mérite que l'on s'y intéresse.

Enfin, et ce de manière non exhaustive d'autres types d'utilisation des sables méritent d'être explorées et en particulier en préfabrication et en sous couche routière.

7 Conclusion et perspectives

7.1 Conclusion sur l'ACV détaillée

A ce stade, il est possible de dire que la carbonatation accélérée des GBR est intéressante en matière de captage du CO₂ pour la fraction fine (0-4 mm), et donc potentiellement de réduction des émissions de CO₂ des filières ciment ou granulats. Or, ces solutions de captage ont **d'autres effets sur l'environnement qui ne sont pas compensés par le captage de CO₂**. Ces effets sont à prendre en compte dans les arbitrages liés au développement des filières d'approvisionnement en sable ou granulat de béton recyclé carbonaté, et des usages relatifs.

7.2 Perspectives

Cette analyse environnementale a permis d'aborder différents aspects de la carbonatation accélérée des GBR qui restent encore largement à explorer. Nous reprenons à la suite certains de ces éléments qui pourraient faire l'objet de travaux complémentaires.

Carbonatation accélérée versus carbonatation naturelle

Par rapport à la carbonatation naturelle de granulats de béton recyclé, la carbonatation accélérée ne permet pas une augmentation du taux de captage théorique de CO₂. L'intérêt de la carbonatation accélérée est qu'elle augmente la probabilité de captage de CO₂ par les granulats recyclés et par extension, par les produits finaux utilisés (béton de granulats de béton recyclé, éléments préfabriqués, remblais...). Autrement dit, elle réduit les incertitudes liées au captage de CO₂ par carbonatation naturelle, sur des temps longs. La comparaison de scénarios de carbonatation naturelle et accélérée, pour différents usages des GBR et différentes fins de vie, couplés à des modèles carbonatation, serait intéressant à mettre en œuvre.

Valorisation du sable de béton recyclé carbonaté (SBRC)

Une des conclusions principales de l'évaluation environnementale relève l'intérêt du sable de béton recyclé carbonaté pour le captage de CO₂. Si certains usages sont envisagés et testés dans le cadre du GT2.2 du PN FastCarb, en particulier pour la fabrication de béton ou en préfa, il reste encore un certain nombre de questions sur ces possibilités. Dans ce sens, il est proposé d'effectuer une étude prospective des usages possibles du sable de béton recyclé carbonaté (SBRC) en construction ou dans d'autres secteurs, permettant par la suite de définir des scénarios à évaluer sur le plan environnemental. Cette étude devra particulièrement s'attacher à identifier les matériaux substitués par l'usage de SBRC pour vérifier la pertinence environnementale de cette substitution.

Evaluation de l'épuisement des ressources et des impacts sur les écosystèmes des activités d'extraction des granulats

L'évaluation environnementale se heurte au problème récurrent de la mauvaise prise en compte, dans les méthodes d'impact environnemental sur le cycle de vie, de l'épuisement de matériaux tels que le gravier et le sable et des impacts écosystémiques liés à leur extraction. Bien que des travaux soient actuellement en cours, les méthodes actuellement utilisées (et intégrées dans les principaux outils ACV), en particulier l'ADP, portent sur des éléments et non sur des matériaux composites. Une analyse détaillée des différentes méthodes d'évaluation des impacts sur les ressources, et un guide de bonnes pratiques pour leur utilisation est fourni par Pradel et al (2019). Un travail méthodologique sur les modèles de caractérisation des impacts causés par la production des granulats est à poursuivre.

Territorialisation et contextualisation des scénarios d'usage des GBRC et SBRC

Il apparaît que les performances environnementales des systèmes de carbonatation dépendent de paramètres territorialisés. Les distances de transport sont à optimiser en fonction des sources de GBR, de gaz industriel chargé en CO₂ et des lieux d'utilisation de GBRC (production de béton, utilisation comme sous-couche routière...). La provenance des matériaux substitués est également à préciser. Un travail inventoriant et spatialisant les sources de CO₂ et de GBR, similaire à ce qui a été fait dans le cadre du PN Recybéton (Mongear et Dross 2016), serait précieux.

Bibliographie

- Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischer R., Jungbluth N., Osses M. and Primas A. (2007) Life Cycle Inventories of Chemicals. ecoinvent report No. 8, v2.0. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- Braymand, S., Feraille, A. & Serres, N. (2017). Evaluation environnementale du béton de granulats recyclés, 2^{ème} étape, rapport PN recybeton.
- CNR (2019) Enquête longue distance 2019.
- Cuéllar-Franca, R.M., Azapagic, A., (2015) Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts, *Journal of CO2 Utilization*, 9:82-102, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>.
- Deutz, S.; Bardow, A. Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature-vacuum swing adsorption. *Nat. Energy* 2021, 6, 203–213.
- S. Deutz and A. Bardow, *Nature Energy*, 2021, 6, 203–213.
- Di Maria, A., Salman, M., Dubois, M. *et al.* Life cycle assessment to evaluate the environmental performance of new construction material from stainless steel slag. *Int J Life Cycle Assess* **23**, 2091–2109 (2018). <https://doi-org.extranet.enpc.fr/10.1007/s11367-018-1440-1>
- Di Maria, A., Snellings, R., Alaerts, L., Quaghebeur, M., Van Acker, K. (2020), Environmental assessment of CO2 mineralisation for sustainable construction materials, *Int. J. Greenh. Gas Control* 17, 32-45.
- European Commission (2020), Circular Economy Action Plan.
- Guyard P., Saadé M., A.Feraille A. (2022). Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclé quels bénéfices environnementaux ? *AJCE*, Vol 40 No 3 (2022): Special Issue - FastCarb 2022
- Idir, R. & Ben Fraj, A. (2019) Environmental analysis of recycled aggregates concrete considering some ways to improve their impact: A case study of Paris' region, *Proceedings of the International Workshop CO2 Storage in Concrete – CO2STO2019*, France, Marne La Vallée, IFSTTAR, June 24-25 2019.
- Idir, R., Feraille, A., Serres, N. & Braymand, S. (2015). Evaluation environnementale du béton de granulats recyclés, rapport PN recybeton.
- Izoret L., Barnes-Davin L., Jeong J., Guillot X. (2021) Fastcarb retour d'expérience des démonstrateurs industriels, GC'2021.
- Jolliet, O., Saadé-Sbeih, M., Crettaz, P., Jolliet-Gavin, N., Shaked, S. (2017) Analyse du cycle de vie, Comprendre et réaliser un écobilan, 3^{ème} édition, PPUR.
- M. M. de Jonge, J. Daemen, J. M. Loriaux, Z. J. Steinmann and M. A. Huijbregts, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 80, 25–31.
- Mongear, L., Dross, A. (2016) La ressource en matériaux inertes recyclables dans le béton en France, rapport du PN RECYBETON.
- Mousavi, M., Ventura, A. & Antheaume, N. (2020), Decision-based territorial life cycle assessment for the management of cement concrete demolition waste, *Waste Management & Research*, 38(12):1405-1419.
- Pradel, M., Garcia, J., Vaija M.S. (2019), Guide de bonnes pratiques pour la prise en compte des ressources minérales et de leur criticité en Analyse du Cycle de Vie, Rapport de recherche irstea, p. 84.
- Rebitzer, G. (2002), Integrating Life Cycle Costing and Life Cycle Assessment for Managing Costs and Environmental Impacts in Supply Chains, In: Seuring S., Goldbach M. (eds) *Cost Management in Supply Chains*. Physica, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-11377-6_8

Saadé, M. & Feraille, A., (2021), ACV de granulats carbonatés, Rapport d'avancement, PN FastCarb, GT2-3 - Evaluations économiques et environnementales FCARB/R/006, 21 p.

Saadé, M., Feraille, A., Rospars, C., Torrenti, J.M. (2021), Captage de CO₂ : analyse du cycle de vie d'un processus de carbonatation accéléré de granulats de béton recyclés, Projet National FastCarb, Journées GC'2021, 8-9 juin 2021, Cachan.

Franck Taillandier, Alice Micolier, Guido Sonnemann, Olivier Jolliet. A coupled model of heat and chemical mass transfer to consistently evaluate human exposure in indoor environments. SETAC, May 2019, Helsinki, Finland.

Tazi, N., Idir, R., Ben Fraj, A. (2020), Sustainable reverse logistic of construction and demolition wastes in French regions: Towards sustainable practices, Procedia CIRP 90:712–717

T. Terlouw, K. Treyer, C. Bauer and M. Mazzotti, Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with low-carbon energy sources [Submitted], 2021.

UNEP (2009), Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products.

UNPG (2017), Module d'information environnementale de la production de granulats à partir de roches massives.

UNPG (2017a), Module d'information environnementale de la production de granulats à partir de roches massives.

UNPG (2017b), Module d'information environnementale de la production de granulats à partir de roches meubles.

UNPG (2017c) Module d'information environnementale de la production de granulats recyclés.

von der Assen, N.; Müller, L. J.; Steingrube, A.; Voll, P.; Bardow, A. Selecting CO₂ Sources for CO₂ Utilization by Environmental-Merit-Order Curves. Environ. Sci. Technol. 2016, 50, 1093–1101.

Acronymes

GBR	Granulat de béton recyclé
GBRC	Granulat de béton recyclé carbonaté
GrBR	Gravier de béton recyclé
GrBRC	Gravier de béton recyclé carbonaté
GN	Gravier naturel
SBR	Sable de béton recyclé
SBRC	Sable de béton recyclé carbonaté
SN	Sable naturel

Annexes

A1. Description mix électriques

Tableau A11. Composition des mix électriques employés dans les modélisations

		Nucléaire	Hydro électricité	Vent	Charbon + lignite	Gas	Autre
FR	France	74%	10,5%	4%	2%	6%	3,5%
CH	Suisse	13%	50%				37%
DE	Allemagne	11%		16%	38%		35%
US- NPCC	Etats-Unis, Northeast Power Coordinating Council	31%				30%	39%
US- MRO	Etats-Unis, Midwest Reliability Organization			22%	30%	13%	35%

Tableau A12. Procédés ecoinvent correspondant

FR	France	electricity, high voltage, production mix, FR
CH	Suisse	electricity, high voltage, production mix, CH
DE	Allemagne	electricity, high voltage, production mix, DE
US-NPCC	Etats-Unis, Northeast Power Coordinating Council	electricity, high voltage, production mix, US-NPCC
US-MRO	Etats-Unis, Midwest Reliability Organization	electricity, high voltage, production mix, US-MRO

A2. Démonstrateur LAFARGE : analyse de sensibilité sur les mix électriques

Tableau A13. Scores d'impact pour les scénarios de carbonatation, démonstrateur mis en œuvre par LAFARGE, étude de sensibilité sur les mix électriques

Indicator	Mix FR	Mix CH	Mix DE	Mix US-NPCC	Mix US-MRO	Unit
Acidification	1,82E-02	1,87E-02	4,29E-02	1,85E-02	9,46E-02	mol H+ eq
Climate change	4,04E+00	3,98E+00	2,07E+01	8,03E+00	2,19E+01	kg CO2 eq
Ecotoxicity, freshwater	1,09E+02	8,59E+01	1,70E+02	1,45E+02	2,05E+02	CTUe
Eutrophication, freshwater	1,17E-03	3,22E-03	2,77E-02	9,08E-04	3,27E-02	kg P eq
Eutrophication, marine	4,58E-03	3,97E-03	1,39E-02	4,14E-03	1,82E-02	kg N eq
Eutrophication, terrestrial	3,73E-02	3,62E-02	9,98E-02	4,05E-02	1,29E-01	mol N eq
Human toxicity, cancer	7,70E-09	7,46E-09	9,54E-09	8,01E-09	1,01E-08	CTUh
Human toxicity, non-cancer	5,01E-08	5,97E-08	1,50E-07	5,60E-08	1,90E-07	CTUh
Ionising radiation	1,70E+01	7,29E+00	3,22E+00	1,11E+01	2,22E+00	kBq U-235 eq
Land use	1,16E+01	2,37E+01	3,12E+01	6,03E+01	3,55E+01	Pt
Ozone depletion	3,92E-07	2,09E-07	5,00E-07	9,44E-07	5,29E-07	kg CFC11 eq
Particulate matter	1,66E-07	1,21E-07	1,76E-07	1,66E-07	5,59E-07	disease inc,
Photochemical ozone formation	1,08E-02	9,77E-03	2,53E-02	1,31E-02	3,67E-02	kg NMVOC eq
Resource use, fossils	3,86E+02	1,50E+02	2,56E+02	2,64E+02	2,48E+02	MJ
Resource use, minerals and metals	6,73E-05	6,48E-05	7,83E-05	6,76E-05	7,35E-05	kg Sb eq
Water use	4,14E+00	1,09E+01	4,99E+00	7,22E+00	8,32E+00	m3 depriv,

A4. Procédés utilisés dans la modélisation

Tableau A14. Procédés considérés dans la modélisation des scénarios de production de béton

Flux	Nom du process modélisé	Source
SN – Saint Bonnet de Mure	market for gravel, crushed gravel, crushed Cutoff, S - CH	ecoinvent
SBR – Saint Fons	RCC, crushed, operation cut-off, U, ecoinvent 3.7 - FR	Mousavi & Ventura
SBRC1 – Saint Fons	Approvisionnement GBRC LAFARGE, transport min – FR Approvisionnement GBRC LAFARGE, transport max - FR	GT2.3 PN FastCarb
SBRC2 – Saint Fons	Approvisionnement GBRC VICAT, transport min – FR Approvisionnement GBRC VICAT, transport max - FR	GT2.3 PN FastCarb
4-11.2 – Saint Bonnet de Mure	market for gravel, crushed gravel, crushed Cutoff, S - CH	ecoinvent
11.2-22.4 – Saint Bonnet de Mure	market for gravel, crushed gravel, crushed Cutoff, S - CH	ecoinvent
GrBR – Saint Fons	RCC, crushed, operation cut-off, U, ecoinvent 3.7 - FR	Mousavi & Ventura
GrBRC1 – Saint Fons	Approvisionnement GBRC LAFARGE, transport min - FR Approvisionnement GBRC LAFARGE, transport max - FR	GT2.3 PN FastCarb
GrBRC2 – Saint Fons	Approvisionnement GBRC VICAT, transport min – FR Approvisionnement GBRC VICAT, transport max - FR	GT2.3 PN FastCarb
CEM II/A-LL 42,5R Val d'Azergues	market for cement, alternative constituents 6-20% cement, alternative constituents 6-20% Cutoff, S - Europe without Switzerland	ecoinvent
Isoflow 857	market for polycarboxylates, 40% active substance polycarboxylates, 40% active substance Cutoff, S - RER	ecoinvent
Isoflow 7230	market for polycarboxylates, 40% active substance polycarboxylates, 40% active substance Cutoff, S - RER	ecoinvent
Chryso CHR	market for polyol polyol Cutoff, S - RER	ecoinvent
Eau efficace	market for tap water tap water Cutoff, S - Europe without Switzerland	ecoinvent
Transport camion	market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 Cutoff, S – RER market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 Cutoff, S – RER market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Cutoff, S – RER market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cutoff, S - RER	ecoinvent

A5. Approvisionnement en granulats

Tableau A15. Scores d'impact environnemental de différents scénarios d'approvisionnement en granulat

Catégorie d'impact	Reference unit	GN min	GN max	GBR min	GBR max	GBRC1 min	GBRC1 max	GBRC2 min	GBRC2 max
Acidification	mol H+ eq	2,31E-2	3,05E-2	1,28E-2	3,65E-2	3,54E-2	1,06E-1	2,39E-2	9,50E-2
Changement climatique	kg CO2 eq	3,24	5,44	2,65	9,67	8,01	2,91E1	5,38	2,64E1
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	5,60E1	8,20E1	3,46E1	1,18E2	1,59E2	4,09E2	9,62E1	3,45E2
Eutrophisation, eau douce	kg P eq	7,16E-4	8,63E-4	3,12E-4	7,83E-4	1,57E-3	2,99E-3	9,46E-4	2,36E-3
Eutrophisation, marine	kg N eq	7,70E-3	9,56E-3	3,86E-3	9,81E-3	9,56E-3	2,74E-2	6,67E-3	2,45E-2
Eutrophisation, terrestre	mol N eq	8,35E-2	1,04E-1	4,16E-2	1,06E-1	9,11E-2	2,86E-1	6,81E-2	2,63E-1
Toxicité humaine, cancer	CTUh	4,46E-9	5,29E-9	1,86E-9	4,51E-9	1,01E-8	1,80E-8	8,64E-9	1,66E-8
Toxicité humaine, non-cancer	CTUh	8,73E-8	1,16E-7	4,72E-8	1,37E-7	1,14E-7	3,85E-7	9,46E-8	3,65E-7
Radiation ionisante	kBq U-235 eq	1,59	1,77	6,60E-1	1,24	1,78E1	1,95E1	5,45	7,19
Utilisation des sols	Pt	5,27E1	8,89E1	3,08E1	1,47E2	6,41E1	4,11E2	5,65E1	4,04E2
Destruction d'ozone	kg CFC11 eq	4,75E-7	1,01E-6	5,45E-7	2,25E-6	1,26E-6	6,36E-6	9,93E-7	6,10E-6
Particules	disease inc.	4,74E-7	6,67E-7	2,95E-7	9,13E-7	5,77E-7	2,43E-6	4,83E-7	2,34E-6
Formation d'ozone photochimique	kg NMVOC eq	2,53E-2	3,27E-2	1,37E-2	3,75E-2	2,89E-2	1,00E-1	2,25E-2	9,40E-2
Ressources, fossiles	MJ	6,82E1	1,03E2	4,81E1	1,61E2	4,55E2	7,94E2	1,78E2	5,17E2
Ressources, minéraux et métaux	kg Sb eq	2,93E-5	3,46E-5	6,02E-6	2,30E-5	7,65E-5	1,27E-4	5,74E-5	1,08E-4
Utilisation de l'eau	m3 depriv.	9,14E1	9,16E1	3,06E1	3,11E1	3,48E1	3,64E1	3,20E1	3,37E1

Méthode d'évaluation de l'impact : set d'indicateurs EN 15804

Distances de transport minimum et maximum parcourues en camion >32t

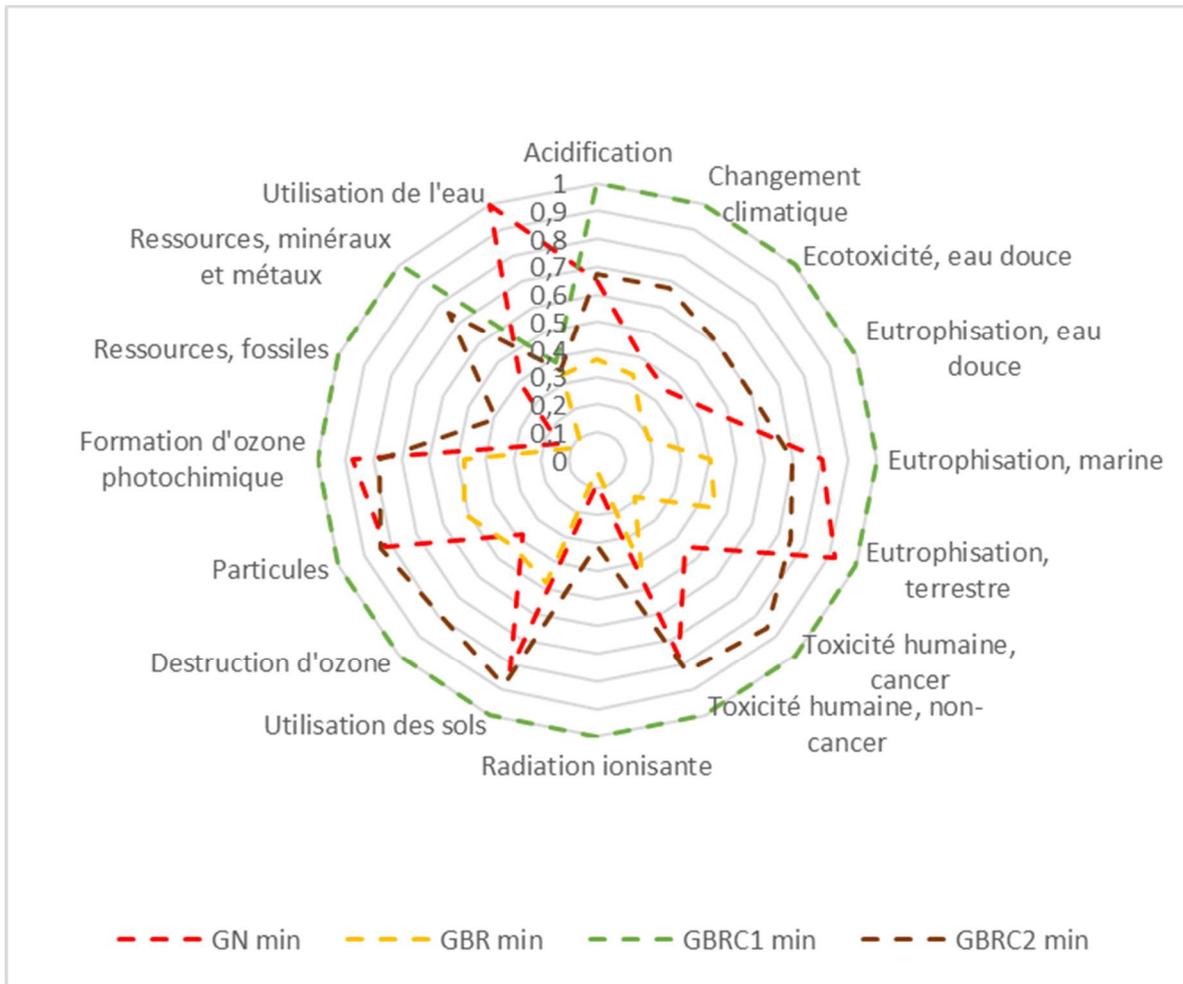


Figure A26. Scores d'impact relatifs pour les catégories couvertes par la NF EN 15804, pour les scénarios d'approvisionnement en granulats, transport minimum en camion

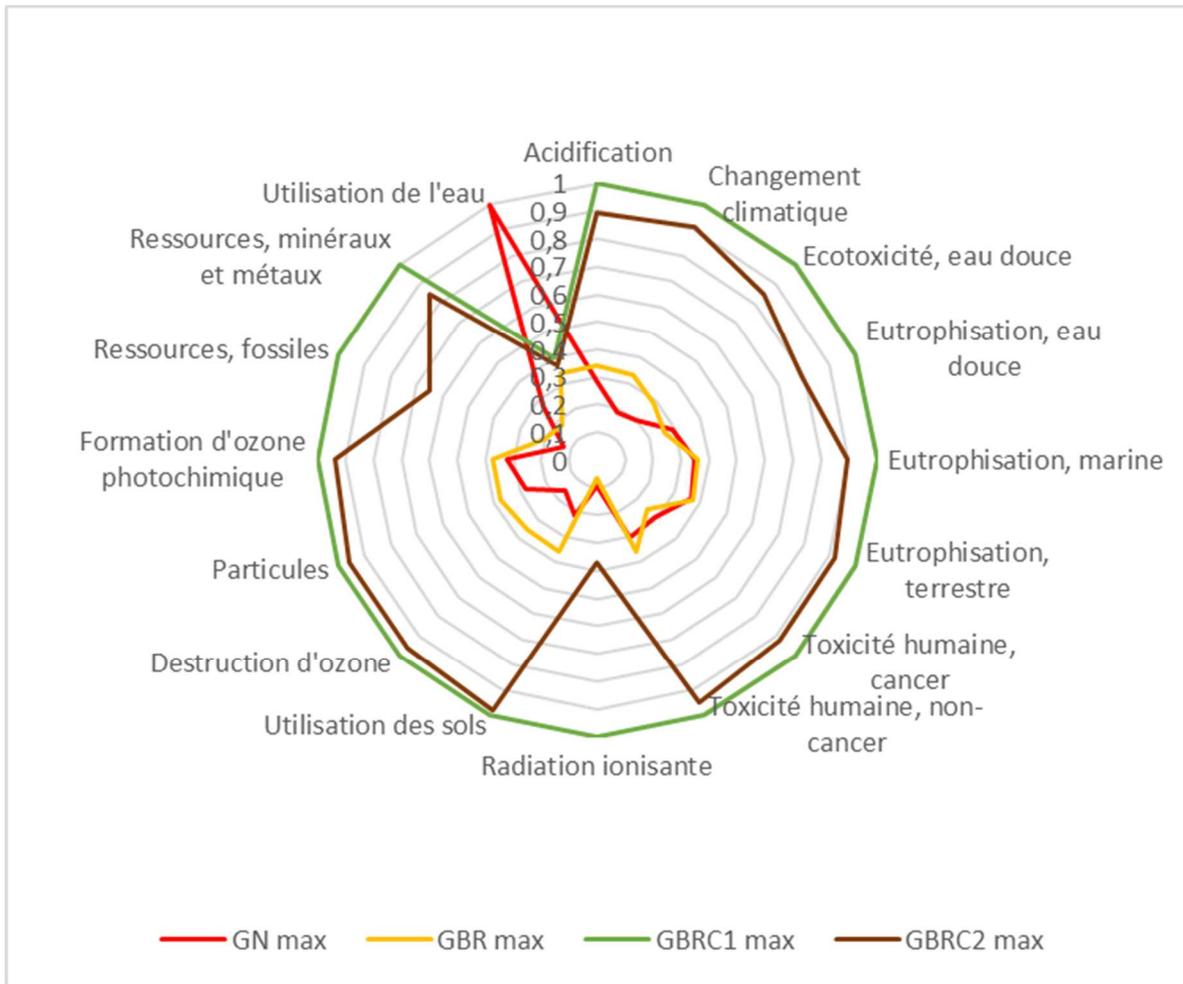


Figure A27. Scores d'impact relatifs pour les catégories couvertes par la NF EN 15804, pour les scénarios d'approvisionnement en granulats, transport minimum en camion