

Projet de recherche et développement



Stockage de CO₂ par carbonatation du béton recyclé

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

ACV de granulats carbonatés Rapport d'avancement

Auteur(s) / Organisme(s) :

Myriam Saadé – UGE

Adelaïde Feraille - ENPC

Thème de rattachement :

GT2-3 - Evaluations économiques et environnementales

FCARB/R/006

LC/20/FCARB/029

Mars 2021

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
1 Résumé	3
2 Introduction	4
2.1 Contexte de l'étude	4
2.2 Objectifs de l'étude	4
2.3 Approche	5
2.4 Equipe	5
3 Méthodologie : l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)	5
3.1 Introduction	5
3.2 Démarche	6
3.3 Intérêt, limites et potentialités d'une ACV	8
3.4 Outils et bases de données	8
3.5 Standards et cadre normatif européen	9
4 ACV préliminaire sur le démonstrateur VICAT (Créchy)	9
Définition des objectifs et du système	9
4.1.1 Objectifs	9
4.1.2 Fonction du système et unité fonctionnelle	9
4.1.3 Système étudié	9
4.1.4 Limites du système	12
4.1.5 Flux de référence	12
4.2 Bilans énergie primaire non renouvelable et CO ₂ fossile	14
4.3 Etude de sensibilité sur le bilan CO ₂	15
5 Perspectives : ACV détaillée	17
5.1 Scénarios à comparer	17
5.2 Besoins en données	20
5.3 Méthodologie et affichage des résultats	20
6 Bibliographie	20

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 de la capture et du stockage du CO₂. L'objet de ce travail est d'évaluer d'un point de vue environnemental le procédé de carbonatation accéléré en utilisant l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), afin de choisir la technologie la plus performante, y compris au plan environnemental. A l'heure actuelle trois solutions technologiques sont à l'étude, faisant appel à des procédés différents. Nous proposons une pré-évaluation simplifiée sur le cycle de vie de l'une de ces solutions, mise en œuvre par VICAT sur son site de Créchy.

Les tâches réalisées pour ce procédé sont :

- la collecte de données spécifiques sur le procédé en lien avec les partenaires industriels du projet,
- 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.

Sur cette base, l'évaluation environnementale sera élargie aux autres solutions technologiques. Dans ce sens, des scénarios complémentaires ont été définis pour être comparés. Ils feront l'objet d'une ACV détaillée, impliquant en particulier le développement et l'intégration de modèles de calculs paramétrés pour certains flux lorsque c'est possible en vue de réaliser des analyses de sensibilité, ainsi que le calcul des scores d'impacts sur l'environnement. L'évaluation environnementale sera combinée à l'analyse économique des procédés de carbonatation, menée en parallèle par le CSTB.

Abstract

The FastCarb research project addresses the mineral carbonation of recycled concrete aggregates. 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 carbonation processes, based on a life cycle approach. Three different mineral carbonation processes are currently under study. This report presents the first step of the assessment, describing the screening LCA performed on one process, implemented by VICAT.

The screening LCA consists of:

- Collecting data specific to the mineral carbonation process, in relation with the industrial partners involved in the project,
- Defining the technological system and setting its boundaries,
- Calculating simplified nonrenewable primary energy and CO₂ balances in order to estimate orders of magnitude and identify key parameters.

A second step will extend the environmental assessment to the other technological solutions. Complementary scenarios are defined and will be compared in a detailed LCA study. Environmental LCA will be combined with the economic assessment of mineral carbonation processes, performed in parallel by the CSTB.

2 Introduction

2.1 Contexte de l'étude

Le Pacte Vert européen, présenté en décembre 2019, pose les bases d'un nouveau modèle de développement économique. Il vise à la fois à garantir le bien-être des populations et à protéger l'environnement. Cela implique de mettre en œuvre des stratégies et solutions de réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre tout en découplant croissance économique et consommation de ressources primaires. Le secteur de la construction fait partie des secteurs sur lesquels agir en priorité, du fait des quantités croissantes de matériaux consommés pour la mise en œuvre de bâtiments ou d'infrastructures, représentant 50% des ressources totales extraites en Europe (European Commission 2020), et des volumes de déchets générés. 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 faire recirculer les matériaux de construction, réduire les extractions de matière première (sable, gravier), limiter l'enfouissement de matériaux inertes et ainsi l'extension spatiale des décharges, contrôlées comme sauvages. Cependant, la mise en œuvre de solutions de valorisation du béton, et plus particulièrement de recyclage du béton dans le béton, peut entraîner dans certains cas des transferts d'impact. Le PN Recybéton (Idir et al 2015, Braymand et al 2017) a ainsi montré que l'utilisation de granulats de béton recyclés (GBR) dans certaines formulations de bétons entraîne une augmentation des impacts environnementaux, y compris sur le changement climatique. Ceci est lié à l'augmentation de la teneur en ciment de ces bétons, compensant une plus faible qualité des GBR en comparaison des granulats naturels.

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 la capture et le stockage du CO₂. La carbonatation accélérée des GBR pourrait conduire à des bénéfices environnementaux, et ce pour trois raisons principales. D'une part, elle permet de valoriser des matériaux issus de la démolition d'ouvrages du BTP et d'infrastructures en améliorant leur qualité, d'autre part de stocker du CO₂ émis par différentes industries, et enfin de substituer des matériaux de construction (granulats, sable).

Cependant, les systèmes techniques mis en œuvre pour capter du CO₂ génèrent également, sur l'ensemble de leur cycle de vie, des impacts environnementaux. Il s'agit de quantifier ces impacts et de les comparer aux bénéfices attendus. Si le focus sur l'empreinte carbone est tout à fait légitime, compte tenu des modifications des équilibres climatiques prévus et observés actuellement, il est également nécessaire de prendre en considération d'autres types de dommages affectant la santé humaine, les écosystèmes ou les ressources. Ceci fait l'objet des travaux du GT2.3 du PN FastCarb.

2.2 Objectifs de l'étude

L'objet de ce travail est d'évaluer d'un point de vue environnemental le procédé de carbonatation accéléré en utilisant l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). A l'heure actuelle trois solutions technologiques sont à l'étude dans le cadre du PN FastCarb, faisant appel à des procédés différents. Ce premier rapport porte sur l'une des technologies de carbonatation accélérée évaluées dans le cadre de FastCarb, mis en place sur le site de la cimenterie VICAT à Créchy.

2.3 Approche

L'approche adoptée pour évaluer les impacts environnementaux du procédé de carbonatation se fait en deux temps : d'abord une ACV préliminaire (*screening*) visant à évaluer de manière rapide et simplifiée un système particulier ; puis une ACV détaillée, visant à comparer des scénarios définis sur la base de l'ACV préliminaire.

L'ACV préliminaire porte sur un système technique particulier : le démonstrateur VICAT situé sur le site de la cimenterie de Créchy. Les tâches réalisées pour ce procédé sont :

- la collecte de données spécifiques sur le procédé en lien avec les partenaires du projet pour avoir les données directes du site industriel concerné,
- 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.

Le choix a été fait de procéder rapidement à une visite de site, le 12 octobre 2020, afin de disposer des informations pour la description et la modélisation du système, l'estimation des flux de référence et le calcul des bilans d'énergie primaire non renouvelable et de CO₂ simplifiés. Elle fait l'objet de la section 4.

L'ACV détaillée approfondit l'ACV préliminaire et évalue différents scénarios qui sont présentés à la section 5. Les tâches à réaliser pour chaque procédé seront :

- la collecte de données spécifiques (inventaire des flux en lien avec les partenaires du projet pour avoir les données directes des sites industriels),
- la définition et la délimitation du système technologique,
- le développement et l'intégration de modèles de calculs paramétrés pour certains flux lorsque c'est possible en vue de réaliser des analyses de sensibilité
- le calcul des scores d'impacts sur l'environnement,
- l'interprétation des résultats,
- des analyses de sensibilité sur les paramètres clés.
- une comparaison des impacts environnementaux avec l'analyse du cycle des coûts, effectuée par le CSTB

L'ACV détaillée fera l'objet d'un rapport ultérieur.

2.4 Equipe

Cette recherche est pilotée par Adelaïde Feraille (ENPC), correspondante de l'étude auprès du PN FastCarb, et réalisée par Myriam Saadé (UGE).

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

3.1 Introduction

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).

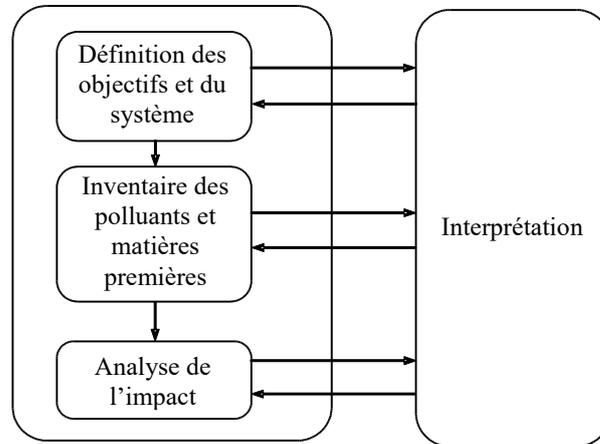


Figure 1. Phases de l'analyse du cycle de vie, tiré de Jolliet et al. (2017)

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.

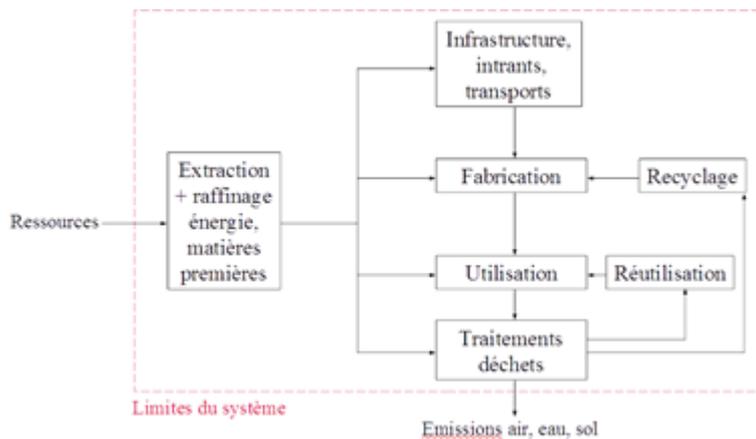


Figure 2. Limites du système et principales étapes du cycle de vie d'un produit, tiré de Jolliet et al. (2017)

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** certains 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.

4 ACV préliminaire sur le démonstrateur VICAT (Créchy)

4.1 Définition des objectifs et du système

4.1.1 Objectifs

L'objectif de cette partie est de modéliser le système de carbonatation des granulats de béton recyclés (GBR) mis en œuvre sur le site de Créchy et d'effectuer un bilan préliminaire de ce système (CO₂ et énergie primaire non renouvelable).

Comme toute ACV préliminaire, elle doit permettre d'estimer les ordres de grandeur des différentes étapes du cycle de vie, identifier certains paramètres clés et fournir les bases de définition des scénarios à comparer lors de l'ACV détaillée.

4.1.2 Fonction du système et unité fonctionnelle

La fonction principale du système étudié est de produire un matériau de construction captant du carbone. La fonction secondaire est d'améliorer la qualité des granulats recyclés en diminuant leur porosité. La fonction secondaire n'est dans un premier temps pas incluse dans l'unité fonctionnelle. Elle sera prise en compte dans une étape ultérieure de la recherche.

L'unité fonctionnelle (UF) choisie est la suivante : **1 t de granulats de béton recyclé carbonaté (GBRC)**.

4.1.3 Système étudié

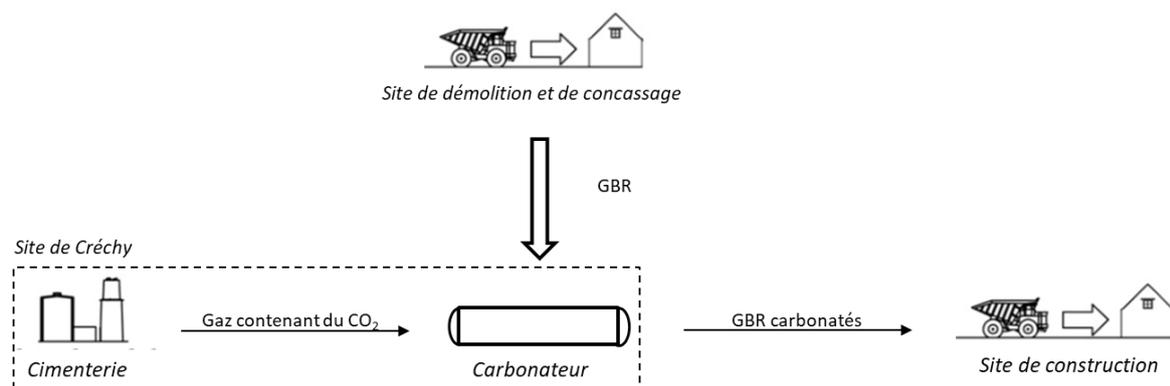


Figure 3. Système de production des GBRC – démonstrateur VICAT

Le système de production des GBRC à l'étude est illustré en Figure 3. Les GBR, fournis par Lafarge Holcim, sont issus d'une plateforme de réception et de traitement des déchets inertes de démolition situé à Saint Fons et sont concassés sur site. Il s'agit de bétons de type retours de centrale, donc de déchets de l'industrie du BPE, des matériaux de bonne qualité 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, où ils sont stockés puis carbonatés.

Le démonstrateur employé pour la carbonatation est un tambour rotatif utilisé précédemment comme sécheur pour la fabrication d'enrobés (Figure 4). Il a été acheté d'occasion en France (région de Montpellier) et été modifié pour pouvoir remplir sa fonction actuelle, en particulier par l'ajout d'une pompe.



Figure 4. Démonstrateur VICAT – site de Créchy

Sur le site de la cimenterie, le démonstrateur a été positionné à côté du broyeur cru, récupérant les gaz chauds en provenance de la tour de préchauffage (Figure 5). A la sortie de la tour de préchauffage, le gaz industriel a une concentration de CO₂ de 25% en volume. Cette concentration baisse par dilution au niveau du broyeur, pour atteindre 15% (Tableau 1). La prise se fait au niveau de la gaine de gaz en provenance de la tour de préchauffage, ayant une température de 120°C. La température du gaz diminue à 50°C à l'entrée du carbonateur¹.



Figure 5. Démonstrateur VICAT – prise du gaz industriel

Tableau 1. Composition du gaz dans le carbonateur (% volumique)

CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	SO ₂
15%	5%	65%	7%	0,07%

Chargé en poussières, le gaz doit être dépoussiéré avant carbonatation. Il passe par un cyclone puis par un système de filtres à manche. Des échangeurs de chaleur (ventilateurs)

¹ L'amélioration des performances du démonstrateur en termes de captation de carbone porte sur la diminution du taux d'humidité et sur l'augmentation de la concentration de CO₂ dans le gaz d'entrée. Une possibilité est de récupérer le gaz industriel en haut de la tour de préchauffage ce qui permet d'avoir un gaz plus chaud et plus concentré en CO₂. Cependant, la température du gaz en sortie de tour est à 350°C et doit être ramené à 90°C au niveau du carbonateur. Les filtres à manche ne supportent pas les hautes températures.

ont également été installés mais ne sont pas utilisés. Le gaz dépoussiéré est ensuite injecté dans le démonstrateur, puis rejeté dans la gaine principale reliant la tour de préchauffage et le broyeur cru. Le gaz est donc récupéré par l'usine.

Le chargement des GBR se fait par une trémie qui fonctionne en batch de 3 tonnes (Figure 6). Le tapis d'alimentation fonctionne 20 minutes par batch. La carbonatation de ces 3 tonnes se fait en deux heures. 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, du fait d'une pente trop forte (2%).



Figure 6. Démonstrateur VICAT – trémie de chargement

Suite à différents essais, le temps de séjour optimum a été déterminé à 1h, avec une humidité de l'ordre de 10%. Pour ces conditions, les taux de carbonatation obtenus sont de 3,1% pour le sable et 0,5% pour le gravier (Tableau 2). L'objectif est d'atteindre un taux de carbonatation de 5%, impliquant une maîtrise du taux d'humidité et l'augmentation de la concentration de CO₂ dans le gaz industriel.

Tableau 2. Taux de carbonatation (kgCO₂/t GBR)

Fraction 0-4 mm	Fraction 4-16 mm	Objectif
31	5	50

En termes de maintenance, le tambour est équipé de releveurs qui s'usent rapidement et doivent être changés fréquemment (environ 500 kg d'acier par an). La maintenance implique également du graissage et un renforcement du blindage. Les quantitatifs sont à préciser.

En considérant la carbonatation de 1,5 tonnes de GBR par heure, il est estimé que le carbonateur-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. L'effet prototype est à considérer.

Les GBRC sont ensuite stockés sur site, puis transportés sur un site de construction (hypothèse d'un transport sur 50 km).

4.1.4 Limites du système

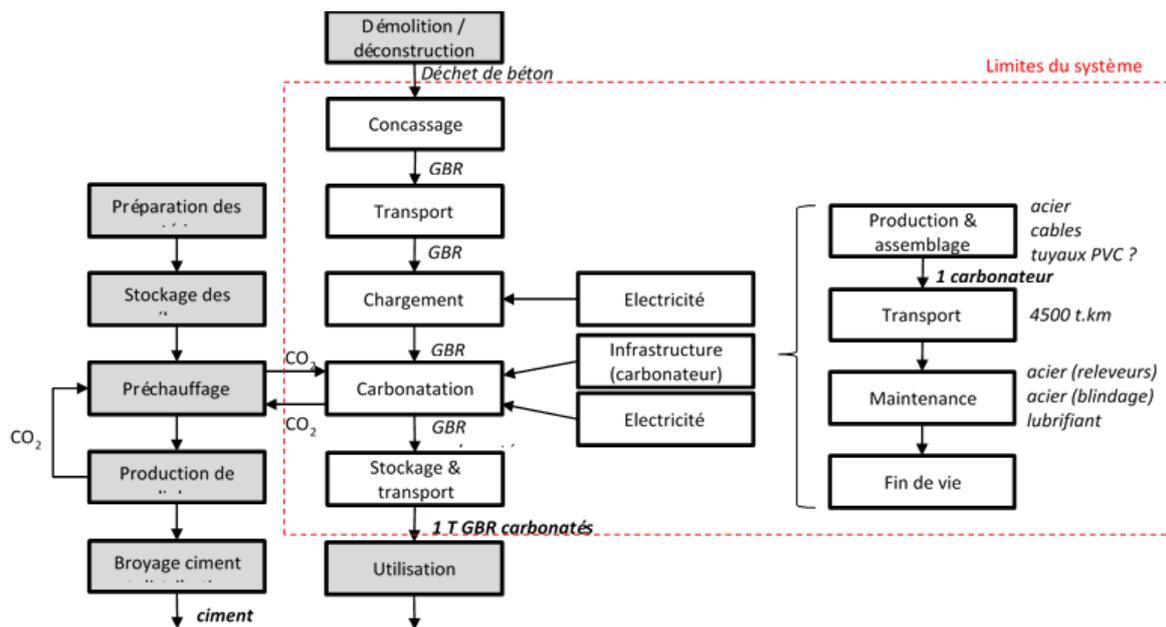


Figure 7. Limites du système de production des GBR – démonstrateur VICAT

Les limites du système sont décrites à la Figure 7. Elles incluent les différentes étapes du cycle de vie de la carbonatation des GBR, du concassage au niveau du chantier de démolition/déconstruction (site d'utilisation antérieur) jusqu'au chantier (excluant la mise en œuvre sur site/production de béton). L'exclusion de l'étape d'utilisation des GBR ne fait sens que si les propriétés des GBR carbonatés n'influencent pas cette étape. La carbonatation ayant un effet sur la qualité des granulats et sur la quantité de ciment ajouté pour fabriquer du béton, une extension du système étudié sera proposée dans l'ACV détaillée.

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 totalement aux cycles de vie des processus les ayant générés comme déchets (cut-off). L'évitement des impacts liés au transport et au traitement des déchets de béton n'est donc pas considéré. La question des allocations, en particulier de l'extension du système et des substitutions, sera abordée lors de l'ACV détaillée.

4.1.5 Flux de référence et hypothèses de modélisation

Pour la production par concassage et criblage des granulats issus de déchets de béton au niveau d'une plateforme, on fait l'hypothèse pour l'ACV préliminaire qu'une consommation de diesel est nécessaire, soit 43,7 MJ d'énergie finale (données fournies par ecoinvent, processus *treatment of waste concrete gravel, recycling | waste concrete gravel | Cutoff, U, RoW*). Pour l'ACV détaillée (phase ultérieure), on utilisera le module d'informations environnementales (MIE) réalisé par l'UNPG, en comparaison du procédé proposé par Mousavi et al (2020).

Dans le cadre du démonstrateur, les granulats concassés sont transportés sur 250 km (Saint Fons – Créchy) en camion 25 tonnes, dont le retour se fait à vide. Cette donnée de transport (avec l'option du frêt retour) doit ainsi être considérée comme une variable à optimiser en fonction des scénarios puisque le démonstrateur a été lancé pour tester la faisabilité technique en grandeur réelle mais non la validité économique et environnementale. L'hypothèse de distance transportée fera donc l'objet d'une analyse de sensibilité en Section 4.3.

Les processus ecoinvent pris en compte pour la modélisation du transport considèrent un camion de la catégorie 16-32 tonnes, avec un facteur de charge de 5,79-15,79 tonnes, et une consommation de diesel de 27-45 L/100 km. Le scénario moyen correspond à la moyenne du parc exploité selon la spécification EURO du véhicule (CNR 2019 et Tableau 3).

Tableau 3. Part de véhicules selon l'enquête du CNR (2019)

Norme	Part du parc (2019)	Process ecoinvent 3.7.1 cutoff
EURO III	0,3%	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, S
EURO IV	1,8%	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cutoff, S
EURO V	18,4%	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cutoff, S
EURO VI	79,5%	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cutoff, S

Comme vu précédemment, le prototype fonctionne 2 heures pour carbonater 3 tonnes de granulats (batch). Le tapis d'alimentation fonctionne 20 minutes par batch avec une puissance de 2 kW. Le tambour comporte 4 moteurs de 11 kW chacun, fonctionnant 2 minutes chaque 15 minutes pour éviter que les granulats n'arrivent trop rapidement en bout de tambour. La ventilation a une puissance de 6 kW et fonctionne 2 heures par batch. Le système de dépoussiérage a une puissance inférieure à 1 kW (mis à 1 kW pour le calcul) et fonctionne 2 heures par batch.

On considère que le carbonateur n'est pas entièrement étanche et qu'il émet des particules et du SO₂. Ces flux ne sont pas pris en compte dans le calcul des bilans d'énergie et de CO₂ mais devront être intégrés lors de la modélisation des scénarios de l'ACV détaillée.

Une fois carbonatés, les granulats sont stockés puis transportés par camion 25 tonnes (retour à vide) sur une distance de 50 km. Là aussi, cette seconde distance doit être considérée comme seconde variable pour alimenter les scénarios de développement. Cette hypothèse fera également l'objet d'une étude de sensibilité (Section 4.3).

Tableau 4. Flux de référence relatifs à l'infrastructure (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 (releveurs)	kg	5000
Acier (blindage)	kg	
Huiles (graissage)	kg	
Fin de vie		
Mise en décharge de l'acier	kg	23000

Tableau 5. Flux de référence (exprimés par t de GBRC)

	Unité	Flux de référence
Concassage		
Diesel	MJ	43,7
Transport amont		
Transport par camion	t.km	250
Chargement		
Electricité	kWh	0,222
Carbonatation		
Infrastructure	Unité	9,52E-06
Electricité (moteurs)	kWh	3,91
Electricité (ventilation)	kWh	4
Electricité (dépoussiérage)	kWh	0,67
Stockage		
Mise en décharge de l'acier	kg	23000
Transport aval		
Transport par camion	t.km	50

Les flux de référence calculés sont répertoriés dans les Tableaux 4 et 5, respectivement pour le système démonstrateur (infrastructure) et pour le système GBRC.

4.2 Bilans énergie primaire non renouvelable et CO₂ fossile

Les résultats du calcul des bilans d'énergie primaire non renouvelable et CO₂ fossile sont donnés au Tableau 6 et à la Figure 8.

Tableau 6. Bilan d'énergie primaire non renouvelable et CO₂ fossile (exprimés par t de GBRC)

	Demande en énergie (MJ/t de GBRC)	Emissions de CO ₂ (kg/t de GBRC)
Concassage	58,3	3,85
Transport depuis site de démolition	657,0	39,2
Carbonatation	105,2	0,85
Carbonatation - infrastructure	5,2	0,38
Transportation vers site construction	131,4	7,84
Total	957,1	52,1

A l'issue de cette évaluation simplifiée, la mise à disposition d'1 tonne de GBRC requiert une demande en énergie sur l'ensemble de son cycle de vie de 957 MJ, et émet 52,1 kg de CO₂. Ces consommations et émissions s'expliquent majoritairement par le processus de transport des GBRC, qui contribue pour plus de 80% à l'impact total.

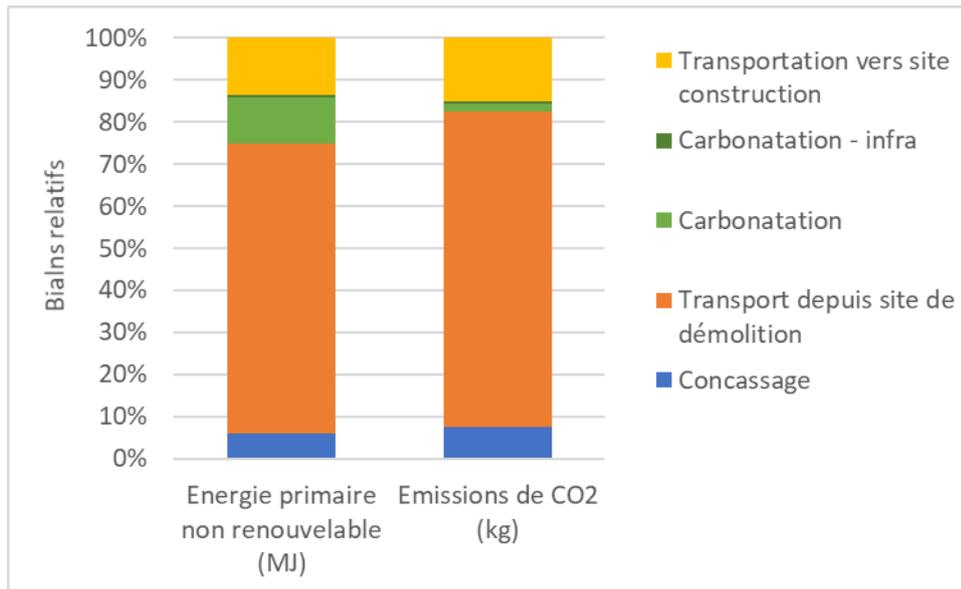


Figure 8. Bilans d'énergie primaire non renouvelable et émissions de CO₂ fossile – contribution des différentes étapes du cycle de vie

Pour les conditions de transport du système étudié, il est possible de comparer les émissions de CO₂ pour les différentes étapes du cycle de vie des GBRC avec les quantités de CO₂ captés lors du processus de carbonatation (Figure 9). Que soit pour la fraction fine 0-4 mm ; la fraction grossière 4-16 mm ou pour un taux de captage à atteindre de 50 g/kg de GBR, les quantités de CO₂ captées sont inférieures aux émissions sur l'ensemble du cycle de vie. Dans le cas de la fraction grossière, les émissions liées au concassage et à la carbonatation sont du même ordre de grandeur que le taux de CO₂ capté lors du processus de carbonatation. Sur la base de l'étude préliminaire, le processus de carbonatation des GBR 4-16 mm ne permet pas de compenser les émissions du concassage et de la carbonatation.

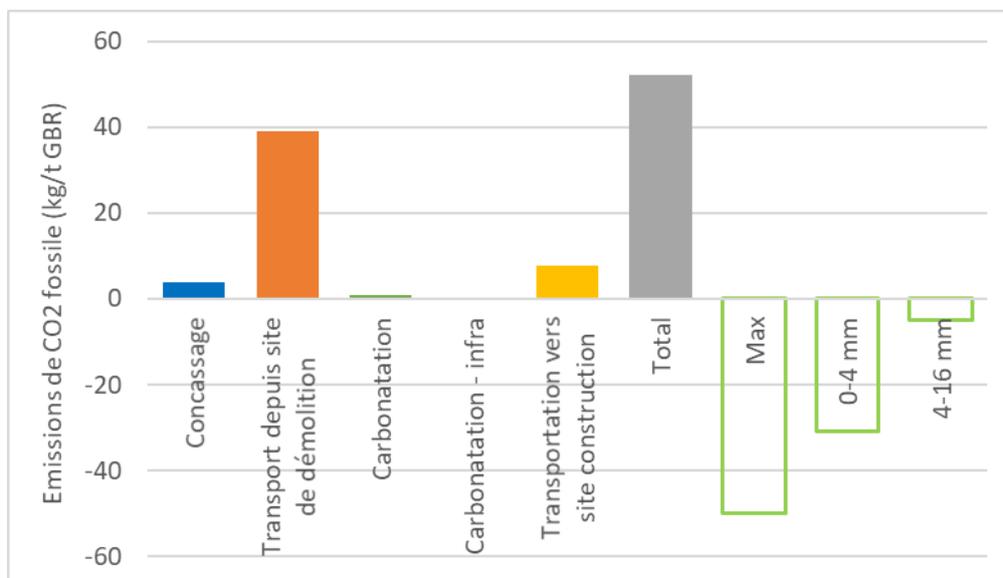


Figure 9. Comparaison des émissions de CO₂ fossile par étape du cycle de vie et des quantités captées par carbonatation

4.3 Etudes de sensibilité sur le bilan CO₂ fossile

Des études de sensibilité ont porté sur la modélisation du transport et de l'électricité.

4.3.1 Influence du type de véhicule et d'électricité

Une première étude de sensibilité fait varier le type de véhicule utilisé pour le transport des GBR et des GBRC (EURO III, IV, V, VI ou moyenne selon parc français) ainsi que le type d'électricité utilisée pour la carbonatation (mix français utilisé dans le scénario de référence ou mix européen). Le type de véhicule a une influence marginale sur le bilan total (environ 2%). Changer de mix électrique a une influence plus significative sur les émissions de CO₂ fossile de l'étape de carbonatation, qui passent de 0,85 kg /t GBR avec de l'électricité française à 3,4 kg/t GBR avec un mix électrique européen, moins décarboné, soit une augmentation d'un facteur 4. Compte tenu des hypothèses sur les distances parcourues, le choix du mix électrique a cependant une influence limitée (environ 4%) sur les émissions totales.

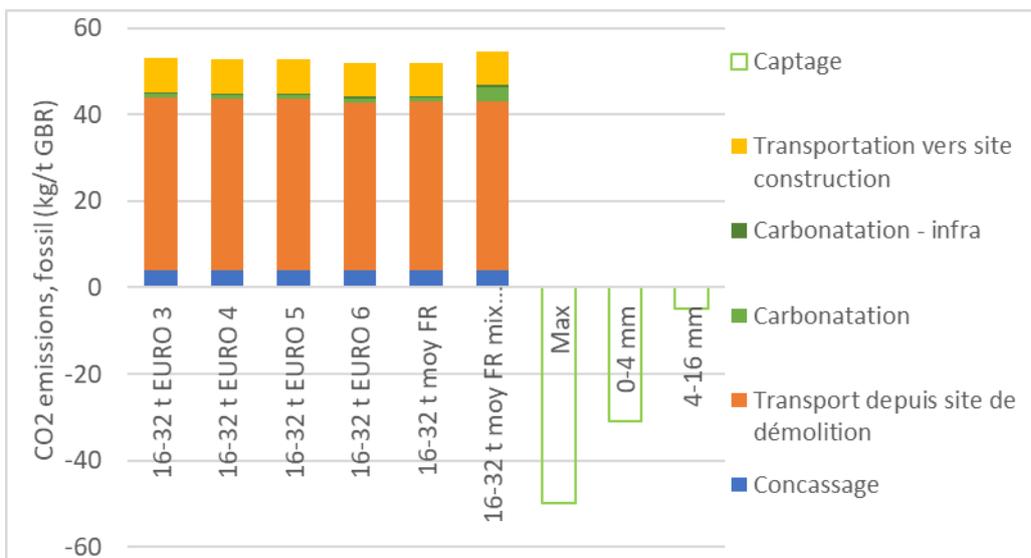


Figure 10. Emissions de CO₂ fossile du procédé de carbonatation pour différents types de véhicules et mix électriques en comparaison des quantités captées par carbonatation

4.3.2 Influence des distances de transport

Compte tenu de l'importance du transport amont et aval, une étude de sensibilité a porté sur la distance totale de transport, sans distinction entre GBR et GBRC (Figure 11). Sur la base des hypothèses formulées pour l'ACV préliminaire, il apparaît que les émissions de CO₂ générées par le système de carbonatation (transport des GBR et des GBRC compris) peuvent être compensées par un captage du CO₂ par la fraction fine pour une distance transportée maximum de 145 km. Cette distance parcourue pour garder un bilan CO₂ à l'équilibre est de 265 km pour un captage de CO₂ maximum (50 kg/tGBR). Par contre, il apparaît que le CO₂ capté par carbonatation de la fraction grossière ne permet pas de compenser les émissions du procédé, même pour une distance de transport nulle (3,9 kg CO₂ pour le concassage et 1,2 kg de CO₂ pour la carbonatation, carbonateur compris).

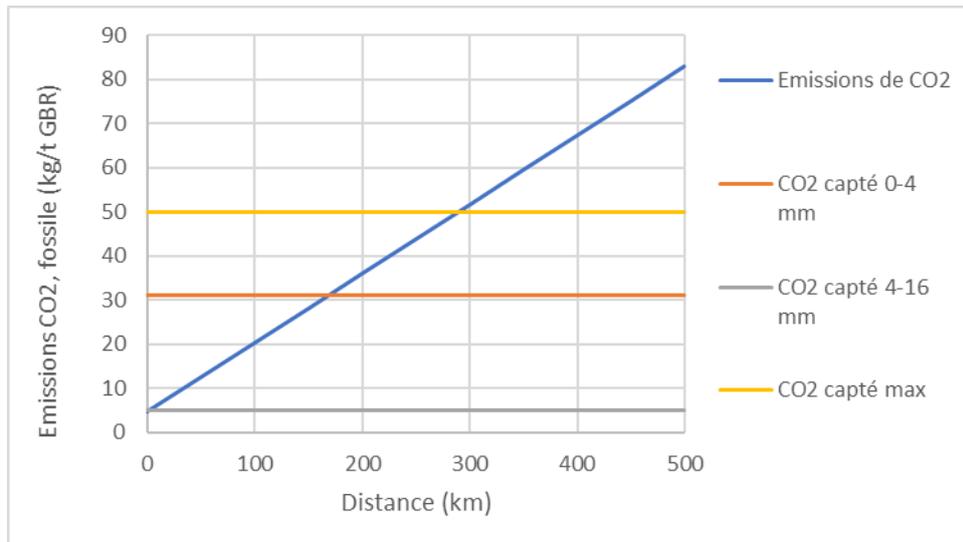


Figure 11. Etude de sensibilité sur la distance totale de transport des granulats (GBR et GBRC)

5 Conclusion et perspectives

5.1 Conclusion sur l'ACV préliminaire

L'évaluation simplifiée du démonstrateur mis en œuvre sur le site de la cimenterie VICAT à Créchy met en évidence les points suivants :

- Du point de vue du captage du CO₂, la carbonatation de la fraction grossière ne semble pas intéressante puisque la quantité de CO₂ captée est faible, et du même ordre de grandeur que le CO₂ émis lors du processus de carbonatation ;
- La carbonatation de la fraction fine se révèle par contre plus intéressante en termes de captage de CO₂ ;
- Le transport des GBR et des GBRC a un poids environnemental important dans le bilan total. En considérant la fraction fine et en considérant les données sur le captage de CO₂ fournies par VICAT, la quantité de CO₂ captée par carbonatation ne compense plus les émissions lorsque les granulats sont transportés sur une distance cumulée dépassant environ 150 km (transport des GBR jusqu'à l'unité de carbonatation + transport des GBRC au client final)

Cette première ACV porte sur un procédé de carbonatation des GBR et permet de comparer entre elles les contributions des différentes étapes du cycle de vie de ce procédé. Elle n'a pour le moment pas porté sur la comparaison de scénarios distincts.

D'autre part, le système modélisé exclut l'étape de production de béton à partir de GBRC. Dans une perspective de comparaison de scénarios, il serait nécessaire de prendre en compte l'amélioration de la qualité du béton final du fait de l'amélioration de celle du granulat après carbonatation, et en particulier l'éventuelle réduction de ciment ajouté lors de la fabrication du béton, facteur clé des performances environnementales mis en évidence par le PN Recybéton (Idir et al 2015).

Enfin, il serait intéressant d'étendre l'analyse au système cimenterie + carbonateur industriel pour pouvoir prendre en compte la réduction d'émissions de CO₂ à cette échelle.

5.2 Perspectives : ACV détaillée

5.2.1 Approche

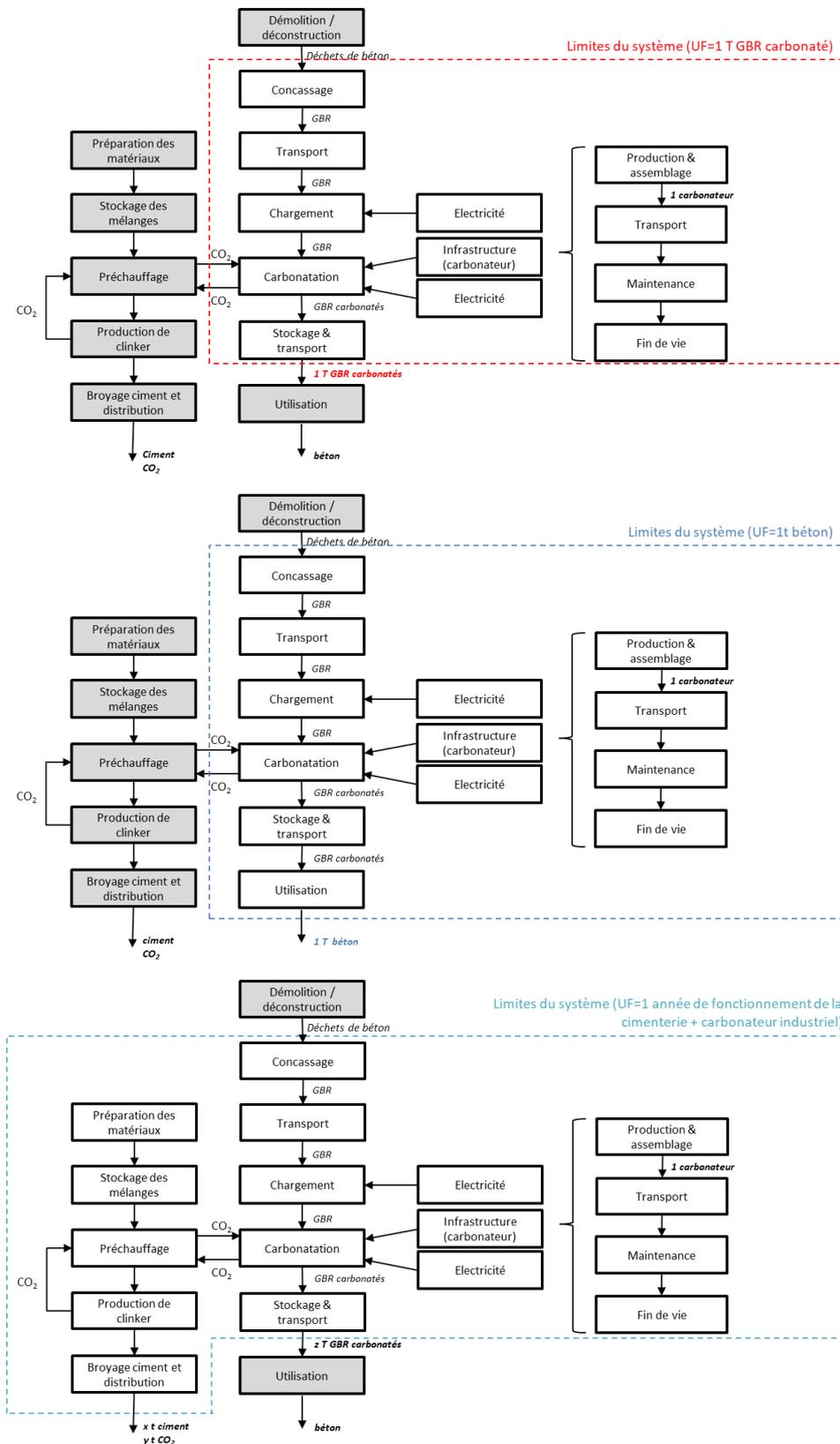


Figure 12. Unités fonctionnelles et limites du système proposées pour l'ACV détaillée

La prochaine étape de l'étude porte sur la réalisation d'une ACV détaillée comparant différentes options de :

- mise à disposition de granulats comme matériaux de construction
- de production de béton de qualité équivalente
- de système industriel de carbonatation.

Pour ce faire, l'unité fonctionnelle sera redéfinie pour prendre en considération l'extension du système (Figure 12).

5.2.2 Scénarios à comparer

Sur la base de cette évaluation préliminaire, après discussion avec l'équipe du CSTB en charge de l'analyse économique et retours des partenaires du projet FastCarb, plusieurs scénarios à comparer seront définis en fonction d'hypothèses sur :

- les types de granulats :
 - Granulats naturels GN
 - Granulats de béton recyclés non carbonatés GBRNC
 - Granulats de béton recyclés carbonatés GBRC
- les types de valorisation :
 - Sous-couche routière
 - Béton dans le béton
- les systèmes de carbonatation impliquant :
 - le transport de granulats recyclés (démonstrateurs VICAT et Lafarge Holcim)
 - le transport de CO₂ (démonstrateur Clamens)

La construction des scénarios bénéficiera des données fournies par le GT2.2 sur la fabrication des bétons à partir des GBRC, dont les résultats seront disponibles à la fin du premier trimestre 2021.

En attendant les résultats du GT2.2, une étude ACV paramétrique sera faite en se basant sur les travaux de Idir & Ben Fraj (2019), partant sur une hypothèse de 15% de granulats recyclés dans le béton (annexe à l'Eurocode 2), et en faisant varier :

- Les distances de transport
- Le taux de ciment en fonction du taux de granulat

Une attention particulière portera sur la distinction entre fraction fine ou sable (0-4 mm) et fraction grossière (4-16 mm).

5.2.3 Analyse comparée des performances environnementales et des coûts

Après discussion avec l'équipe du CSTB en charge de l'analyse économique et retours des partenaires du projet FastCarb, huit scénarios complémentaires seront examinés sur le plan environnemental et économique (Tableau 7) :

Tableau 7. Bilan d'énergie primaire non renouvelable et CO₂ fossile (exprimés par t de GBRC)

Scenarion A	Granulat naturel (GN)
Scenarion B	Granulat de béton recyclé pour un usage routier (GBRR) fabriqué sur une plateforme
Scenarion C	Granulat de béton recyclé pour un usage bâtiment (GBRB) fabriqué sur une plateforme
Scenarion D	Granulat de béton recyclé carbonaté (GBRC) fabriqué sur le site de déconstruction avec carbonatation sur site

Scenario E	Granulat de béton recyclé carbonaté (GBRC) fabriqué sur le site de déconstruction suivi d'une carbonatation sur un autre site type cimenterie
Scenario F	Granulat de béton recyclé carbonaté (GBRC) fabriqué sur une plateforme de recyclage y compris carbonatation
Scenario G	Granulat de béton recyclé carbonaté (GBRC) fabriqué sur une plateforme de recyclage suivi d'une carbonatation sur un autre site type cimenterie

Un travail complémentaire de mise en cohérence des hypothèses, en particulier sur les transports (taux de charge notamment) sera effectué.

5.2.4 Besoins en données

Il s'agira de préciser les données d'inventaire pour le processus de concassage du béton (voir MIE de l'UNPG et procédé décrit dans Mousavi et al 2020). Certaines données sur le démonstrateur VICAT seront précisées.

Pour le taux de captage du CO₂ dans les granulats, les données fournies par VICAT (5 – 31 – 50 kg CO₂/t BGR pour les fractions fine, grossière et capture maximum, respectivement) seront utilisées comme référence.

En ce qui concerne la technique de carbonatation par transport de CO₂, le site de Clamens utilise du CO₂ fourni par Air Liquide, produit à partir du CO₂ contenu dans l'air. Ce système peut être utilisé comme scénario de référence, mais il serait également intéressant de disposer de données sur les potentiels systèmes de carbonatation utilisant du CO₂ issu de gaz industriels purifié et compressé. Certaines données issues de base générique (ecoinvent) ou de la littérature seront utilisées dans un premier temps (par exemple, Di Maria 2020).

5.2.5 Méthodologie et affichage des résultats

Deux points de méthode feront l'objet d'une attention particulière :

- La comptabilisation du CO₂ capté à partir de gaz industriel.
- L'attribution d'une réduction de CO₂ pour l'émetteur (le site industriel de la cimenterie), ou pour le granulat de béton recyclé carbonaté (la filière matériau ou produit). Il est en effet plus favorable en termes d'affichage de présenter un béton bas carbone qu'un ciment à impact plus faible. Ce point sera particulièrement discuté par une analyse du système cimenterie + carbonateur.

6 Bibliographie

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.

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.

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.

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.

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.

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

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

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